

ENERGIA JĄDROWA W PYTANIACH I ODPOWIEDZIACH



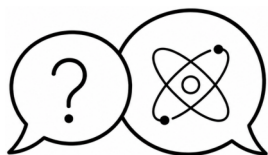
POLSKIE
ELEKTROWNIE
JĄDROWE

FUNDACJA
FORUM ATOMOWE



Łukasz Koszuk

ENERGIA JĄDROWA W PYTANIACH I ODPOWIEDZIACH



Warszawa 2026

Redakcja, ilustracje, skład tekstu: Łukasz Koszuk

Korekta: Małgorzata Klisińska

Opracowano na zlecenie: Polskie Elektrownie Jądrowe sp. z o.o.

Wydanie I, 2026

Wydawca:

Fundacja FORUM ATOMOWE
ul. Złota 7 lok. 18
00-019 Warszawa
www.forumatomowe.org
fundacja@forumatomowe.org

ISBN: 978-83-982133-0-1

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiejkolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Copyright © 2026 Polskie Elektrownie Jądrowe sp. z o.o.,
Fundacja FORUM ATOMOWE

Wstęp

Polska buduje energetykę jądrową. Nie jest to już przedmiotem sporu — poparcie dla tej technologii sięga w badaniach opinii ponad dziewięćdziesięciu procent, a pytania, które padają dziś najczęściej, dotyczą nie tego, czy elektrownie powstaną, lecz tego, jak działają i co ich obecność oznacza w codziennym życiu.

Niniejsza publikacja odpowiada właśnie na takie pytania. Adresowana jest przede wszystkim do mieszkańców okolic planowanych elektrowni jądrowych — osób, które o inwestycji dowiadują się z bardzo różnych źródeł, a oczekują informacji rzetelnej, konkretnej i podanej w prosty sposób. Nie zakłada się tu żadnego przygotowania technicznego: podstawy fizyki wyłożono w zakresie niezbędnym do zrozumienia dalszych treści.

Zebrano 70 pytań, uporządkowanych w 12 działów — od budowy atomu i natury promieniowania, przez zasadę działania elektrowni, jej bezpieczeństwo i nadzór nad nim, po zdrowie, środowisko, gospodarkę odpadami, ekonomikę inwestycji oraz jej wpływ na najbliższe otoczenie. Osobne miejsce zajmują pytania trudne i lekcje z przeszłości.

Odpowiedzi opracowano językiem popularnonaukowym. Tekst uzupełnia bogaty materiał ilustracyjny: zdjęcia, schematy, wykresy i infografiki, w wielu miejscach prowadzące wywód, a nie tylko mu towarzyszące. Całość zamykają słowniczek pojęć oraz wykaz źródeł, pozwalający sięgnąć do materiałów oryginalnych.

Układ publikacji pozwala korzystać z niej zarówno w całości, jak i wybiórczo — pytanie po pytaniu, w kolejności podyktowanej własnymi potrzebami.

Spis treści

DZIAŁ I Atom

i promieniowanie – to, czego nie widać... ..

1. Czym jest energia jądrowa i dlaczego kilogram uranu-235 może wyzwolić tyle energii, co spalenie kilku tysięcy ton węgla?... .. 11
2. Na czym polega rozszczepienie jądra atomu i czym jest reakcja łańcuchowa?... .. 12
3. Czym jest promieniotwórczość i dlaczego jedne izotopy zanikają w sekundy, a inne przez tysiąclecia?... .. 14
4. Jakie są rodzaje promieniowania jonizującego, co je zatrzymuje i w jakich jednostkach opisuje się dawki?... .. 17
5. Promieniowanie naturalne towarzyszy nam od zawsze – skąd pochodzi i ile wynosi w Polsce?... .. 20
6. Gdzie poza energetyką korzystamy z promieniowania – medycyna, przemysł, nauka, żywność?... .. 24

7. Jakie doświadczenia z technologiami jądrowymi ma Polska?... .. 28

DZIAŁ II Jak działa

elektrownia jądrowa... ..

8. Jak elektrownia jądrowa wytwarza energię elektryczną – od rozszczepienia w rdzeniu do sieci elektroenergetycznej?... .. 32
9. Jak zbudowane są najczęściej spotykane typy reaktorów energetycznych – PWR, BWR i CANDU?... .. 33
10. Jak kontroluje się reakcję rozszczepienia?... .. 36
11. Co oznaczają „generacje” reaktorów i czym wyróżnia się generacja III+?... .. 40
12. Kto steruje reaktorem i jak wygląda cykl pracy elektrowni?... .. 45
13. Jak długo może pracować elektrownia i skąd pewność, że po dekadach nadal jest bezpieczna?... .. 47

DZIAŁ III Paliwo jądrowe... ..

14. Jak powstaje paliwo jądrowe – od rudy uranu po kasetę w rdzeniu reaktora?... .. 53

15. Skąd pochodzi uran, czy grozi nam jego brak i jak zapewnia się bezpieczeństwo dostaw?...	56
16. Dlaczego paliwa energetycznego nie można użyć do budowy bomby atomowej – i kto to kontroluje?...	58
17. Czy wypalone paliwo to odpad, czy cenny surowiec? O recyklingu i zamkniętym cyklu paliwowym...	59

DZIAŁ IV Bezpieczeństwo – jak chroni się ludzi i środowisko...

18. Na czym polega „obrona w głąb” – fundament bezpieczeństwa jądrowego?...	62
19. Jakie kolejne bariery oddzielają substancje promieniotwórcze od otoczenia?...	63
20. Czym są pasywne systemy bezpieczeństwa i co się stanie, gdy elektrownia straci zasilanie?...	65
21. Jak projektuje się elektrownię na zdarzenia ekstremalne – trzęsienia ziemi, powodzie, upadek samolotu?...	67

22. Jak inżynierowie szacują ryzyko poważnej awarii i co mówią wyniki tych analiz?...	72
---	----

DZIAŁ V Ochrona i nadzór...

23. Jak zapobiega się sabotażowi i atakom terrorystycznym na elektrownię jądrową?...	75
24. Czy elektrownię jądrową można „zhakować”? O cyberbezpieczeństwie systemów sterowania...	76
25. Co z bezpieczeństwem elektrowni jądrowych w czasie konfliktu zbrojnego?...	79
26. Kto patrzy elektrowni jądrowej na ręce?...	81
27. Czym jest kultura bezpieczeństwa i dlaczego każdy pracownik ma prawo przerwać pracę, gdy dostrzeże zagrożenie?...	83
28. Do czego służy międzynarodowa skala INES i co mówi o wadze zdarzeń?...	86

DZIAŁ VI Przygotowani na wszelki wypadek...

29. Czym są strefy planowania awaryjnego i skąd biorą się ich granice?...	90
---	----

30. Co strefa planowania awaryjnego oznacza w praktyce dla mieszkańców?...	93
31. Jak działa system ostrzegania i kto kieruje działaniami, gdyby doszło do zdarzenia radiacyjnego?...	95
32. Na czym polegają działania ochronne i dlaczego czasem najbezpieczniej jest po prostu zostać w domu?...	97
33. Jak działa jod stabilny i dlaczego przyjmuje się go wyłącznie na polecenie służb?...	100

DZIAŁ VII Promieniowanie a zdrowie...

34. Jak promieniowanie jonizujące oddziałuje na organizm – i skąd to wiemy?...	104
35. Jakie dawki otrzymujemy na co dzień i jak na ich tle wypada sąsiedztwo elektrowni jądrowej?...	106
36. Czy małe dawki promieniowania szkodzą? Co pokazują badania wielkich grup ludzi?...	109
37. Czy dzieci i kobiety w ciąży wymagają szczególnej ochrony przed promieniowaniem jonizującym?...	111

38. Czy mieszkanie w pobliżu elektrowni jądrowej wpływa na zdrowie? Co mówią badania epidemiologiczne?...	113
39. Jak kontroluje się promieniowanie w środowisku, wodzie i żywności – i czy mogę to sprawdzić samodzielnie?...	117
40. Jak chroni się pracowników elektrowni i jakie dawki mogą otrzymać?...	119

DZIAŁ VIII Odpady promieniotwórcze...

41. Jakie odpady promieniotwórcze powstają w elektrowni i ile ich naprawdę jest?...	122
42. Jak przetwarza się i zabezpiecza odpady nisko- i średnioaktywne – i gdzie trafiają dziś odpady w Polsce?...	124
43. Co dzieje się z wypalonym paliwem po wyjęciu z reaktora?...	126
44. Czym jest głębokie składowisko geologiczne i dlaczego uznaje się je za rozwiązanie docelowe?...	128

45. Jak długo odpady pozostają groźne i co tak naprawdę zostawimy przyszłym pokoleniom?... 130
46. Kto płaci za odpady i przyszłą likwidację elektrowni – i czy pieniądze odkłada się już od pierwszej kilowatogodziny?... 132
47. Jak testuje się pojemniki transportowe i czy przewóz materiałów promieniotwórczych jest bezpieczny?... 134
48. Czy do Polski mogą trafiać odpady promieniotwórcze z zagranicy?... 136

DZIAŁ IX Środowisko

i klimat... 138

49. Jaki jest ślad węglowy energii jądrowej, licząc całe życie elektrowni – od budowy po likwidację?... 139
50. Ile wody potrzebuje elektrownia jądrowa i jak oddziałuje na morze, rzekę lub jezioro, z którego korzysta?... 141
51. Co elektrownia uwalnia do otoczenia podczas normalnej pracy i jak kontroluje się te uwolnienia?... 144

52. Jak bada się środowisko przed budową elektrowni i przez cały okres jej pracy?... 147
53. Czy zmiany klimatu – upały, susze, sztormy – zagrażają pracy elektrowni jądrowych?... 149

DZIAŁ X Inwestycja, gospodarka, sąsiedztwo... 152

54. Jak wybiera się lokalizację elektrowni jądrowej i co bada się latami przed decyzją?... 153
55. Jakie zgody i pozwolenia poprzedzają budowę – i kto kontroluje każdy etap?... 154
56. Czy mieszkańcy mają wpływ na inwestycję? O konsultacjach i udziale społeczeństwa... 156
57. Dlaczego budowa elektrowni jądrowej tyle kosztuje – i od czego naprawdę zależy cena prądu, który z niej popłynie?... 159
58. Jak wielka budowa zmienia okolicę – ruch, hałas, tysiące pracowników?... 162
59. Co elektrownia daje gminie i regionowi – podatki, miejsca pracy, rozwój?... 163

60. Czy sąsiedztwo elektrowni obniża wartość nieruchomości albo szkodzi rolnictwu i turystyce?... 165
61. Co dzieje się z elektrownią po zakończeniu pracy – jak przebiega likwidacja i co zostaje na terenie?... 167

DZIAŁ XI Trudne pytania i lekcje z przeszłości... 169

62. Co naprawdę wydarzyło się w Czarnobylu – i dlaczego taki przebieg awarii nie może się powtórzyć we współczesnych reaktorach?... 170
63. Czego świat nauczył się po Fukushima – i jakie były rzeczywiste skutki zdrowotne tej awarii?... 173
64. Dlaczego w Three Mile Island doszło do stopienia rdzenia, a mimo to nikt nie ucierpiał?... 176
65. Czy reaktor energetyczny może wybuchnąć jak bomba atomowa?... 178

66. Które źródła energii są najbezpieczniejsze – i jak na ich tle wypada energia jądrowa?... 180
67. Skąd bierze się lęk przed promieniowaniem i jak odróżnić rzetelną wiedzę od dezinformacji?... 182

DZIAŁ XII Przyszłość energetyki jądrowej... 185

68. Małe reaktory modułowe (SMR) – czym są i jaką rolę mogą odegrać obok dużych elektrowni?... 186
69. Czy lepiej poczekać na reaktory IV generacji, zamiast budować dziś reaktory III/III+?... 188
70. Czy fuzja termojądrowa zastąpi kiedyś energetykę jądrową opartą na rozszczepieniu?... 189

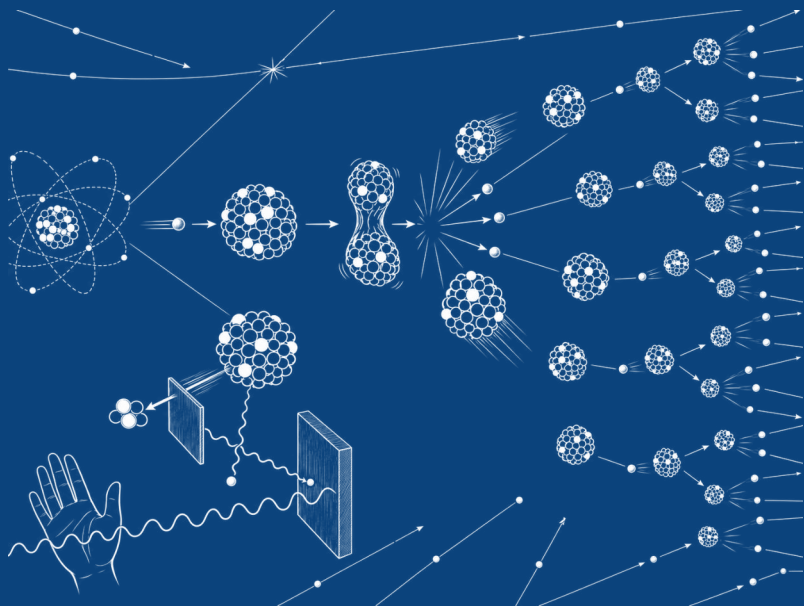
Słowniczek... 194

Indeks... 204

Lista źródeł... 210

Źródła ilustracji i zdjęć... 215

DZIAŁ I



**atom
i promieniowanie –
to, czego nie widać**

CZYM JEST ENERGIA JĄDROWA I DLACZEGO KILOGRAM URANU-235 MOŻE WYZWOLIĆ TYŁE ENERGII, CO SPALENIE KILKU TYSIĘCY TON WĘGLA?

CZY WIESZ, ŻE...

Albert Einstein ogłosił wzór $E = mc^2$ w 1905 r. Na praktyczne wykorzystanie tej zależności do produkcji energii trzeba było czekać niemal 40 lat.

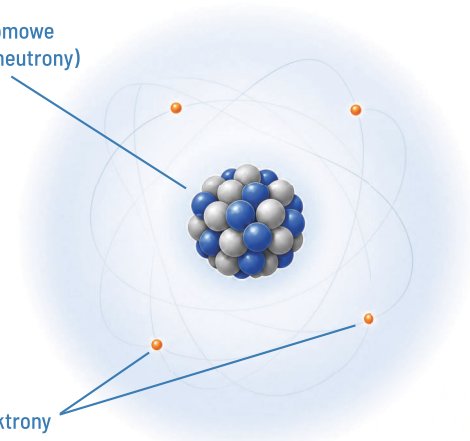
Cała otaczająca nas materia zbudowana jest z atomów. W centrum każdego atomu znajduje się jądro – złożone z protonów i neutronów (z wyjątkiem najlżejszego izotopu wodoru, którego jądro tworzy tylko jeden proton) – a wokół niego rozpościera się chmura elektronów (rys. 1.1). Choć jądro zajmuje znikomy ułamek objętości atomu, skupia się w nim niemal cała jego masa. Protony i neutrony spaja w jądrze tzw. oddziaływanie silne – najpotężniejsza siła znana fizyce. I to właśnie z nią jest związana energia jądrowa.

Gdy palimy węgiel, gaz czy benzynę, zachodzi reakcja chemiczna: przebudowie ulegają jedynie zewnętrzne powłoki elektronowe atomów, a jądra pozostają nietknięte. Energia wydzielana w takich przemianach jest niewielka. W przemianach jądrowych w grę wchodzi siły spajające samo jądro – a te są miliony razy potężniejsze. Dlatego rozszczepienie pojedynczego jądra uranu uwalnia około

jądro atomowe
(protony + neutrony)

elektrony

RYŚ. 1.1 Atom w uproszczeniu: małe, ciężkie jądro z protonów i neutronów oraz otaczająca je chmura lekkich elektronów. Rozmiary nie są zachowane w skali.





1 PASTYLKA PALIWA
JĄDROWEGO (~7 g)

OK. 1 TONA WĘGLA

3 BARYŁKI ROPY

RYS. 1.2 Z jednej pastylki paliwa jądrowego można uzyskać tyle energii, co z ok. tony węgla lub trzech baryłek ropy naftowej (ok. 480 litrów).

50 milionów razy więcej energii niż spalenie pojedynczego atomu węgla.

Skąd ta energia się bierze, wyjaśnia najstławniejszy wzór fizyki: $E = mc^2$. Łączna masa początkowego układu – jądra uranu-235 i pochłoniętego neutronu – jest nieco większa od łącznej masy wszystkich produktów reakcji: fragmentów rozszczepienia, wyemitowanych neutronów i promieniowania. Różnica masy (tzw. deficyt masy) odpowiada uwolnionej energii zgodnie z powyższym wzorem.

Przełożmy to na wyobrażalne liczby (rys. 1.2). Rozszczepienie zaledwie jednego grama uranu-235 daje tyle ciepła, co spalenie około trzech ton węgla. Pojedyncza pastylka paliwowa – ceramiczny walec ważący kilka gramów – dostarcza tyle energii, ile tona węgla albo trzy baryłki ropy naftowej. Duży blok węglowy o mocy 1000 MW pochłania rocznie około trzech milionów ton węgla, dowożonych nieprzerwanie pociągami. Blok jądrowy o tej samej mocy zużywa w tym czasie ok. 25–30 ton paliwa – ładunek kilku ciężarówek.

ZAPAMIĘTAJ!

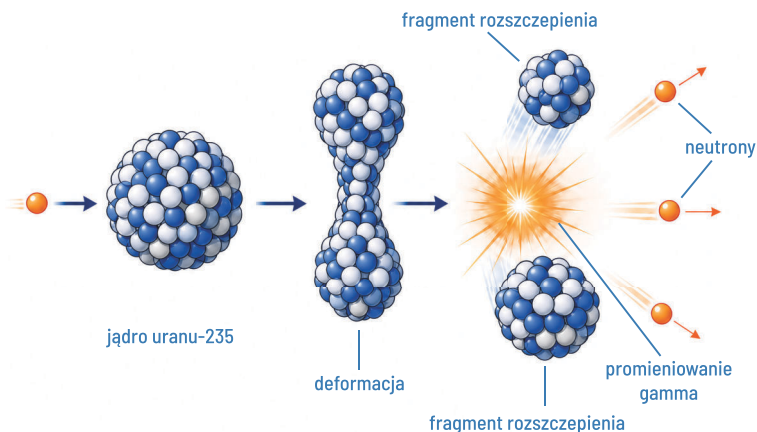
Energia jądrowa to energia zgromadzona w jądrach atomów – w siłach, które wiążą ze sobą protony i neutrony. Jest milion razy bardziej skoncentrowana niż energia chemiczna ukryta w węglu, gazie czy ropie. Dlatego pastylka paliwa jądrowego wielkości opuszki palca zastępuje całą tonę węgla.

Ta gigantyczna gęstość energii ma praktyczne konsekwencje, do których będziemy wracać w całej publikacji: elektrownia jądrowa nie potrzebuje ciągłych dostaw surowca i łatwo zgromadzić w niej zapas paliwa na lata, nie wytwarza spalin, a objętość powstających odpadów jest – na tle innych gałęzi energetyki – zaskakująco mała (zob. pyt. 41).

2

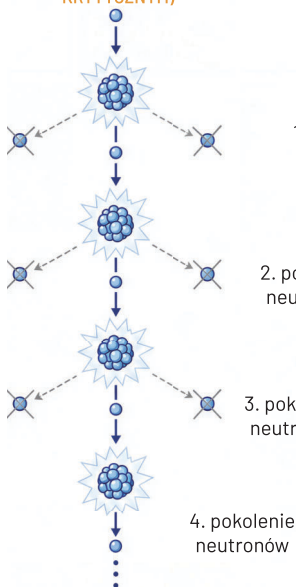
NA CZYM POLEGA ROZSZCZEPIENIE JĄDRA ATOMU I CZYM JEST REAKCJA ŁAŃCUCHOWA?

Jądro uranu-235 można sobie wyobrazić jako naprężoną kroplę cieczy. Gdy pochłonie powolny neutron, może zacząć drgać i deformować się, aż wreszcie pęka na dwa mniejsze jądra, zwane fragmentami rozszczepienia (rys. 1.3). Oprócz nich emitowane są średnio dwa do trzech świeżych neutronów, a całe przemianie towarzyszy wyzwolenie ok. 200 MeV (200 milionów elektronowoltów) energii.



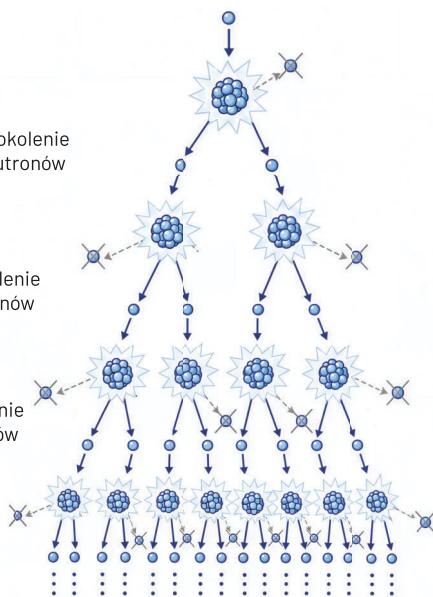
RYŚ. 1.3 Rozszczepienie jądra uranu-235: trafione neutronem, może ulec rozszczepieniu na dwa lżejsze jądra, uwalniając energię i kolejne neutrony.

REAKCJA KONTROLOWANA (REAKTOR W STANIE KRYTYCZNYM)



W KAŻDYM POKOLENIU Z JEDNEGO
ROZSZCZEPIONIA ŚREDNIO JEDEN
NEUTRON WYWOŁUJE KOLEJNE
ROZSZCZEPIONIE – STAŁA MOC

REAKCJA LAWINOWA



NIEKONTROLOWANY WZROST MOCY

RYS. 14 Pokolenie (generacja) neutronów to jeden cykl reakcji łańcuchowej: od chwili, gdy neutrony powodują rozszczepienia, do chwili, gdy uwolnione w nich nowe neutrony powodują następne rozszczepienia. Każde takie „pokolenie” jest więc potomkiem poprzedniego. Porównując liczbę neutronów w dwóch sąsiednich pokoleniach, określa się, czy reakcja narasta, wygasa, czy biegnie w równym tempie. W reaktorze w każdym pokoleniu neutronów z pojedynczego rozszczepienia tylko jeden neutron wywołuje kolejne rozszczepienie (moc stała). Warianet lawinowy – niekontrolowane rozszczepienie – nie jest sposobem pracy reaktora energetycznego i jest projektowo wykluczany przez układy sterowania oraz zabezpieczeń.

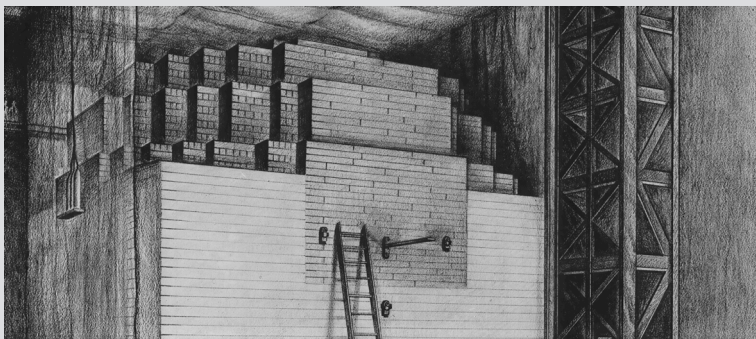
Większość tej energii unoszą rozpędzone fragmenty. Grzejąc w materiale paliwowym po przebyciu ułamków milimetra, zamieniają energię ruchu w ciepło. To właśnie głównie to ciepło podgrzewa wodę w reaktorze i ostatecznie napędza turbinę (zob. pyt. 8).

CZY WIESZ, ŻE...

Słowo „rozszczerzenie” zapożyczono z biologii – od podziału komórki. Zjawisko odkryli Otto Hahn i Fritz Strassmann, a jego fizyczne wyjaśnienie podali Lise Meitner i Otto Frisch.

Fragmety rozszczepienia to jądra nowych pierwiastków: między innymi jodu, cezu, ksenonu czy strontu. Zwykle mają nadmiar neutronów, dlatego same są promieniotwórcze (zob. pyt. 3). To one stanowią zasadniczą część substancji promieniotwórczych w paliwie i to głównie z ich powodu wypalone paliwo wymaga chłodzenia i osłon (zob. pyt. 43).

A neutrony? To one czynią z rozszczepienia coś więcej niż ciekawostkę. Skoro jedna przemiana uwalnia dwa-trzy neutrony, każdy z nich może trafić kolejne jądro uranu i wywołać następne rozszczepienie – i tak dalej. Nazywamy



Chicago Pile-1

Stos Fermiego – narodziny ery atomu

Pierwszą w dziejach kontrolowaną reakcję łańcuchową uruchomił zespół Enrica Fermiego 2 grudnia 1942 r., w ramach ściśle tajnego Programu Manhattan. Miejszem przełomu nie był żaden laboratoryjny bunkier, lecz opuszczony kort do squasha pod trybunami stadionu futbolowego Uniwersytetu Chicagowskiego. Reaktor – nazwany stos Fermiego (Chicago Pile-1) – rzeczywiście był stos: ułożoną warstwą po warstwie spłaszczoną kulą z około 45 tysięcy bloków czystego grafitu, w które wpasowano bryły naturalnego uranu. Liczył 57 warstw, ważył setki ton i nie miał ani chłodzenia, ani

osłon przed promieniowaniem. Reakcję powstrzymywały pręty z kadmu – pierwiastka silnie pochłaniającego neutrony.

Gdy ok. godz. 15:30 wysunięto ostatni pręt, liczniki neutronów zaczęły stukać coraz szybciej, aż ich terkot złął się w jednostajny szum: reakcja sama się podtrzymywała. Stos pracował z mocą zaledwie pół wata – słabiej niż świeciła mała lampka – lecz ludzkość po raz pierwszy zapanowała nad energią jądrową. Sukces zameldowano przełożonym szyfrem, by nie zdradzić tajemnicy: „Włoski żeglarz przybił do brzegu Nowego Świata”. Na pytanie, jak przyjęli go tubylcy, padła odpowiedź: „Bardzo przyjaźnie”.

to reakcją łańcuchową (rys. 1.4). O jej przebiegu decyduje prosta arytmetyka: jeżeli z każdego rozszczepienia średnio dokładnie jeden neutron doprowadza do kolejnego, reakcja biegnie w równym tempie – układ jest w stanie krytycznym i właśnie tak, na stałej mocy, pracuje reaktor. Jeżeli mniej niż jeden – reakcja wygasa (stan podkrytyczny). Jeżeli więcej – moc rośnie (stan nadkrytyczny). W reaktorze dopuszcza się stan nadkrytyczny wyłącznie przejściowo i pod pełną kontrolą. Jak dokładnie steruje się tym bilansem neutronów, opisujemy w pytaniu 10.

Jest jeszcze jeden warunek: nowo emitowane neutrony są bardzo szybkie, a jądro uranu-235 najchętniej pochłania neutrony powolne. Dlatego w reaktorach potrzebny jest moderator – substancja spowalniająca neutrony. W najpopularniejszych reaktorach jest nią zwykła woda: ta sama, która odbiera z paliwa ciepło. Reaktory prężnie stanowią jednak ważny wyjątek: wykorzystują neutrony niespowolnione i nie mają moderatora.

CZYM JEST PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ I DLACZEGO JEDNE IZOTOPY ZANIKAJĄ W SEKUNDY, A INNE PRZEZ TYSIĄCLECIA?

3

O tym, jakim pierwiastkiem jest atom, decyduje liczba protonów w jądrze: każdy atom o 92 protonach to uran, każdy o 6 protonach – węgiel. Liczba neutronów może się natomiast różnić. Takie odmiany tego samego pierwiastka nazywamy izotopami (rys. 1.5). Węgiel-12 jest stabilny, węgiel-14, o dwóch neutronach więcej – już nie.

Jądro jest stabilne przede wszystkim wtedy, gdy proporcja neutronów do protonów jest właściwa. Jeśli neutronów jest za dużo albo za mało – albo jądro jest po prostu bardzo ciężkie, jak w uranie czy torze – prędzej czy później samorzutnie się przekształci: wyrzuci cząstkę alfa albo beta, często wysyłając jeszcze kwant promieniowania gamma (rodzaje promieniowania omawiamy w pytaniu 4). Taką przemianę nazywamy rozpadem promieniotwórczym. Powstałe jądro bywa stabilne, ale bywa też znów

CIEKAWOSTKA

Metoda datowania węglem-14, wykorzystująca jego okres połowicznego rozpadu, przyniosła jej twórcy – Willardowi Libby'emu – Nagrodę Nobla z chemii w 1960 r. Dziś pozwala oznaczać wiek próbek liczących do około pięćdziesięciu tysięcy lat.

RYS. 1.5 Izotopy to odmiany tego samego pierwiastka – mają tyle samo protonów, a różnią się liczbą neutronów.



6 PROTONÓW
+ 6 NEUTRONÓW
WĘGIEL-12
(TRWAŁY)



6 PROTONÓW
+ 7 NEUTRONÓW
WĘGIEL-13
(TRWAŁY)



6 PROTONÓW
+ 8 NEUTRONÓW
WĘGIEL-14
(PROMIENIOTWÓRCZY)

promieniotwórcze i rozpada się dalej – tak tworzą się całe łańcuchy przemian. To właśnie w takim szeregu, z uranu obecnego w skałach, powstaje między innymi radon (zob. pyt. 5).

Nie sposób przewidzieć, kiedy rozpadnie się jedno konkretne jądro – to zjawisko czysto losowe. Ale w wielkiej gromadzie jąder statystyka działa nieubłaganie i tempo rozpadu jest przewidywalne. Opisuje je czas (okres) połowicznego rozpadu: czas, po którym rozpadowi ulega połowa jąder danego izotopu. Po dwóch okresach zostaje ćwierć, po trzech – jedna ósma, a po dziesięciu – mniej niż jedna tysięczna pierwotnej liczby atomów (rys. 1.6).

Rozpiętość czasów połowicznego rozpadu jest ogromna (rys. 1.7): jod-131 ma okres 8 dni (kilka miesięcy po uwolnieniu praktycznie znika ze środowiska), radon-222 – niecałe 4 dni, cez-137 – 30 lat, węgiel-14 – 5,7 tysiąca lat

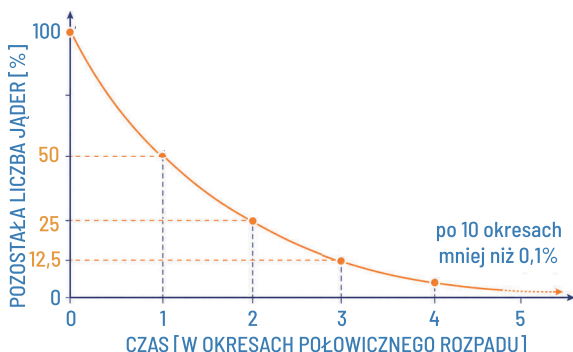
Promieniotwórczość odkrył w 1896 r. Henri Becquerel – przez przypadek. Spодiewał się, że sole uranu muszą najpierw pochłonąć światło słoneczne, aby cokolwiek wypromieniować. Gdy z powodu pochmurnej pogody schował je do szuflady razem z owiniętą kliszą, po wywołaniu okazało się, że i tak ją zaczerniły. Uran wysyłał więc promieniowanie zupełnie sam z siebie.

Samo słowo „promieniotwórczość” wprowadziła Maria Skłodowska-Curie. To ona wykazała, że jest to właściwość samych atomów, a nie skutek reakcji chemicznych – i że natężenie promieniowania zdradza obecność nowych, nieznanych pierwiastków. Tak trafiła na polon i rad. Za te prace otrzymała dwie Nagrody Nobla.



Maria Skłodowska-Curie

(dzięki czemu służy do datowania zabytków), a uran-238 – 4,5 miliarda lat, czyli mniej więcej tyle, ile istnieje Ziemia. Właśnie dlatego uran wciąż występuje w przyrodzie: po prostu nie zdążył się rozpaść.



RYS. 1.6 Krzywa rozpadu promieniotwórczego. Po każdym okresie połowicznego rozpadu ubywa połowa jąder. Po dziesięciu okresach pozostaje ich mniej niż jedna tysięczna.

I tu bardzo intuicyjna zasada, która przyda się przy rozmowie o odpadach promieniotwórczych (zob. pyt. 45): dla tej samej liczby jąder krótki okres połowicznego rozpadu oznacza intensywne promieniowanie, ale szybkie zanikanie. Długi okres – odwrotnie: izotop pozostaje w śródo-wisku bardzo długo, lecz promieniuje słabo, bo jego jądra rozpadają się rzadko. Intensywność emitowanego promieniowania zależy jednak także od ilości zawartego w próbce radionuklidu.

Miarą tego, jak intensywnie promieniuje dana próbka, jest jej aktywność promieniotwórcza, wyrażana w bekerelach. O niej – i o pozostałych jednostkach – opowiada następne pytanie.



RADON-222
3,8 DNIA



JOD-131
8 DNI



CEZ-137
30 LAT



WĘGIEL-14
5 700 LAT



URAN-238
4,5 MLD LAT

RYS. 1.7 Czasy połowicznego rozpadu bywają skrajnie różne: od ułamków sekund, kilku dni (jod-131, radon-222) po miliardy lat (uran-238).

JAKIE SĄ RODZAJE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO, CO JE ZATRZYMUJE I W JAKICH JEDNOSTKACH OPISUJE SIĘ DAWKI?

Promieniowanie nazywamy jonizującym wtedy, gdy nie-
sie dość energii, aby wybijać elektrony z atomów, czyli
je jonizować. To odróżnia je od fal radiowych, mikrofal czy
światła widzialnego: pojedynczy kwant takiego promie-
niowania nie ma energii wystarczającej do jonizacji, choć
przy dużym natężeniu może ogrzewać materię. Telefon
komórkowy, sieć Wi-Fi czy kuchenka mikrofalowa nie ma-
ją zatem nic wspólnego z promieniowaniem jonizującym,
o którym mowa w tej publikacji. Granicę między tym, co
jonizuje, a tym, co nie, najlepiej widać na widmie fal elek-
tromagnetycznych (rys. 1.8): przebiega ona w skrajnym
nadiolecie.

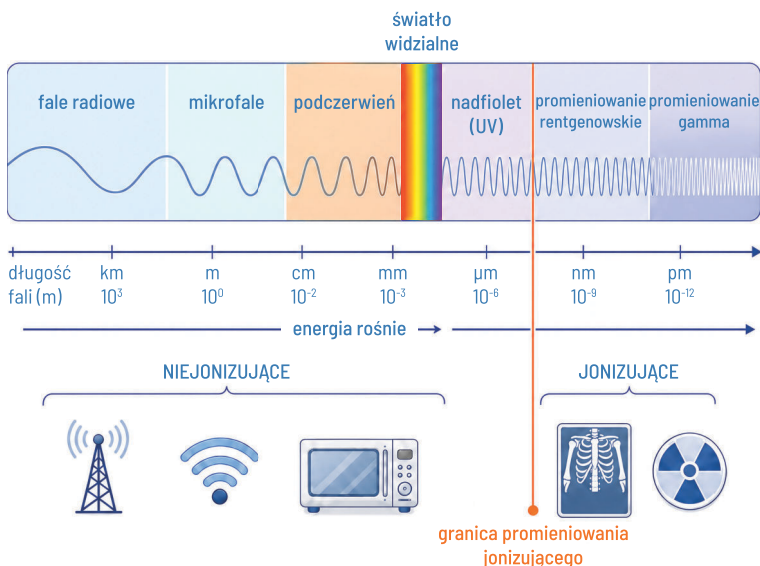
CIEKAWOSTKA

Cząstki alfa to po-
 prostu jądra helu.
Znaczna część he-
lu wydobywanego
dziś na Ziemi po-
chodzi z rozpadu
alfa uranu i toru,
zachodzącego głą-
boko w skorupie
ziemskiej. To ten
sam gaz, który
unoszą balony.

Promieniowanie alfa to dodatnio naładowane cząstki, bę-
dące jądrami helu. W powietrzu przebywają zaledwie kilka
centymetrów, zatrzymuje je kartka papieru, a nawet mar-
towy naskórek (rys. 1.9). Groźne staje się przede wszystkim
wtedy, gdy substancja emitująca cząstki alfa dostanie
się do wnętrza organizmu — po wdychaniu lub połknię-
ciu. Właśnie dlatego problemem jest alfa-promieniotwór-
czy gaz szlachetny radon, który dostaje się do płuc (zob.
pyt. 5).

Promieniowanie beta to strumień elektronów albo pozyto-
nów — cząstek znacznie lżejszych od cząstek alfa i zwykle
bardziej przenikliwych. W powietrzu mają zasięg kilku me-
trów, zatrzymuje je kilkumilimetrowa płytka aluminium
lub pleksi, a gruba odzież znacząco je osłabia.

Promieniowanie gamma i rentgenowskie to strumienie
fotonów o bardzo dużej energii. Są bardzo przenikliwe,
dlatego osłabiają je dopiero materiały o dużej gęstości:
ołów, stal, beton, ale także gruba warstwa wody. Osłona
nie „zatrzymuje” ich całkowicie — każda kolejna warstwa
osłabia strumień wielokrotnie. Dlatego wokół rdzenia re-
aktora stoją grube osłony ze stali i betonu, które redukują
promieniowanie do poziomów pomijalnych.



RYŚ. 1.8 Widmo fal elektromagnetycznych: od fal radiowych po promieniowanie gamma. Dopiero powyżej światła widzialnego, w tzw. skrajnym nadfiolecie, kwanty niosą dość energii, aby jonizować atomy – tu zaczyna się promieniowanie jonizujące.

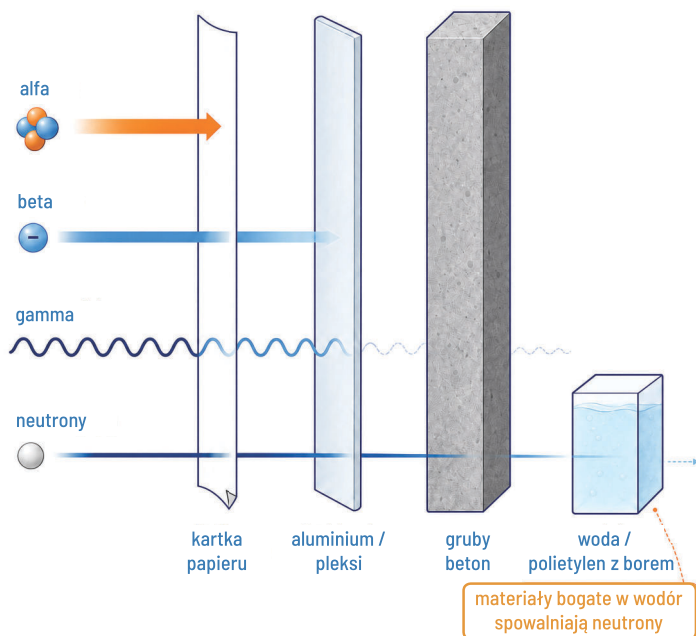
Promieniowanie neutronowe – strumień swobodnych neutronów – występuje w praktyce przede wszystkim w sąsiedztwie pracującego reaktora (ale także w generatorach neutronów, niektórych akceleratorach i specjalnych źródłach izotopowych). Najskuteczniej spowalniają je materiały bogate w wodór: woda, beton, parafina, a pochłania np. bor. W elektrowni tę rolę pełnią m.in. woda wokół rdzenia (borowana) i grube osłony betonowe.

Warto na moment zatrzymać się przy jednostkach, bo tu najłatwiej o nieporozumienie. Opisujemy nimi nie samo promieniowanie, lecz jego dawkę – oraz, osobno, aktywność źródła (rys. 1.10). Bekerel (Bq) mierzy aktywność źródła: ile jąder rozpada się w nim w ciągu sekundy (1 Bq = 1 przemiana na sekundę). To jednostka mała, dlatego w praktyce mówi się o kilo- i megabekerelach. Sama

CIĘKAWOSTKA

Jednostki promieniowania noszą nazwiska pionierów tej nauki:

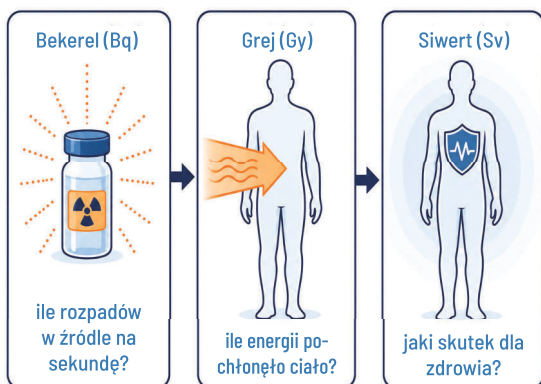
bekerel – Henriego Becquerela, grej – Louisa Graya, siwert – Rolf Sieverta.



RYS. 1.9 Przenikliwość promieniowania zależy od jego rodzaju i energii. Cząstki alfa zatrzymuje kartka papieru, beta – aluminium lub pleksi, gamma – gruba ośłona z ołowiu, stali albo betonu, a neutrony – osłony zawierające wodór i odpowiednie pochłaniacze.

aktywność nie mówi jeszcze nic o zagrożeniu: w ciele każdego z nas w każdej sekundzie zachodzi naturalnie kilka tysięcy przemian promieniotwórczych – głównie potasu-40 i węgla-14 – i jest to stan zupełnie normalny.

Sama aktywność wyrażona w bekerelach nie mówi jeszcze, jaką dawkę otrzymał człowiek. Do opisu oddziaływania promieniowania na ciało stosuje się trzy różne wielkości, używane również w ochronie radiologicznej w Polsce. Pierwszą z nich jest dawka pochłonięta, wyrażana w grejach (Gy). Określa ona, ile energii promieniowania pochłonął kilogram napromienionej materii – 1 Gy odpowiada 1 dżulowi na kilogram. Jest to wielkość czysto fizyczna: nie uwzględnia ani rodzaju promieniowania, ani wrażliwo-



RYS. 1.10 Bekerel opisuje aktywność promieniotwórczą źródła, grej – pochłoniętą energię, siwert – skutek dla zdrowia.

ści poszczególnych tkanek, dlatego sama nie wystarcza do oceny możliwych skutków zdrowotnych.

Kolejny krok to dawka równoważna, wyrażana już w siwertach (Sv). Powstaje ona z dawki pochłoniętej pomnożonej przez współczynnik zależny od rodzaju promieniowania: dla promieniowania gamma, rentgenowskiego i beta wynosi on 1, ale dla cząstek alfa aż 20, bo przy tej samej energii sięją one w tkance znacznie większe spustoszenie. Dawkę równoważną odnosi się do konkretnego narządu lub tkanki.

Wielkością, którą posługujemy się na co dzień, jest wreszcie dawka skuteczna (dawniej zwana efektywną) – także w siwertach. Uwzględnia ona, że poszczególne narządy różnią się wrażliwością na promieniowanie, i sumuje dawki równoważne otrzymane przez całe ciało z odpowiednimi wagami. To właśnie w dawce skutecznej wyznacza się limity i porównuje narażenie ludzi. Ponieważ jeden siwert to dawka bardzo duża, w praktyce operujemy jego tysięcznymi (milisiwert, mSv) i milionowymi (mikrosiwert, μ Sv) częściami.

Kilka wartości dla wyczucia skali: zdjęcie rentgenowskie klatki piersiowej to ok. 0,1 mSv, lot przez Atlantyk – kilka setnych milisiwerta, tomografia komputerowa – od kilku do kilkunastu mSv, średnia roczna dawka mieszkańca Pol-

WARTO WIEDZIEĆ

Nasze zmysły nie wykrywają promieniowania jonizującego – nie ma ono zapachu, barwy ani smaku.

Właśnie dlatego posługujemy się przyrządami: od kieszonkowego dozymetru po stacje monitoringu radiacyjnego rozstawione w całym kraju.

ZAPAMIĘTAJ!

Tej samej dawki otrzymanej jednorazowo i rozłożonej na wiele miesięcy nie należy porównywać wprost. Przy normalnym napromieniowaniu organizm ma więcej czasu na naprawę części uszkodzeń.

ski ze wszystkich źródeł – ok. 5,26 mSv według informacji Państwowej Agencji Atomistyki za 2025 r. (zob. pyt. 5). Prawo wyznacza przy tym wyraźne granice: dodatkowa dawka dla osoby z ogółu ludności, pochodząca z działalności człowieka (poza medycyną i tłem naturalnym), nie może przekroczyć 1 mSv rocznie, a dla pracowników narażonych zawodowo – 20 mSv rocznie.

Na koniec przestroga przed częstym nieporozumieniem. Media chętnie podają aktywności w bekerelach, bo liczby wyglądają groźnie – miliony, miliardy! Tymczasem o skutkach zdrowotnych mówi dopiero dawka wyrażona w siwertach, a droga od aktywności do dawki jest daleka: liczy się rodzaj izotopu i promieniowania, odległość, czas narażenia i droga проникnięcia do organizmu.

5

PROMIENIOWANIE NATURALNE TOWARZYSZY NAM OD ZAWSZE – SKĄD POCHODZI I ILE WYNOŚI W POLSCE?

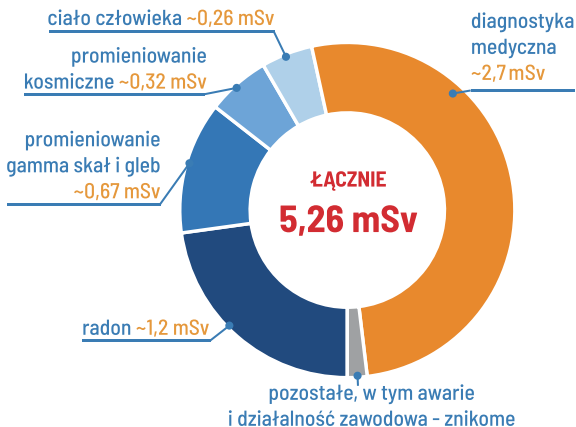
CIEKAWOSTKA

W popularnym przeliczeniu zjedzenie banana odpowiada dawce ok. 0,1 μ Sv od naturalnego potasu-40. To dawka całkowicie pomijalna, ale na tyle konkretna, że „banan” bywa żartobliwie używany jako jednostka porównawcza.



Naturalne promieniowanie dociera do nas czterema drogami. Pierwszą jest radon: promieniotwórczy gaz szlachetny, który powstaje w gruncie z rozpadu naturalnego uranu i przenika do budynków – zwłaszcza do piwnic i na partery – skąd wdychamy go (oraz produkty jego rozpadu) z powietrzem. To największy pojedynczy składnik naturalnego narażenia: średnio ok. 1,2 mSv rocznie, a jego stężenie promieniotwórcze zależy przede wszystkim od lokalnej geologii, konstrukcji budynku i wentylacji pomieszczeń. Drugą drogą jest promieniowanie gamma skał i gleby – pochodzące od potasu-40 oraz uranu i toru obecnych w skorupie ziemskiej, a także w materiałach budowlanych. Trzecią – promieniowanie kosmiczne, które rośnie z wysokością: więcej otrzymują go mieszkańcy gór i osoby często latające samolotami. Czwartą stanowią źródła wewnętrzne: naturalne izotopy promieniotwórcze zawarte w żywności i w naszych własnych ciałach.

Ile to razem (rys. 1.11)? Według raportu rocznego Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki statystyczny mieszkaniec Polski otrzymał w 2025 r. dawkę 5,26 mSv, z czego



RYS. 1.11 Roczna dawka statystycznego Polaka (ok. 5,26 mSv wg danych za 2025 r.): połowa ze źródeł naturalnych (z dominującym radonem), niemal reszta z diagnostyki medycznej. Źródło: Raport Prezesa PAA.

ok. 2,55 mSv ze źródeł naturalnych, a ok. 2,70 mSv z diagnostyki medycznej – przede wszystkim tomografii komputerowej i badań rentgenowskich. Wszystkie pozostałe źródła sztuczne – przemysł, obiekty jądrowe i opad po awarii czarnobylskiej – odpowiadają łącznie za tysięczne części milisiwerta rocznie.

Tło naturalne nie jest przy tym wszędzie takie samo. W Polsce różni się regionalnie – na południu kraju, gdzie w podłożu jest więcej skał krystalicznych, jest wyższe niż na nizinach i wybrzeżu. Na świecie istnieją zamieszkane od pokoleń obszary o tle wielokrotnie przewyższającym polskie – jak Ramsar w Iranie, Kerala w Indiach czy Guarapari w Brazylii – a dotychczasowe badania nie dają prostego, jednoznacznego obrazu skutków zdrowotnych takich ekspozycji.

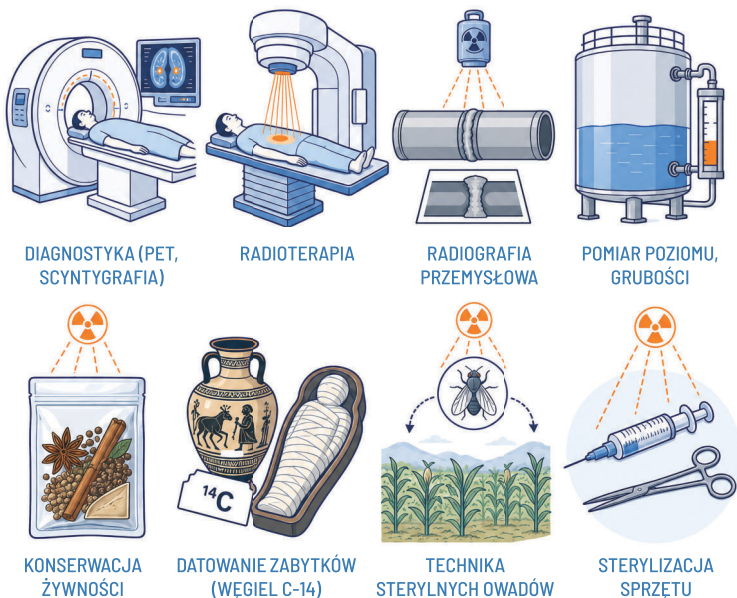
Puenta tytułowego pytania jest kluczem do całej publikacji: sensowne pytanie o promieniowanie jonizujące nie brzmi „czy ono występuje”, lecz „ile go jest”. Naturalne tło promieniowania stanowi punkt odniesienia dla wszystkiego, o czym będzie mowa dalej – a dawki, jakie normalna praca elektrowni jądrowej dokłada jej najbliższemu sąsiedom, są setki razy mniejsze od tego, co każdy z nas i tak otrzymuje od natury (zob. pyt. 35 i 51).

WARTO WIEDZIEĆ

Latanie samolotem oznacza wyższe promieniowanie kosmiczne: na wysokości przełotowej jest go kilkadziesiąt razy więcej niż na poziomie morza. Dlatego personel pokładowy zalicza się w wielu krajach do osób narażonych zawodowo i podlega kontroli dawek.

GDZIE POZA ENERGETYKĄ KORZYSTAMY Z PROMIENIOWANIA – MEDYCyna, PRZEMYSŁ, NAUKA, ŻYWNOSĆ?

Promieniowanie jonizujące najczęściej stosowane jest w medycynie (rys. 1.12). Diagnostyka obrazowa — od zdjęcia u dentysty po tomografię komputerową — wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie. Medycyna nuklearna idzie o krok dalej: pacjent otrzymuje śladową ilość izotopu promieniotwórczego, a specjalna kamera pokazuje jego rozmieszczenie w organizmie (scyntygrafia, badanie PET). Dzięki temu lekarz widzi nie tylko kształt narządu, ale i to, jak on pracuje (rys. 1.13). Izotop promieniotwórczy technet-99m jest stosowany w ok. 80% diagnostycznych badań medycyny nuklearnej — na świecie wykonuje się z je-



RYŚ. 1.12 Promieniowanie pracuje dla nas na co dzień: w diagnostyce i leczeniu, w kontroli jakości przemysłu, w datowaniu zabytków, w ochronie upraw i sterylizacji sprzętu.

go użyciem kilkadziesiąt milionów badań rocznie. Promieniowanie jonizujące stosuje się także do leczenia: precyzyjnie niszczy komórki nowotworowe wiązkami z zewnątrz lub źródłami umieszczanymi wprost w guzie (brachyterapia). Wreszcie – to właśnie promieniowaniem sterylizuje się masowo jednorazowy sprzęt medyczny: strzykawki, opatrunki, implanty.

W przemyśle promieniowanie jonizujące pracuje po cichu od dziesięcioleci. Radiografia przemysłowa to nic innego jak „prześwietlanie” spoin rurociągów, mostów czy elementów samolotów – dokładnie tak, jak przeświecła się złamaną rękę. Mierniki izotopowe bezdotykowo kontrolują poziom cieczy w zamkniętych zbiornikach oraz gęstość i grubość papieru, folii czy blachy na liniach produkcyjnych. Znaczniki promieniotwórcze pozwalają wykrywać nieszczelności instalacji.

Nauka i kultura zawdzięczają technikom jądrowym jedno ze swych najważniejszych narzędzi. Datowanie radiowęglowe – oparte na rozpadzie węgla-14 – pozwala określić wiek zabytków, mumii czy osadów. Znaczniki izotopowe służą biologom i hydrologom, na przykład do badania, skąd i jak szybko płynie woda podziemna zasilająca ujęcia wody pitnej.

Nie można pominąć też zastosowania w przemyśle spożywczym i rolnictwie. Radiacyjne utrwalanie żywności – w Unii Europejskiej stosowane m.in. do przypraw – niszczy drobnoustroje bez istotnego podgrzewania produktu, bez dodawania chemicznych konserwantów i bez uczynienia żywności promieniotwórczą. Technika sterylnych owadów, polegająca na wypuszczaniu wysterylizowanych promieniowaniem samców, pozwala zwalczać groźne szkodniki bez użycia pestycydów. Napromienianie nasion od dekad służy hodowli nowych odmian roślin uprawnych.

Polska ma w tym wszystkim swój udział: Ośrodek Radioizotopów POLATOM w Świerku wysyła radiofarmaceutyki do kilkadziesiątu krajów, a instalacje sterylizacji radiacyjnej działają m.in. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Warto zapamiętać puentę: wszystkie te

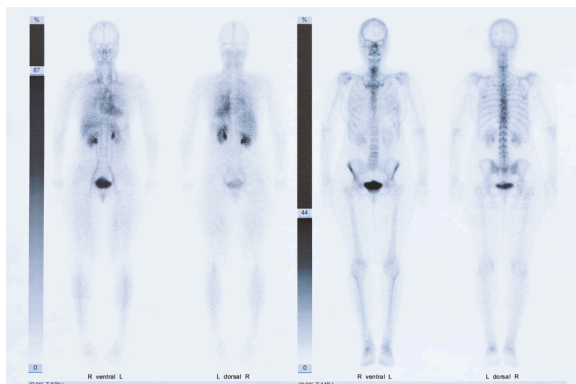
WARTO WIEDZIEĆ

Napromienianiem utrwała się m.in. przyprawy oraz żywność dla astronautów i pacjentów o obniżonej odporności. Produkt przeświecła się wiązką, która niszczy bakterie i pleśnie, ale – inaczej niż gotowanie – nie podgrzewa go ani nie zmienia smaku. Co ważne, żywność nie staje się przez to promieniotwórczą! W Unii Europejskiej taki produkt musi być wyraźnie opisany jako napromieniony lub poddany działaniu promieniowania jonizującego. Dodatkowo może być zastosowany symbol Radura.



Symbol Radura

RYS. 1.13 Badanie medycyny nuklearnej pozwala zobaczyć, jak pracują narządy pacjenta.



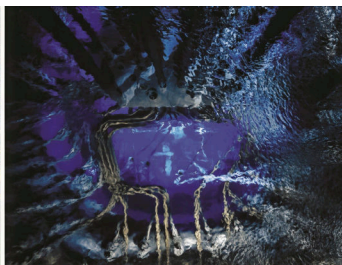
zastosowania rządzą się dokładnie tą samą fizyką i tymi samymi zasadami ochrony radiologicznej co energetyka jądrowa. Wiedza z tej publikacji przyda się więc nie tylko w rozmowie o elektrowni jądrowej.

7

JAKIE DOŚWIADCZENIA Z TECHNOLOGIAMI JĄDROWYMI MA POLSKA?

Polska przygoda z atomem zaczęła się w 1955 r., wraz z powołaniem Instytutu Badań Jądrowych i budową ośrodka w Świerku pod Otwockiem (rys. 1.15). Już w 1958 r. uruchomiono tam pierwszy w Polsce reaktor badawczy EWA, który pracował do 1995 r. — a następnie usunięto z niego paliwo i przeprowadzono zasadnicze etapy likwidacji zgodnie z wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej, co samo w sobie stanowi cenne doświadczenie (o likwidacji obiektów jądrowych piszemy w pyt. 61).

W latach 60. i 70. w Instytucie Badań Jądrowych uruchomiono cztery zestawy krytyczne — ANNA, MARYLA, AGATA i P-ANNA — oraz jeden zestaw podkrytyczny, HELENA. To reaktory mocy zerowej: pracują na znikomej mocy, w temperaturze niemal pokojowej, i służą wyłącznie do



rys. 1.14 Reaktor badawczy MARIA w Świerku — polski atom pracuje bezpiecznie od 1974 r. Niebieska poświata w rdzeniu reaktora to promieniowanie Czerenkowa.

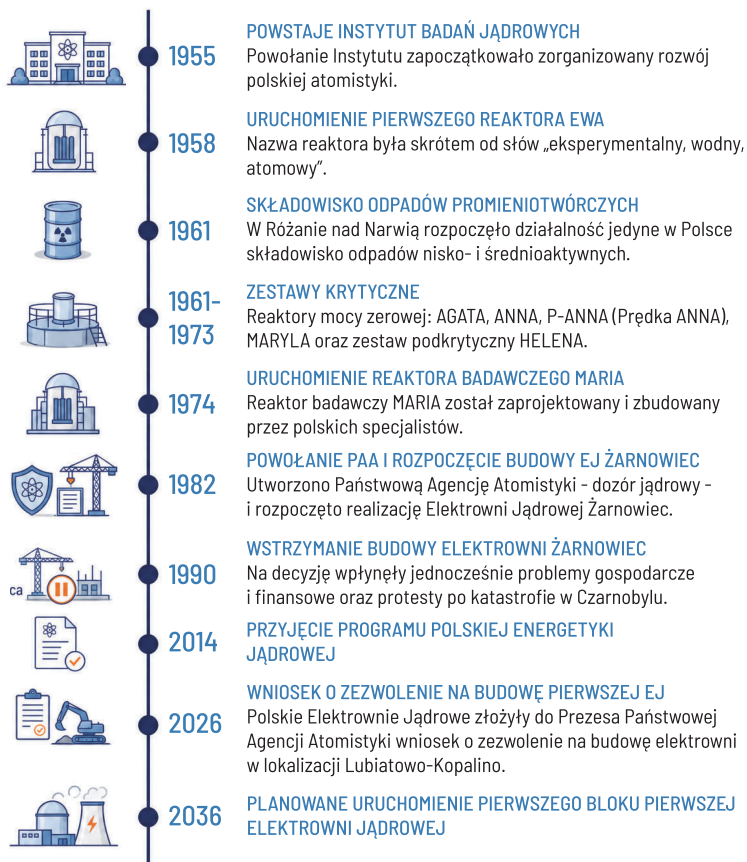
badan fizyki reaktorowej. Na zestawie AGATA sprawdzano rozwiązania i zbierano dane, które pozwoliły później zaprojektować i bezpiecznie zbudować reaktor badawczy MARIA. Był to kluczowy etap dochodzenia do własnego reaktora, choć wzorowanego na radzieckim reaktorze MR.

Reaktor badawczy MARIA pracuje w Świerku od grudnia 1974 r. — nazwany na cześć Marii Skłodowskiej-Curie — o mocy cieplnej 30 MW, jeden z większych reaktorów badawczych w Europie (rys. 1.14). MARIA nie produkuje energii elektrycznej: służy do badań materiałowych, badań naukowych, a przede wszystkim do napromieniania materiałów tarczowych, z których powstają radioizotopy dla medycyny. W przeszłości udział MARII w światowych dostawach molibdenu-99/technetu-99m sięgał kilkunastu procent. Molibden-99 jest izotopem, z którego w szpitalach na bieżąco uzyskuje się technet-99m, podstawowe narzędzie diagnostyki medycyny nuklearnej (zob. pyt. 6).

Mamy też praktyczne doświadczenie w gospodarce odpadami: od 1961 r. w Różanie nad Narwią działa Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, przyjmujące odpady z medycyny, przemysłu i nauki. Ponad sześćdziesiąt lat jego bezpiecznej eksploatacji to praktyczna lekcja tego, o czym szerzej piszemy w pytaniu 42. Nad całością od 1982 r. czuwa Państwowa Agencja Atomistyki — polski dozór jądrowy, który licencjonuje i kontroluje obiekty jądrowe oraz prowadzi całodobowy monitoring radiacyjny kraju (zob. pyt. 26 i 39).

CZY WIESZ, ŻE...

W Instytucie Badań Jądrowych przyjęła się nieformalna zasada, że reaktory noszą imiona kobiece (EWA, MARIA, a wśród zestawów krytycznych ANNA, MARYLA, AGATA), a akceleratorzy — męskie. Akcelerator LECH upamiętnia jego konstruktora Lecha Bobrowskiego, a ANDRZEJ — profesora Andrzeja Sołtana, pierwszego dyrektora instytutu.



RYŚ. 1.15 Blisko siedem dekad polskich doświadczeń jądrowych – od pierwszego instytutu i reaktora, przez składowisko i reaktor MARIA, po obecny projekt budowy pierwszej elektrowni jądrowej.

Osobny rozdział tej historii to Żarnowiec. Budowę pierwszej polskiej elektrowni jądrowej – czterech bloków z reaktorami WWR-440 – rozpoczęto w 1982 r. nad Jeziorem Żarnowieckim. W 1990 r., w cieniu Czarnobyla, protestów społecznych i gospodarczej zapaści okresu transformacji, budowę przerwano. Była to przede wszystkim decyzja

polityczno-ekonomiczna, a nie skutek wykazania technicznej niemożliwości realizacji projektu. Pozostały po niej wyszkolone kadry – wielu inżynierów Żarnowca przez kolejne dekady pracowało przy elektrowniach jądrowych na całym świecie – oraz doświadczenie prowadzenia wielkiego jądrowego procesu inwestycyjnego.

Dziś na ten dorobek składają się: Narodowe Centrum Badań Jądrowych – jeden z największych instytutów badawczych w kraju, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, uczelnie kształcące inżynierów jądrowych oraz polskie firmy obecne już dziś w łańcuchach dostaw elektrowni jądrowych budowanych za granicą. Równolegle w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino prowadzone są prace przygotowawcze do pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, a w 2026 r. złożono w PAA wniosek o zezwolenie na budowę obiektu jądrowego. Wniosek dla czytelnika: polski program jądrowy nie startuje od zera. Kultura bezpieczeństwa, dozór jądrowy, gospodarka odpadami i codzienna, odpowiedzialna praca z promieniowaniem – to wszystko jest w Polsce praktykowane od dziesięcioleci.

Żarnowiec – elektrownia, której nie dokończono

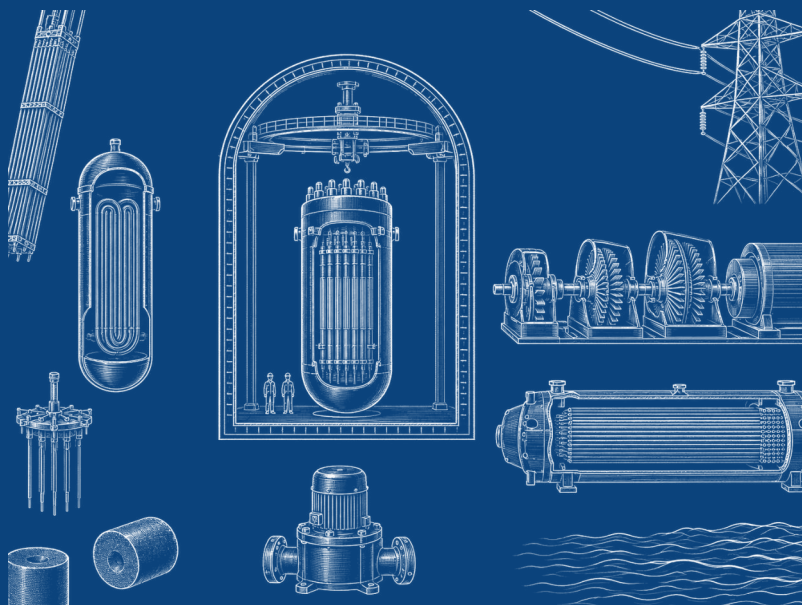
Budowę czterech bloków z reaktorami WWER-440 nad Jeziorem Żarnowieckim rozpoczęto w 1982 r., w miejscu wysiedlonej wsi Kartoszyño. W szczycie pracowało tam około 6 tysięcy osób, powstało ponad 630 obiektów, a znaczną część wyposażenia wykonał polski przemysł. Do 1990 r. budynek reaktorów był zaawansowany w około 40%, zaplecze budowy – niemal w całości, a zbiornik reaktora i cztery

wytwornice pary czekały już na placu.

Po Czarnobylu narosły protesty. W niewiążącym referendum z maja 1990 r. ponad 86% głosujących opowiedziało się przeciw, a we wrześniu rząd zdecydował o zaniechaniu budowy, wskazując na zbędność elektrowni dla bilansu energetycznego i wątpliwą rentowność. Wyszkoleni tam inżynierowie przez kolejne dekady pracowali przy elektrowniach jądrowych na całym świecie.



Niedokończona Elektrownia Jądrowa Żarnowiec



jak działa elektrownia jądrowa

JAK ELEKTROWNIA JĄDROWA WYTWARZA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ – OD ROZSZCZEPIENIA W RDZENIU DO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ?

8

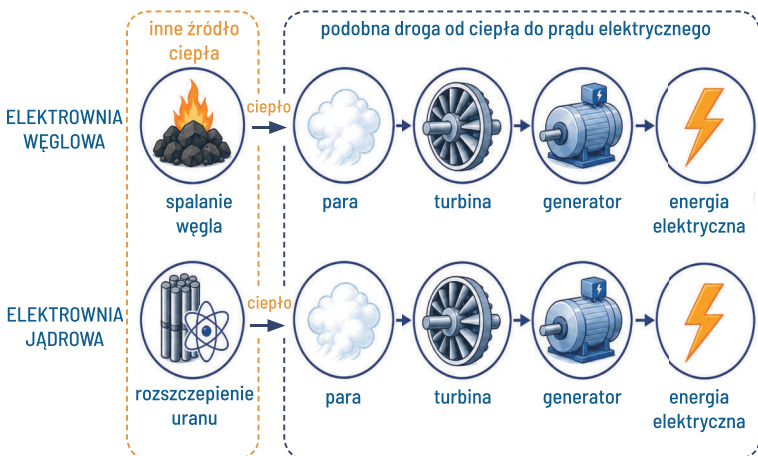
Najprostsza intuicja jest trafna: elektrownia jądrowa wytwarza energię elektryczną według tej samej ogólnej zasady co klasyczna elektrownia parowa, na przykład węglowa – przez wytworzenie pary i napędzenie nią turbiny połączonej z generatorem (rys. 2.1). Różni się źródło ciepła. W elektrowni węglowej paliwo spala się w kotle, a w jądrowej ciepło powstaje w rdzeniu reaktora podczas rozszczepienia jąder uranu (zob. pyt. 2). Dalsza przemiana ciepła w energię mechaniczną, a następnie elektryczną, odbywa się za pomocą dobrze znanych rozwiązań stosowanych w elektrowniach parowych.

Krok po kroku

W najpopularniejszym reaktorze – wodnym ciśnieniowym (ang. Pressurized Water Reactor, PWR) – ciepło dociera do turbiny przez dwa oddzielne obiegi robocze: pierwotny i wtórny (rys. 2.2). Wody tych obiegów nie mieszają się ze

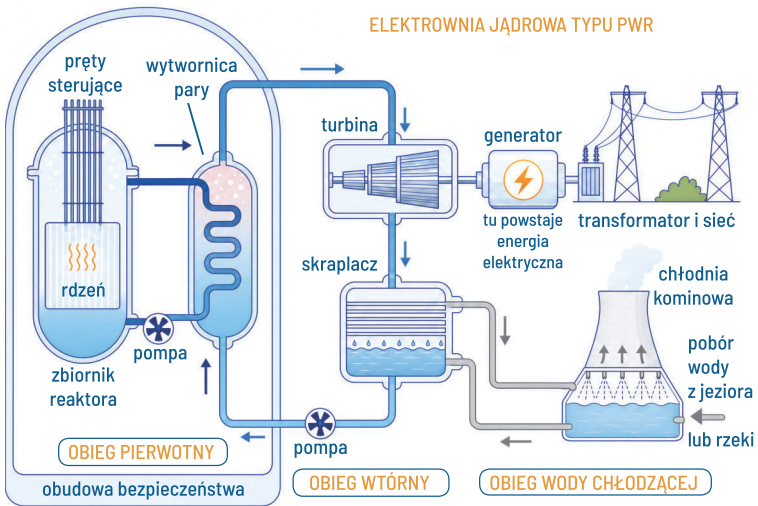
CZY WIESZ, ŻE...

Pierwszy prąd z atomu zapalił zaledwie cztery żarówki – 20 grudnia 1951 r., w amerykańskim reaktorze doświadczalnym EBR-I na pustyni w Idaho. Dzień później reaktor zasilał już cały budynek.



RYŚ. 2.1 Elektrownia węglowa i jądrowa wykorzystują podobny łańcuch przemian: ciepło › para › turbina › generator. Różni je przede wszystkim sposób wytwarzania ciepła.

ELEKTROWNIA JĄDROWA TYPU PWR



RYŚ. 2.2 Droga energii w elektrowni jądrowej: rdzeń podgrzewa wodę obiegu pierwotnego, ta oddaje ciepło w wytwornicy wodzie obiegu wtórnego, która zamienia się w parę, para napędza turbinę z generatorem, a trzeci obieg odprowadza ciepło odpadowe.

WARTO WIEDZIEĆ

Białe kłęby nad chłodnią kominową to nie dym, lecz skroplona para wodna z układu chłodzenia – wody, która nie ma kontaktu z reaktorem. Identyczne chłodnie pracują przy wielu elektrowniach węglowych i gazowych.

sobą: energia przechodzi przez metalowe ścianki rurek w wytwornicy pary. Takie rozdzielanie stanowi dodatkową barierę dla substancji promieniotwórczych i podczas normalnej pracy praktycznie eliminuje ich przenikanie do części turbinowej. Inne typy reaktorów prowadzą parę nieco inaczej (zob. pyt. 9), ale ogólna zasada przemiany ciepła w energię elektryczną pozostaje ta sama.

Obieg pierwotny obejmuje zbiornik reaktora, rurociągi, pompy i wytwornice pary. Woda przepływająca przez rdzeń odbiera ciepło z paliwa. Panuje w niej bardzo wysokie ciśnienie – około 155 barów – dzięki czemu nie wrze mimo temperatury dochodzącej na wylocie z rdzenia do około 330°C. Gorąca woda płynie do wytwornicy pary, gdzie przez ścianki tysięcy rurek oddaje ciepło wodzie obiegu wtórnego, po czym wraca do reaktora. Podczas pracy chłodziwo pierwotne zawiera między innymi produkty aktywacji (krótkożyciowy azot-16 i tryt) i jest traktowane jako promieniotwórcze. Dlatego pozostaje

w szczelnym, kontrolowanym układzie, którego główne elementy znajdują się w obudowie bezpieczeństwa (zob. pyt. 19).

Obieg wtórny pracuje przy niższym ciśnieniu, dlatego woda po odebraniu ciepła w wytwornicy pary wrze i zamienia się w parę. Para napędza turbinę połączoną z generatorem (rys. 2.3) – i właśnie w generatorze powstaje energia elektryczna. Za turbiną para trafia do skraplacza, oddaje ciepło i wraca do postaci wody, która ponownie płynie do wytwornicy pary. Podczas normalnej pracy, przy szczelnych rurkach wytwornicy pary, para obiegu wtórnego nie ma kontaktu z chłodziwem reaktora i nie jest promieniotwórcza.

Nie całe ciepło można zamienić na energię elektryczną. W typowym bloku PWR sprawność netto wynosi zwykle około 32–37%, zależnie od projektu i warunków pracy. Pozostałe ciepło trzeba odprowadzić. Służy do tego układ chłodzenia skraplacza. Może on pobierać wodę z morza, rzeki lub jeziora i odprowadzać ją z powrotem, albo pracować w obiegu zamkniętym z chłodziwą kominową. Woda chłodząca nie miesza się ani z wodą obiegu pierwotnego, ani z wodą obiegu wtórnego. Wyprodukowana energia elektryczna trafia z generatora przez transformator do sieci – i dalej do odbiorców.

ZAPAMIĘTAJ!

Woda trzech układów elektrowni – obiegu pierwotnego, obiegu wtórnego i wody chłodzącej skraplacza – nigdzie się ze sobą nie miesza. Ciepło przechodzi wyłącznie przez metalowe ścianki wymienników, co ogranicza możliwość przeniesienia substancji promieniotwórczych poza obieg reaktora.



RYS. 2.3

Turbozespół – turbina i generator – to serce konwencjonalnej części elektrowni jądrowej.

JAK ZBUDOWANE SĄ NAJCZĘŚCIEJ SPOTYKANE TYPY REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH – PWR, BWR I CANDU?

CZY WIESZ, ŻE...

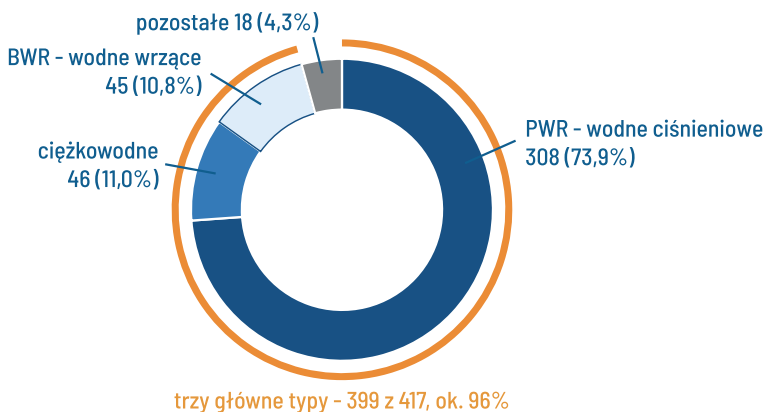
Technologię PWR rozwijano początkowo na potrzeby napędu okrętów podwodnych.

USS Nautilus – pierwszy okręt podwodny o napędzie jądrowym – wyruszył w 1955 r. z historycznym meldunkiem: „płyniemy na napędzie jądrowym”.

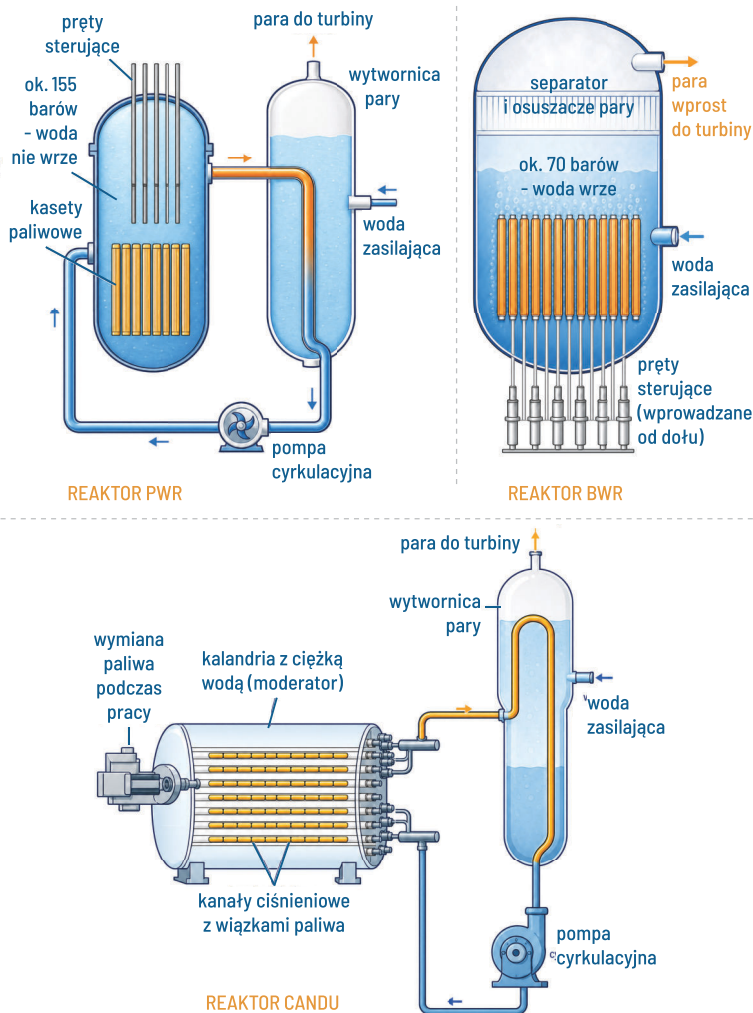
Mimo różnic konstrukcyjnych wszystkie trzy typy realizują ten sam łańcuch przemian opisany w pytaniu 8: rozszczepienie wytwarza ciepło, ciepło zamienia wodę w parę, a para napędza turbozespół. Wspólne są także podstawowe elementy rdzenia: ceramiczne pastylki paliwa zamknięte w szczelnych metalowych koszulkach i zestawione w kasety lub wiązki (zob. pyt. 14) oraz pręty sterujące i pozostałe układy regulacji (zob. pyt. 10). Różnice zaczynają się tam, gdzie projektanci decydują, w jaki sposób woda odbiera ciepło z paliwa i gdzie powstaje para (rys. 2.5).

Reaktor wodny ciśnieniowy (ang. Pressurized Water Reactor, PWR) jest najliczniejszym typem na świecie. Rdzeń – zależnie od projektu około 150–200 kaset paliwowych – jest zanurzony w zwykłej wodzie i zamknięty w grubościennym stalowym zbiorniku ciśnieniowym, którego ścia-

TYPY REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH W EKSPLOATACJI NA ŚWIECIE



RYŚ. 2.4 Reaktory PWR, ciężkowodne i BWR stanowią łącznie około 96% światowej floty reaktorów energetycznych. Źródło: MAEA PRIS, stan na lipiec 2026 r.



RYŚ. 2.5 Trzy najpopularniejsze typy reaktorów energetycznych. W PWR para powstaje w wytwornicy poza reaktorem, w BWR – bezpośrednio w zbiorniku nad rdzeniem, a w CANDU paliwo znajduje się w setkach poziomych kanałach ciśnieniowych z przepływającą ciężką wodą – podobnie jak w PWR, para powstaje w wytwornicy pary.

WARTO WIEDZIEĆ

Woda w reaktorze PWR pracuje pod ciśnieniem ok. 155 barów — ponad 150 razy większym niż ciśnienie atmosferyczne — dzięki czemu nie wrze mimo temperatury przekraczającej 300°C.

CIĘKAWOSTKA

Nazwa CANDU to skrót od CANada Deuterium Uranium — wskazuje na kanadyjskie pochodzenie konstrukcji, zastosowanie ciężkiej wody zawierającej deuter oraz paliwa z uranu naturalnego. W naturalnej wodzie na około 6400 atomów zwykłego wodoru przypada jeden atom deuteru. Ciężką wodę otrzymuje się przez wielostopniowe zwiększanie zawartości tego izotopu wodoru.

ny w części cylindrycznej mają zwykle od kilkunastu do ponad 20 centymetrów grubości. Woda pozostaje pod ciśnieniem około 155 barów, dzięki czemu nie wrze mimo temperatury przekraczającej 300°C, a para powstaje dopiero w wytwornicach pary (jest ich zwykle od 2 do 4), poza zbiornikiem reaktora. Turbinę napędza para obiegu wtórnego, oddzielonego od chłodziwa rdzenia (zob. pyt. 8). Pręty sterujące wprowadzane są od góry. Technologia PWR wywodzi się z programu napędu okrętów podwodnych z lat 50. XX wieku. Pierwszy pełnoskalowy energetyczny blok tego typu — amerykański Shippingport — rozpoczął pracę w 1957 r. Od tego czasu zbudowano więcej reaktorów PWR niż jakiegokolwiek innego typu, dzięki czemu zgromadzono ogromny zasób doświadczeń eksploatacyjnych i badań materiałowych (rys. 2.4).

Reaktor wodny wrzący (ang. Boiling Water Reactor, BWR) upraszcza ten układ: woda wrze bezpośrednio w zbiorniku reaktora, a powstała para — po oddzieleniu kropeł wody w separatorach i osuszaczach, zajmujących górną część zbiornika — płynie wprost do turbiny. Nie ma tu wytwornic pary ani wydzielonego obiegu wtórnego, a ciśnienie pracy jest niższe, około 70 barów. Ceną za prostszy obieg jest to, że turbinę zasila para pochodząca bezpośrednio z reaktora, dlatego część turbinowa podlega podczas pracy kontroli radiologicznej. Jej aktywność pochodzi głównie od azotu-16 o czasie połowicznego rozpadu około 7 sekund i zanika w ciągu minut po wyłączeniu. Ponieważ górę zbiornika zajmują separatory i osuszacze, pręty sterujące wprowadza się w BWR od dołu. Reaktory tego typu pracują między innymi w Stanach Zjednoczonych, Japonii, Szwecji, Finlandii i Szwajcarii.

Reaktor ciężkowodny CANDU (ang. CANada Deuterium Uranium), rozwinięty w Kanadzie, różni się od obu poprzednich najbardziej. Zamiast jednego wielkiego zbiornika ciśnieniowego ma kilkaset poziomych kanałów ciśnieniowych — rur mieszczących krótkie wiązki paliwowe, przez które przepływa ciężka woda, pełniąca rolę chłodziwa. Kanały przechodzą przez duży zbiornik zwany kalandrią, wypełniony chłodną ciężką wodą pełniącą rolę moderatora. Ciężka woda pochłania znacznie mniej neutronów

niż zwykła, dzięki czemu CANDU może pracować na uranie naturalnym, bez wzbogacania (zob. pyt. 14). Konstrukcja kanałowa umożliwia ponadto wymianę paliwa podczas pracy: zdalnie sterowane maszyny przeładunkowe podłączają się do poszczególnych kanałów i wymieniają wiązki bez wyłączania bloku. Parę dla turbiny – podobnie jak w PWR – wytwarzają wytwornice pary. Reaktory CANDU i ich pochodne pracują między innymi w Kanadzie, Korei Południowej, Rumunii, Argentynie, Chinach i Indiach.

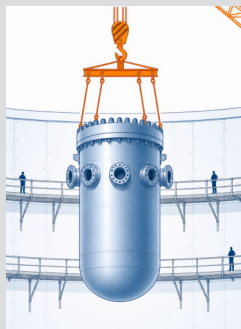
Żaden z tych typów nie jest z definicji „lepszy” od pozostałych. Każdy ma za sobą dziesięciolecie eksploatacji, rozwinięte zaplecze badawcze i współczesne wersje projektowe, a każdy nowo budowany blok – niezależnie od typu – musi spełnić te same cele bezpieczeństwa stawiane przez dozór jądrowy (zob. pyt. 18 i 26). O wyborze konkretnej technologii przesądzają względy ekonomiczne, łańcuch dostaw, strategia paliwowa i doświadczenia danego kraju. Polska przygotowuje budowę pierwszej elektrowni w technologii PWR (zob. pyt. 11), a o technologii kolejnych elektrowni zdecydują odrębne postępowania.

ZAPAMIĘTAJ!

PWR, BWR i CANDU różnią się drogą pary i budową rdzenia, ale realizują ten sam łańcuch przemian: rozszczepienie > ciepło > para > turbina > generator. Każdy nowo budowany blok, niezależnie od typu, musi spełnić te same cele bezpieczeństwa wyznaczone przez dozór jądrowy.

Zbiornik ciśnieniowy dużego reaktora energetycznego ma około 12 metrów wysokości i – zależnie od projektu – waży od trzystu do ponad pięciuset ton. Jego transport i ustawienie należą do najbardziej widowiskowych etapów budowy elektrowni. Najgrubsze pierścienie kuje się z jednego kawałka stali, bez spoin – każda spoina byłaby bowiem miejscem, które trzeba kontrolować przez całe dziesięciolecie pracy bloku.

Pras zdolnych do takiej operacji jest na świecie zaledwie kilka, a terminy w nich rezerwuje się z wieloletnim wyprzedzeniem. Gotowy zbiornik trafia na plac budowy statkiem i specjalnym wagonem kolejowym, po czym olbrzymi dźwig opuszcza go do wnętrza budynku przez jeszcze nieprzykryty dach. Obudowę bezpieczeństwa zamyka się dopiero nad nim – i to jest jedna z przyczyn, dla których zbiornik praktycznie nie da się później wymienić.

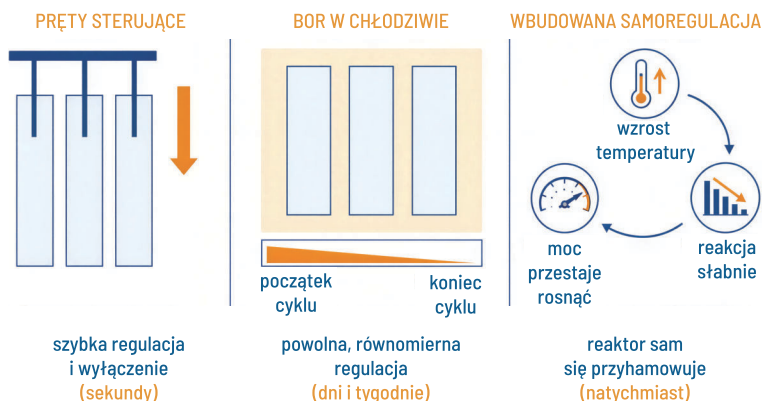


Ustawianie zbiornika reaktora to jeden z najbardziej widowiskowych momentów budowy

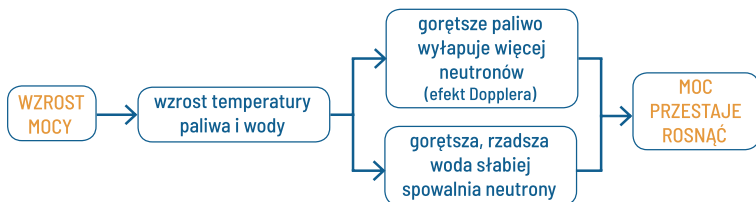
JAK KONTROLUJE SIĘ REAKCJĘ ROZSZCZEPIENIA?

Przypomnijmy z pytania 2: reaktor pracuje na stałej mocy wtedy, gdy z każdego rozszczepienia średnio dokładnie jeden neutron wywołuje kolejne rozszczepienie. Ten bilans neutronów fizycy opisują jedną liczbą – reaktywnością. Reaktywność równa zero oznacza, że reakcja dokładnie się podtrzymuje i moc jest stała. Reaktywność dodatnia – że neutronów z pokolenia na pokolenie przybywa i moc rośnie. Ujemna – że neutronów ubywa i moc maleje. Sterowanie reaktorem to utrzymywanie reaktywności równej zero podczas normalnej pracy, delikatnie dodatniej wartości reaktywności podczas podnoszenia mocy reaktora, a zdecydowanie ujemnej, gdy reaktor trzeba szybko wyłączyć. W PWR służą do tego trzy mechanizmy (rys. 2.6), wspierane przez automatykę zabezpieczeń.

1. Pręty sterujące. Wykonuje się je z materiałów silnie pochłaniających neutrony, na przykład węgliku boru, stopu srebro-ind-kadm albo hafnu. Wsuwanie prętów do rdze-



RYŚ. 2.6 Moc reaktora kontrolują współdziałające mechanizmy: pręty sterujące, bor w chłodziwie i wbudowana samoregulacja. Automatyka zabezpieczeń może w każdej chwili szybko wyłączyć reaktor.



RYS. 2.7 Wbudowana samoregulacja w reaktorze PWR (nie zastępuje układów wyłączania i chłodzenia).

nia zabiera reakcji neutrony, więc moc spada. Wysuwanie działa odwrotnie. Pręty służą do bieżącej regulacji i kształtowania rozkładu mocy, a przede wszystkim do szybkiego wyłączenia reaktora: po sygnale awaryjnym napędy zwalniają pręty, które w ciągu kilku sekund wpadają do rdzenia pod własnym ciężarem. Liczba zachodzących reakcji rozszczepienia gwałtownie zmniejsza się, ale generacja ciepła nie znika całkowicie — produkty rozszczepienia jeszcze długo wydzielają tzw. ciepło powyłączeniowe, które trzeba odprowadzać.

2. Bor w wodzie. Do wody obiegu pierwotnego dodaje się kwas borowy. Bor wyłapuje neutrony w całej objętości rdzenia, dlatego jego stężeniem koryguje się wolne i długookresowe zmiany reaktywności — na przykład po to, aby skompensować „zapas” świeżego paliwa, które na początku pracy jest bardziej reaktywne, niż potrzeba, z czasem „wypala się”, a jego reaktywność maleje. Do szybkiego sterowania mocą bor się nie nadaje: zmiana stężenia trwa znacznie dłużej niż ruch prętów.

3. Wbudowana samoregulacja. Najciekawszy mechanizm nie wymaga żadnego działania człowieka ani automatyki — wynika z samej fizyki reaktora i działa natychmiast (rys. 2.7). Sprowadza się do prostej zasady: gdy reaktor się nagrzewa, reakcja sama słabnie. Dzieje się tak z dwóch powodów.

Po pierwsze — paliwo. Oprócz uranu-235, który się rozszczepia, paliwo zawiera dużo uranu-238, który neutrony przede wszystkim pochłania. Robi to jednak „wybrednie”: wyłapuje głównie neutrony o ściśle określonych prędko-

CZY WIESZ, ŻE...

Dwie do czterech sekund — tyle trwa w reaktorze PWR pełne wsunięcie wszystkich prętów po sygnale awaryjnego wyłączenia. W reaktorze BWR pręty wchodzą od dołu, więc grawitacja nie pomaga — włącza je do rdzenia układ hydrauliczny, osiągnąwszy prędkości rzędu m/s. Dwie różne konstrukcje, ten sam wymóg: reakcja ma zostać przerwana w czasie liczącym w sekundach.

ZAPAMIĘTAJ!

Wyłączenie reaktora przerywa reakcję łańcuchową, ale nie kończy wydzielania ciepła: nagromadzone produkty rozszczepienia nadal grzeją. Tuż po wyłączeniu ciepło powyłączeniowe odpowiada około 6,5% mocy cieplnej, po godzinie – około 1,5%, a po dobie spada poniżej 0,5% – dlatego układy chłodzenia muszą pracować także po wyłączeniu.

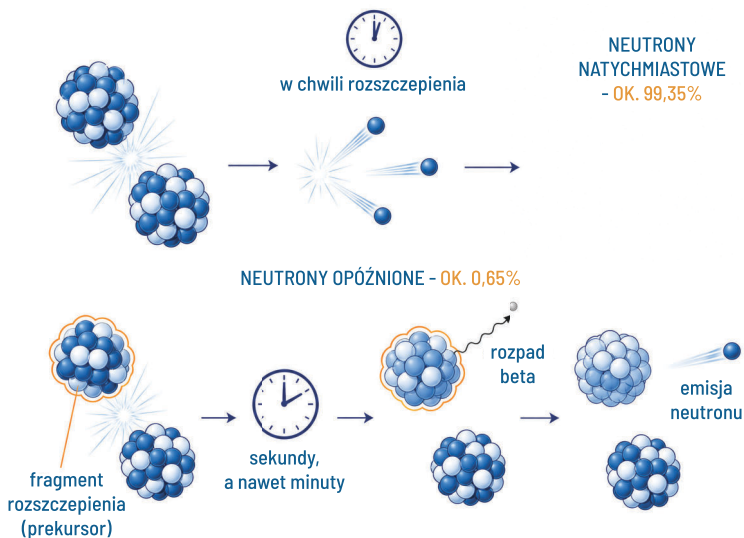
ściach. Gdy paliwo się nagrzewa, jego atomy drgają coraz mocniej i wówczas uran-238 zaczyna wyłapywać neutrony z coraz szerszego zakresu prędkości (w literaturze zjawisko to nosi nazwę efektu Dopplera). Skoro więcej neutronów pochłanianych jest w uranie-238, mniej z nich przetrwa do kolejnego rozszczepienia i moc spada. Co ważne, dzieje się to natychmiast, bo mechanizm działa w samym rozgrzewającym się paliwie.

Po drugie – woda. W reaktorze PWR woda nie tylko odbiera ciepło, ale też spowalnia neutrony, a właśnie spowolnione neutrony najskuteczniej rozszczepiają uran-235. Gdy woda się nagrzewa, rozszerza się – w tej samej objętości rdzenia jest jej po prostu mniej. Gorzej wtedy spowalnia neutrony, więc reakcja słabnie.

W efekcie reaktor PWR zachowuje się trochę jak urządzenie z termostatem: każda próba nadmiernego wzrostu temperatury sama przyhamowuje reakcję (fachowo nazywa się to ujemnym sprzężeniem zwrotnym). Trzeba jednak uczciwie dodać, że siła tego efektu zależy od projektu reaktora, stanu paliwa i stężenia boru, a samoregulacja tłumi zaburzenia, lecz nie zastępuje układów zabezpieczeń, szybkiego wyłączania ani niezawodnego chłodzenia.

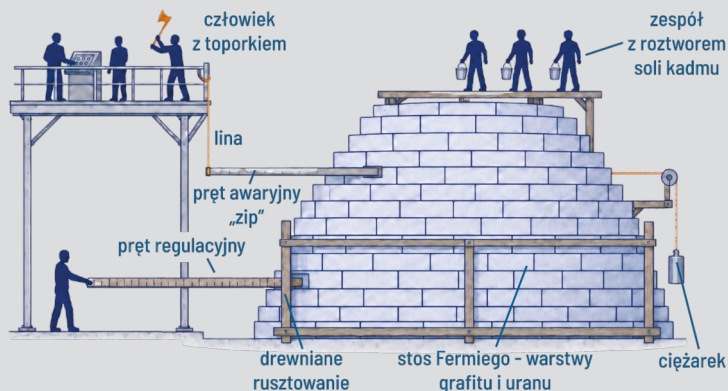
Szczególną rolę odgrywa drobny „poślizg” w samej reakcji. Zdecydowana większość neutronów powstaje w chwili rozszczepienia, ale niewielka część – dla uranu-235 około 0,65% (dokładna wartość w pracującym rdzeniu zależy od składu i wypalenia paliwa) – pojawia się dopiero po chwili: uwalniają je fragmenty rozszczepienia, od ułamków sekundy do kilkudziesięciu sekund później (rys. 2.8). Choć to niecały procent, właśnie to opóźnienie nadaje reaktorowi „ludzkie” tempo. Bez neutronów opóźnionych moc zmieniałaby się w tysięcznych częściach sekundy – zbyt szybko dla jakiegokolwiek sterowania. Dzięki nim zmiany mocy rozciągają się na sekundy i minuty, w sam raz dla automatyki i operatorów.

A Czarnobyl? Różnicę względem reaktora RBMK warto sformułować precyzyjnie. W RBMK neutrony spowalniał przede wszystkim grafit, a przepływająca woda głównie je pochłaniała. Gdy woda zaczynała intensywniej wrzeć



RYS. 2.8 Niemal wszystkie neutrony powstają natychmiast, ale niewielka część emitowana z opóźnieniem umożliwia kontrolowanie zmian mocy reaktora.

i zamieniała się w pęcherzyki pary, w rdzeniu ubywało pochłaniacza: więcej neutronów przeżywało, moc rosta – a wyższa moc wytwarzała jeszcze więcej pary. W określonych warunkach pracy RBMK-1000, takich jak w Czarnobylu w kwietniu 1986 r., to błędne koło (dodatnie sprzężenie zwrotne) mogło rozpędzić reaktor (zob. pyt. 62). W PWR jest dokładnie odwrotnie: to sama woda spowalnia neutrony, więc jej ubytek – na przykład zagotowanie – reakcję osłabia, a nie wzmacnia. Reaktory PWR projektuje się tak, aby w całym dopuszczonym zakresie pracy przegrzewanie rdzenia hamowało reakcję. Silnie ogranicza to możliwość niekontrolowanego wzrostu mocy, ale samo w sobie nie czyni reaktora bezpiecznym – nadal niezbędne są: możliwość szybkiego wyłączenia, niezawodne chłodzenie i kolejne bariery bezpieczeństwa.



Trzy sposoby zatrzymania stosu Fermiego

„SCRAM” – człowiek z siekierą i słowo, które utrwaliło się w energetyce jądrowej na zawsze

Awaryjne wyłączenie reaktora do dziś nazywa się w żargonie branżowym „scram”. Najbardziej znana anegdota wywodzi tę nazwę od skrótu Safety Control Rod Axe Man – „człowieka z siekierą od pręta bezpieczeństwa”, który miał czuwać przy pierwszym reaktorze Fermiego 2 grudnia 1942 r.

Sam człowiek z siekierą nie jest wymysłem. CP-1 miał trzy zestawy prętów: automatyczne pręty bezpieczeństwa sterowane z balkonu, awaryjny pręt „zip” oraz ręczny pręt sterujący, którym operował fizyk George Weil. „Zip” był poziomym prętem wysuwającym ze stosu. Do jednego jego końca przymocowano linę biegnącą przez stos do ciężkiej przeciwwagi po przeciwnej stronie. Wysunięty pręt przywiązywano drugą liną do barierki balkonu. Przy tej linie stał z siekierą Norman Hilberry. Gdyby przeciął ją, przeciwwaga opadłaby i wciągnęła pręt poziomo do stosu. Dodatkową rezerwą był trzysobowy zespół na pomoście nad stosiem, z naczyniami roztworu soli kadmu – pierwiastka silnie po-

chłaniającego neutrony – który mieli wyłączyć na stos, gdyby zawiodły pręty. Zespół ten zapamiętano jako „oddział samobójców”.

Historycy uważają jednak, że rozwinięcie skrótu dopisano do słowa dużo później. Uczestnicy tamtego dnia wspominali to różnie, a jeden z członków zespołu wprost uznał wersję z siekierą za zmyśloną. Bardziej prawdopodobne jest wyjaśnienie prozaiczne: „scram” to amerykańskie potoczne „zmykaj!”, a do techniki weszło przez tzw. linię scram – obwód wyłączenia awaryjnego zaprojektowany przez zespół Volneya Wilsona. Właśnie tym mianem posługuje się Fermi w raporcie technicznym o stosie z 1951 r.

Zostaje coś więcej niż językowa ciekawostka. Już przy pierwszym reaktorze świata zastosowano zasadę, zgodnie z którą zwolnienie elementu podtrzymującego samoczynnie wprowadza pochłaniacz do reaktora: w CP-1 opadająca przeciwwaga wciągała poziomy pręt do stosu. W wielu współczesnych reaktorach zanik zasilania mechanizmów utrzymujących pręty powoduje ich opadnięcie do rdzenia pod wpływem grawitacji. Zmieniła się technika, nie zasada.

CO OZNACZAJĄ „GENERACJE” REAKTORÓW I CZYM WYRÓŻNIA SIĘ GENERACJA III+?

11

Podział na generacje jest umowny: różne instytucje i autorzy mogą nieco inaczej przypisywać konkretne projekty. Nie stanowi on klasy bezpieczeństwa ani kategorii licencyjnej, ale pomaga uporządkować historię technologii reaktorów (rys. 2.9).

Generacja I to pionierskie prototypy i pierwsze reaktory demonstracyjne z lat 50. i 60. XX wieku. Udowodniły, że z atomu można produkować energię elektryczną.

Generacja II to trzon dzisiejszej światowej floty – reaktory komercyjne budowane masowo od lat 70. do 90. To one od dziesięcioleci dostarczają większość energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowniach jądrowych.

Generacja III obejmuje projekty wdrażane od lat 90. XX wieku: bardziej standaryzowane, projektowane na dłuższą eksploatację, z rozbudowaną redundancją, nowocześniejszą automatyką i zaostrzonymi wymaganiami wobec awarii projektowych oraz ciężkich. Pierwszymi blokami tej generacji, które weszły do eksploatacji, były japońskie ABWR – zaawansowane reaktory wodne wrzące uruchomione w drugiej połowie tej dekady.



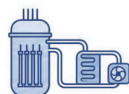
GENERACJA I
lata 50.–60.
prototypy
i demonstratory



GENERACJA II
lata 70.–90.
trzon obecnej
floty



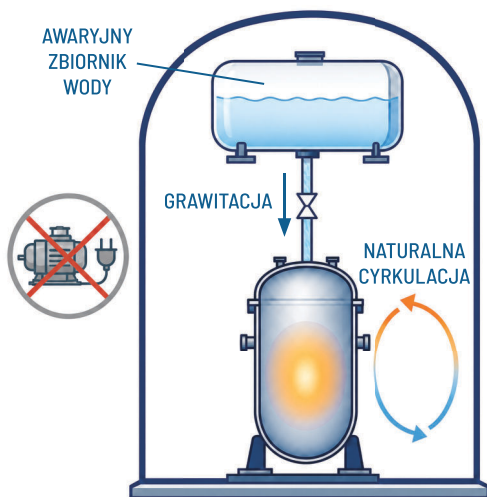
GENERACJA III / III+
współczesne projekty ewolucyjne
(wzmocniona obrona w głąb,
standaryzacja, rozwiązania
aktywne i pasywne)
PWR: AP1000, EPR, APR1400;
BWR: ABWR, ESBWR; CANDU: EC6



GENERACJA IV
rozwijane reaktory:
prędkie,
wysokotempera-
turowe, ze
stopionymi solami

RYŚ. 2.9 Umowny rozwój technologii reaktorowych: od prototypów, przez dominującą flotę reaktorów generacji II, po współczesne reaktory III/III+ różnych linii technologicznych i rozwijane systemy generacji IV.

RYS. 2.10 System pasywny wykorzystuje naturalne siły, na przykład grawitację i naturalną cyrkulację. Zakres takich systemów zależy od projektu reaktora.



PRZYKŁAD SYSTEMU PASYWNEGO – WYKORZYSTUJE GRAWITACJĘ I NATURALNĄ CYRKULACJĘ

CZY WIESZ, ŻE...

Pierwszymi reaktorami zaliczanymi do generacji III nie były wcale PWR, lecz japońskie bloki ABWR w elektrowni Kashiwazaki-Kariwa, uruchomione w latach 1996–1997.

Generacja III+ to nie nowa technologia, lecz udoskonalona generacja III: konstrukcje ewolucyjne o jeszcze mocniej rozbudowanych zabezpieczeniach – przede wszystkim na wypadek ciężkiej awarii i zagrożeń zewnętrznych, takich jak uderzenie samolotu. Nie chodzi przy tym o jeden typ reaktora: obok konstrukcji PWR – takich jak AP1000, EPR czy APR1400 – do generacji III+ zaliczane bywają również zaawansowane reaktory wodne wrzące (ABWR, ESBWR) oraz ciężkowodne z rodziny CANDU (np. EC6). Projekty te różnią się jednak sposobem zapewnienia bezpieczeństwa. AP1000 w szerokim zakresie wykorzystuje układy pasywne oparte na grawitacji, sprężonym gazie i naturalnej cyrkulacji (rys. 2.10) – podstawowe funkcje bezpieczeństwa mogą być podtrzymywane przez 72 godziny bez zasilania prądem przemiennym i bez działań operatora. Inne projekty łączą wielokrotnie zdublowane systemy aktywne z wybranymi rozwiązaniami pasywnymi. Szczegółowy za-

kres zabezpieczeń zależy od projektu i wymagań danego kraju (zob. pyt. 20–21).

Generacja IV oznacza sześć rodzin systemów rozwijanych w ramach międzynarodowego programu Generation IV International Forum: między innymi reaktory prężne chłodzone sodem, ołowiem lub gazem, reaktory wysokotemperaturowe oraz systemy ze stopionymi solami. Większość pozostaje na etapie badań, demonstracji lub rozwoju technologii, choć niektóre wykorzystują rozwiązania mające wcześniejsze doświadczenia prototypowe (zob. pyt. 69).

Kolejne generacje nie oznaczają, że wszystkie starsze reaktory były z definicji „niebezpieczne”. Pracujące bloki muszą spełniać obowiązujące wymagania i są modernizowane na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych. Polska planuje rozpocząć energetykę jądrową od projektu AP1000, wykorzystującego doświadczenia zgromadzone przez dziesięciolecia pracy reaktorów PWR.

ZAPAMIĘTAJ!

Określenia „generacja III” i „III+” nie mają jednej powszechnie obowiązującej definicji. AP1000, EPR i APRI400 są w różnych źródłach zaliczane do generacji III lub III+. Do generacji III/III+ zalicza się także projekty innych linii technologicznych, m.in. reaktory wodne wrzące ABWR i ESBWR oraz ciężkowodny EC6 z rodziny CANDU.

KTO STERUJE REAKTOREM I JAK WYGLĄDA CYKL PRACY ELEKTROWNI?

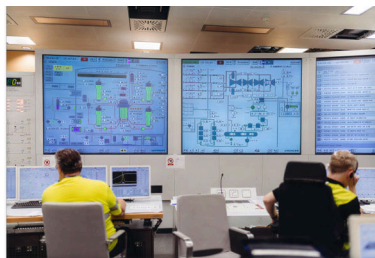
12

Pracą reaktora kierują operatorzy w sterowni — pomieszczeniu pełnym ekranów i wskaźników, do których spływają dane z tysięcy czujników (rys. 2.11). Operatorzy i inne osoby wykonujące czynności mające istotny wpływ na bezpieczeństwo jądrowe muszą spełniać wymagania kwalifikacyjne. W Polsce właściwe uprawnienia nadaje Prezes Państwowej Agencji Atomistyki po wymaganym szkoleniu i zdaniu egzaminu. Szczegółowy wykaz stanowisk, programy szkoleń i zasady odnawiania uprawnień będą wynikały z przepisów oraz dokumentacji licencyjnej konkretnej elektrowni.

Kluczowym narzędziem szkolenia jest symulator — wierna kopia sterowni, na której zespół regularnie ćwiczy nie tylko normalną pracę, lecz także najtrudniejsze scenariusze awaryjne — również takie, które w rzeczywistej elektrowni

WARTO WIEDZIEĆ

Pracą reaktora nie kieruje pojedyncza osoba według własnego uznania: każdą operacją rządzi procedury i zasada niezależnej weryfikacji, a nad całością czuwa automatyczny układ zabezpieczeń, który w razie potrzeby wyłączy reaktor.



RYŚ. 2.11 Sterownia bloku OL3 Elektrowni Jądrowej Olkiluoto w Finlandii – stąd, przez całą dobę, uprawnieni operatorzy kierują pracą reaktora.

mogą nigdy nie wystąpić. Obsada pracuje na zmiany przez całą dobę, w zespołach, według ścisłych procedur i z zasadą wzajemnej kontroli – o kulturze bezpieczeństwa, która za tym stoi, piszemy w pytaniu 27.

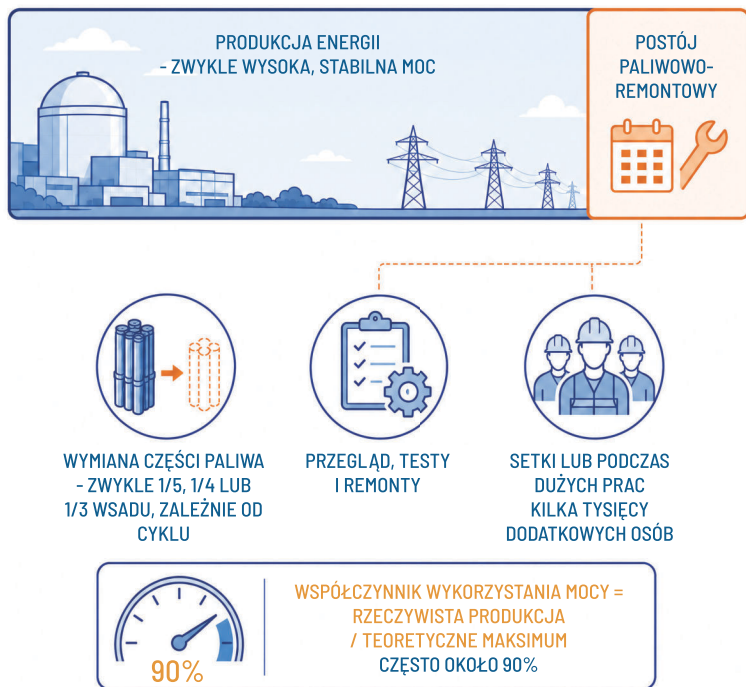
Od przeładunku do przeładunku paliwa

ZAPAMIĘTAJ!

Operator reaktora szkoli się latami i regularnie zdaje egzaminy na symulatorze – rygor porównywalny z wykształceniem pilotów liniowych. Zanim po raz pierwszy zasiądzie przy pulpicie rzeczywistego bloku, spędza setki godzin na pełnowymiarowym symulatorze, a uprawnienia musi cyklicznie odnawiać.

Elektrownie jądrowe są zwykle eksploatowane z wysoką, stosunkowo stałą mocą, ponieważ mają niskie koszty paliwa i dobrze nadają się do ciągłej produkcji. Nie zależą przy tym od pogody. Nie oznacza to jednak, że technicznie nie mogą zmieniać mocy: wiele reaktorów PWR potrafi pracować w trybie nadążania za zapotrzebowaniem sieci, jeśli przewidują to projekt, procedury i warunki rynkowe. W normalnym ruchu operatorzy stale monitorują parametry i wykonują planowe czynności, nawet gdy blok pracuje stabilnie.

Ten rytm przerywa co 12–24 miesiące planowy postój paliwowy (rys. 2.12). Reaktor zostaje wyłączony i schłodzony, a następnie otwiera się jego zbiornik. Z rdzenia wyjmuje się część najbardziej wypalonych (zużytych) kaset – zależnie od długości cyklu, zwykle około jednej piątej, jednej czwartej lub jednej trzeciej wsadu – pozostałe kasety mogą zostać przetasowane, a wolne miejsca zajmuje paliwo świeże. Równocześnie wykonuje się przeglądy, testy, remonty i modernizacje niedostępne podczas pracy. Postój trwa zwykle kilka tygodni, choć jego długość zależy od zakresu prac i stanu bloku.



RYS. 2.12 Typowy rytm pracy bloku PWR lub BWR: 12–24 miesiące produkcji, następnie kilkutygodniowy postój na wymianę części paliwa, przeglądy i remonty. Reaktory CANDU przeładowuje się podczas pracy.

Postój ma również znaczenie dla regionu. Na kilka tygodni stała załoga jest wspierana przez pracowników producentów urządzeń i wyspecjalizowanych firm serwisowych. Ich liczba zależy od wielkości elektrowni i programu prac: może chodzić o setki osób, a podczas dużych postojów – o kilka tysięcy. Zwiększa to okresowo popyt na noclegi, gastronomię, transport i inne usługi lokalne (zob. pyt. 59).

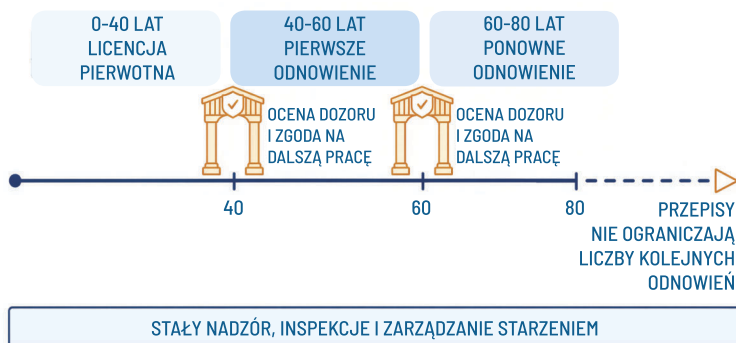
Efektom dobrej organizacji eksploatacji jest wysoki współczynnik wykorzystania mocy. Nie oznacza on dosłownie odsetka godzin pracy z pełną mocą, lecz stosunek energii rzeczywiście wyprodukowanej do energii, którą blok wytworzyłby, pracując przez cały okres z mo-

cą znamionową. W dobrze zarządzanych elektrowniach jądrowych wartość ta przekracza 90%. Na przykład amerykańska flota od wielu lat osiąga średni współczynnik wykorzystania mocy bliski 90% lub wyższy, w 2024 r. wyniósł on około 92%.

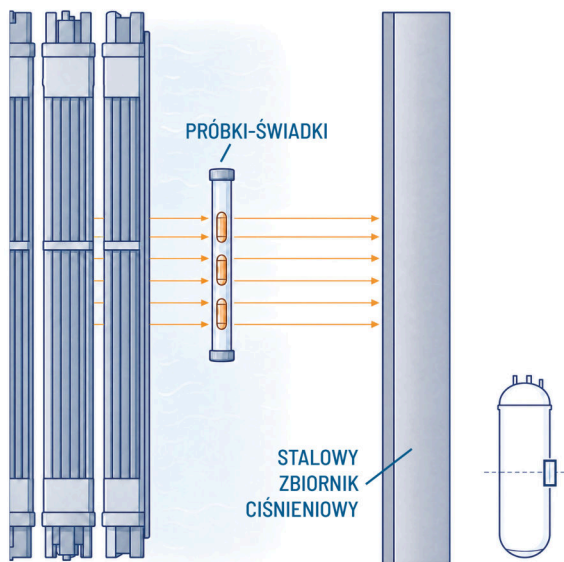
13

JAK DŁUGO MOŻE PRACOWAĆ ELEKTROWNIA I SKĄD PEWNOŚĆ, ŻE PO DEKADACH NADAL JEST BEZPIECZNA?

Czterdzieści lat – taka liczba najczęściej pada, gdy mowa o czasie pracy elektrowni jądrowej. Wzięta się ze Stanów Zjednoczonych, gdzie taki maksymalny okres pierwszej licencji przyjęto z powodów prawnych i ekonomicznych, a nie dlatego, że po czterdziestu latach reaktor automatycznie staje się niezdadny do pracy. Nie oznacza to jednak, że wszystkie elementy od początku projektowano bez ograniczeń czasowych: w analizach przyjmuje się określony okres eksploatacji, obciążenia i zapasy bezpieczeństwa. W innych państwach stosuje się odmienne okresy zezwoleń oraz procedury ich przedłużania (rys. 2.13).



RYŚ. 2.13 W USA licencję można odnawiać etapami z 40 do 60, a następnie do 80 lat – po odrębnej ocenie dozoru. Nie jest to uniwersalny model obowiązujący we wszystkich państwach.



RYS. 2.14

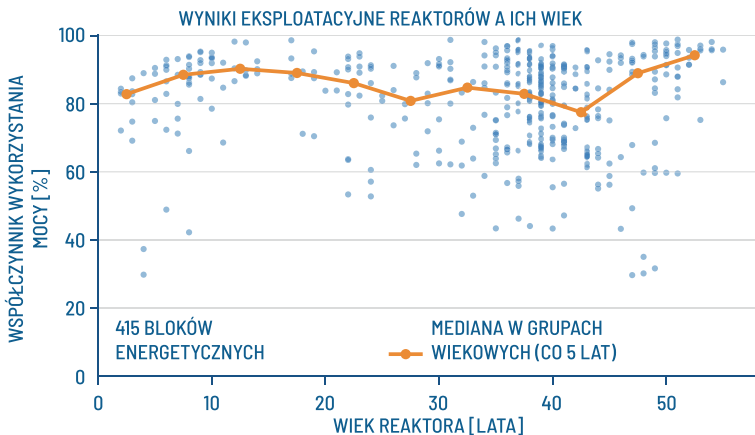
Próbki-świadki umieszcza się bliżej rdzenia niż ścianka zbiornika, więc pochłaniają w tym samym czasie więcej neutronów i wyprzedzają ją w starzeniu. Badając je, można z wyprzedzeniem przewidzieć zmiany własności stali zbiornika.

Wiele dużych elementów elektrowni można wymienić lub zmodernizować – dotyczy to między innymi pomp, rurociągów, kabli i układów sterowania, a nawet ważących setki ton wytwornice pary. Są jednak części bardzo trudne lub praktycznie nieopłacalne do wymiany: przede wszystkim zbiornik ciśnieniowy reaktora, obudowa bezpieczeństwa, ważne konstrukcje budowlane oraz niektóre elementy trwale wbudowane. Stan zbiornika monitoruje się szczególnie uważnie. Ocenia się spoiny, własności stali i jej kruchość radiacyjną. Wewnątrz zbiornika umieszcza się kapsuły z próbkami materiału (próbki-świadki) w miejscach o większym strumieniu neutronów. Dzięki temu próbki pochłaniają w tym samym czasie więcej neutronów niż sama ścianka i niejako wyprzedzają ją w starzeniu: badając je, można z wyprzedzeniem przewidzieć zmiany własności stali zbiornika (rys. 2.14).

Nad całością czuwają programy zarządzania starzeniem oraz okresowe przeglądy bezpieczeństwa. Międzynarodowa praktyka często zakłada kompleksową ocenę mniej więcej co dziesięć lat, ale dokładny tryb zależy od prawa

WARTO WIEDZIEĆ

Wytwornice pary – często ważące setki ton – wymieniono już w ponad stu reaktorach. Żeby je wyjąć, wycina się otwór w obudowie bezpieczeństwa, a potem ją odtwarza. Znacznie trudniejsze do zastąpienia są zbiornik reaktora, sama obudowa i konstrukcje budynku – dlatego ich stan kontroluje się przez cały okres pracy.



RYŚ. 2.15 Sam wiek nie przesądza o wynikach bloku — starsze reaktory mogą osiągać wysoką dyspozycyjność, ale każdy obiekt ma własną historię eksploatacji i modernizacji.

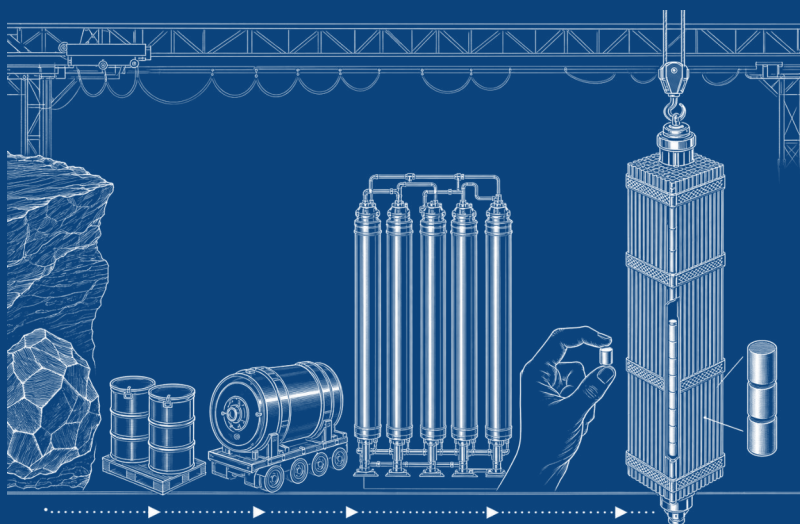
krajowego. W USA pierwsza licencja może obejmować do 40 lat, pierwsze odnowienie — kolejne 20 lat, a ponowne odnowienie (ang. *subsequent license renewal*) — okres od 60 do 80 lat. Pierwsze takie odnowienia wydano w 2019 r. dla bloków Turkey Point 3 i 4, a do lipca 2026 r. procedurę ukończono dla wielu kolejnych bloków. Każda decyzja wymaga wykazania, że skutki starzenia są właściwie rozpoznane i zarządzane.

CIĘKAWOSTKA

Najstarsze pracujące reaktory energetyczne świata stoją w Indiach: bloki 1 i 2 elektrowni Tarapur z 1969 r., które po sześciu latach modernizacji wróciły do sieci w 2026 r. z licencją na kolejne dziesięć lat. Równie leciwe bloki pracują w Szwajcarii i Stanach Zjednoczonych.

Czy starszy reaktor musi pracować gorzej? Sam wiek kalendarzowy nie jest wystarczającym wskaźnikiem. Dane eksploatacyjne pokazują, że wiele bloków mających ponad czterdzieści lat nadal osiąga wysoką dyspozycyjność, jeśli są dobrze utrzymywane i modernizowane. Nie należy jednak z góry zakładać całkowicie prostej zależności: wynik konkretnego bloku zależy od projektu, historii pracy, postojów modernizacyjnych, polityki operatora i warunków regulacyjnych (rys. 2.15). Dłuższa, bezpieczna eksploatacja pozwala lepiej wykorzystać istniejący obiekt i rozłożyć nakłady inwestycyjne na większą produkcję energii (zob. pyt. 57). Gdy dalsza praca przestaje być uzasadniona lub nie spełnia wymagań, blok jest wyłączany i poddawany zaplanowanej likwidacji (zob. pyt. 61).

DZIAŁ III



**paliwo
jądrowe**

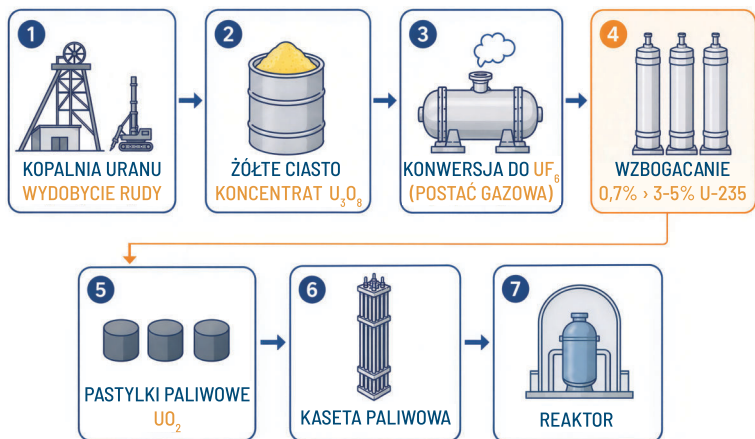
JAK POWSTAJE PALIWO JĄDROWE – OD RUDY URANU PO KASETĘ W RDZENIU REAKTORA?

CZY WIESZ, ŻE...

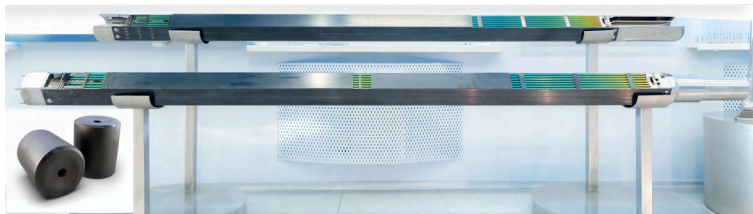
Pierwszy produkt przerobu rudy uranowej to „żółte ciasto” (ang. yellow cake) – proszek, w którym uranu jest już ok. 80%, podczas gdy w samej rudzie bywa go ułamek procenta.

Zacznijmy od tego, czym jest uran w naturze. Występuje w skałach jako mieszanka izotopów, w której ponad 99% stanowi uran-238, a tylko ok. 0,7% – rozszczepialny uran-235, na którym opiera się praca reaktora (zob. pyt. 2). Cała sztuka wytwarzania paliwa polega w gruncie rzeczy na zwiększeniu udziału tego drugiego izotopu, czyli na wzbogacaniu. Nie potrzebują go reaktory ciężkowodne (np. CANDU), które mogą pracować na uranie naturalnym. Droga od skały do gotowej kasety ma kilka etapów (rys. 3.1).

Wydobycie i przerób rudy. Uran wydobywa się w kopalniach odkrywkowych, głębinowych albo metodą ługowania in situ – wypłukiwania go wprost ze złoża przez otwory wiertnicze, bez kopania. Wydobytą rudę oczyszcza się i zagęszcza do koncentratu, tzw. żółtego ciasta (ang. yellow cake).



RYŚ. 3.1 Od rudy do rdzenia: kolejne etapy wytwarzania paliwa jądrowego, każdy w innym wyspecjalizowanym zakładzie.



RYS. 3.2 Ceramiczna pastylka paliwowa i kasetę, w której dziesiątki tysięcy takich pastylek trafiają do rdzenia reaktora.

Konwersja. Koncentrat zamienia się w sześćfluorek uranu (UF_6) – związek, który już po niewielkim podgrzaniu przechodzi w stan gazowy. Postać gazowa jest konieczna do następnego, kluczowego kroku.

Wzbogacanie. W szybko wirujących wirówkach gazowych oddziela się nieco lżejsze cząsteczki zawierające U-235 od cięższych z U-238. Powtarzając to wielokrotnie, zwiększa się udział U-235 z naturalnych 0,7% do 3–5% potrzebnych w reaktorze. To najbardziej zaawansowany technicznie etap – i ten sam proces, który doprowadzony znacznie dalej (do wzbogacenia powyżej 90%) mógłby służyć do celów wojskowych. Dlaczego z paliwa energetycznego nie da się zrobić bomby atomowej, wyjaśniamy w pytaniu 16.

Fabrykacja paliwa. Wzbogacony uran zamienia się z powrotem w proszek dwutlenku uranu, prasuje i wypala w twarde, ceramiczne pastylki wielkości mniej więcej opuszka palca (rys. 3.2). Pastylki umieszcza się w cienkich, szczelnych rurkach (koszulkach), a te łączy w kasetę paliwowe – gotowe do włożenia do rdzenia.

Na koniec ważna, uspokajająca uwaga. Świeże paliwo jest jedynie słabo promieniotwórcze – nowej kasety można bezpiecznie dotykać (w rękawiczkach, głównie ze względu na czystość). Groźne dla otoczenia staje się dopiero wypalone paliwo, po latach pracy w reaktorze, gdy nagromadzą się w nim silnie promieniotwórcze produkty rozszczepienia (zob. pyt. 43). Paliwo dostarczane jest więc do elektrowni w stanie łatwym i bezpiecznym w obsłudze.

CIEKAWOSTKA

Wirówki wzbogacające uran wykonują kilkadziesiąt tysięcy obrotów na minutę, a ich ścianki mkną około półtora raza szybciej niż dźwięk.

ZAPAMIĘTAJ!

Wzbogacanie nie tworzy nowego pierwiastka – od kopalni po kasetę uranu pozostaje uranem. Zmienia się tylko proporcja izotopów: udział rozszczepialnego U-235 rośnie z naturalnych 0,7% do 3–5%. Cała reszta drogi to chemia i precyzyjna obróbka mechaniczna.

SKĄD POCHODZI URAN, CZY GROZI NAM JEGO BRAK I JAK ZAPEWNIĄ SIĘ BEZPIECZEŃSTWO DOSTAW?

WARTO WIEDZIEĆ

W wodach oceanów rozpuszczone jest ok. 4 mld ton uranu – kilkaset razy więcej niż we wszystkich znanych złożach na lądzie. Wydobycie z wody udało się już w skali doświadczalnej, a jego przyszłe koszty i opłacalność pozostają niepewne.

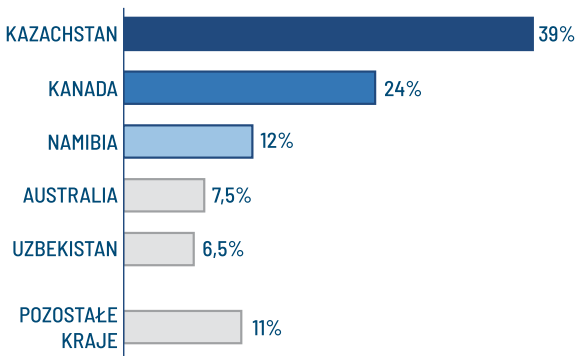
Zacznijmy od geografii (rys. 3.3). Uran wydobywa się na kilku kontynentach. Największym producentem jest Kazachstan (w 2024 r. ok. 39% światowego wydobycia), a kolejne miejsca zajmują Kanada (ok. 24%) i Namibia (ok. 12%). Liczą się także Australia i Uzbekistan. Co istotne dla bezpieczeństwa, wśród czołowych dostawców są stabilne demokracje, jak Kanada i Australia. Uran nie jest więc surowcem skupionym w jednym, „niepewnym” zakątku świata.

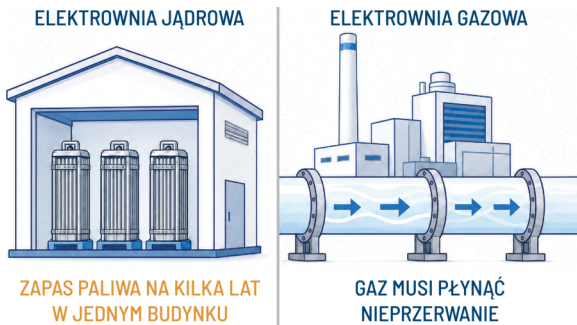
A czy może się skończyć? W dającej się przewidzieć przyszłości – nie. Rozpoznane, opłacalne zasoby wystarczą przy obecnym zużyciu na ponad 90 lat, a po uwzględnieniu złóż droższych i dotąd nieodkrytych – na znacznie dłużej. Do tego dochodzi rezerwa wręcz astronomiczna: w wodzie morskiej rozpuszczone są miliardy ton uranu. To nie jest surowiec, którego niedobór miałyby ograniczać energetykę jądrową.

Najciekawsze jest jednak to, co odróżnia paliwo jądrowe od gazu czy węgla. Po pierwsze, dzięki ogromnej gęstości energii zawartej w paliwie jądrowym (zob. pyt. 1) zapas paliwa na kilka lat pracy elektrowni mieści się w jednym

RYŚ. 3.3

Najwięcej uranu wydobywa się w Kazachstanie, Kanadzie i Namibii. Źródło: World Nuclear Association, „World Uranium Mining Production”, dane za 2024 r.



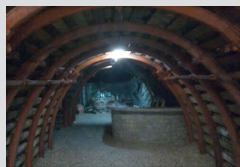


RYS. 3.4 Paliwo jądrowe można zmagazynować na lata z góry – inaczej niż gaz, który do elektrowni musi płynąć nieustannie.

budynku i można go kupić z dużym wyprzedzeniem – podczas gdy do elektrowni gazowej surowiec musi płynąć nieprzerwanie (rys. 3.4). Po drugie, uran i usługi jego przerobu można nabywać u wielu niezależnych dostawców, a państwa tworzą strategiczne rezerwy. Po trzecie, koszt samego paliwa stanowi tylko niewielką część ceny prądu z elektrowni jądrowej, więc nawet skoki cen uranu w niewielkim stopniu przekładają się na rachunki (zob. pyt. 57). Wreszcie, cykl życia paliwa nie musi kończyć się po jednym użyciu: wypalone paliwo można poddać recyklingowi i odzyskać z niego surowiec (zob. pyt. 17), co dodatkowo wydłuża wystarczalność zasobów. Dla kraju budującego energetykę jądrową zaopatrzenie w paliwo jest więc jednym z łatwiejszych do zabezpieczenia elementów całego przedsięwzięcia – surowiec jest powszechny, dostawców wielu, a zapas łatwo przechować.

Od 1948 r. w Sudetach – m.in. w Kowarach i Kletnie – działały Zakłady Przemysłowe R-1, oficjalnie wydobywające fluoryt i baryt, w rzeczywistości uran, który w całości trafił do ZSRR na potrzeby radzieckiego programu atomowego. Przedsięwzięciem kierowali

Rosjanie, a do przymusowej pracy posyłano tu m.in. więźniów i żołnierzy z poboju. Wydobycie skupiło się w latach 50., ostatnią kopalnię zamknięto w 1973 r. Dziś zostały po nim podziemne trasy turystyczne i tereny poddane rekultywacji.



Kopalnia Podgórze w Kowarach

DLACZEGO PALIWA ENERGETYCZNEGO NIE MOŻNA UŻYĆ DO BUDOWY BOMBY ATOMOWEJ – I KTO TO KONTROLUJE?

CZY WIESZ, ŻE...

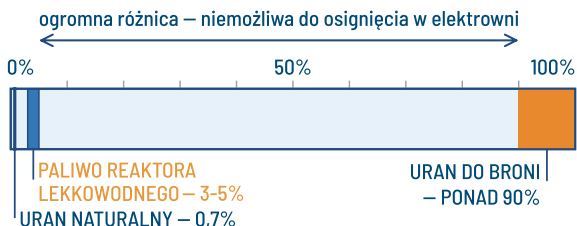
W programie „Megatony na megawaty” (1993–2013) 500 ton rosyjskiego uranu wysoko wzbogaconego – równoważność ok. 20 tysięcy głowic jądrowych – rozcieńczono uranem o znacznie niższym wzbogaceniu, otrzymując paliwo nisko wzbogacone dla amerykańskich elektrowni. Przez dwie dekady mniej więcej co dziesięcia żarówka w Stanach Zjednoczonych świeciła dzięki materiałowi z dawnych arsenałów nuklearnych.

Obawa, że z reaktora „zrobi się bombę”, bierze się z tego, że i w reaktorze, i w bombie zachodzi rozszczepienie tych samych jąder atomowych. Fizyka stawia jednak dwie potężne bariery.

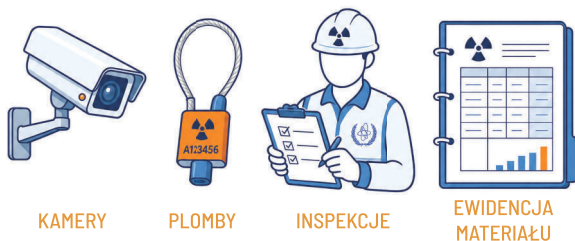
Pierwsza to wzbogacenie. Paliwo reaktora zawiera 3–5% uranu-235, a bomba wymaga uranu wzbogaconego do ponad 90% (rys. 3.5). To nie jest różnica „o włos”, którą dałoby się pokonać po drodze – przy 5% wybuch jądrowy jest fizycznie niemożliwy (zob. pyt. 65). Osiągnięcie poziomu bojowego wymagałoby osobnych, ogromnych zakładów wzbogacania, których żadna elektrownia nie ma i nie potrzebuje.

Druga bariera dotyczy plutonu. W paliwie reaktora rzeczywiście powstaje trochę plutonu – ale ponieważ paliwo tkwi w rdzeniu przez lata, gromadzi się w nim zbyt dużo „kłopotliwego” izotopu plutonu-240. Ten izotop psułyby działanie bomby, dlatego pluton z elektrowni jądrowej nie nadaje się do budowy broni jądrowej. Pluton militarny wytwarza się w specjalnych reaktorach, w których paliwo przebywa w rdzeniu bardzo krótko – to zupełnie inny sposób pracy niż w elektrowni.

Kto tego pilnuje? Nie opiera się to na zaufaniu, lecz na ścisłym systemie kontroli (rys. 3.6). Podstawą jest Układ



RYŚ. 3.5 Trzy poziomy wzbogacenia na jednej, liniowej skali: uran naturalny 0,7%, paliwo reaktora lekkowodnego 3–5%, materiał do broni jądrowej ponad 90%.



RYS. 3.6 Ewidencja, inspekcje, kamery i plomby – cztery narzędzia nadzoru Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej i Euratomu nad materiałami jądrowymi. Sens jest jeden: ubytek materiału rozszczepialnego nie przeszedłby niezauważony.

o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej (NPT), którego Polska jest stroną. Jego przestrzeganie sprawdza Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) za pomocą tzw. zabezpieczeń (safeguards): skrupulatnej ewidencji każdego grama materiału, inspekcji na miejscu, kamer i plomb, które natychmiast ujawniłyby każdą próbę „ubytku”. W Unii Europejskiej dochodzi do tego dodatkowy nadzór Euratomu.

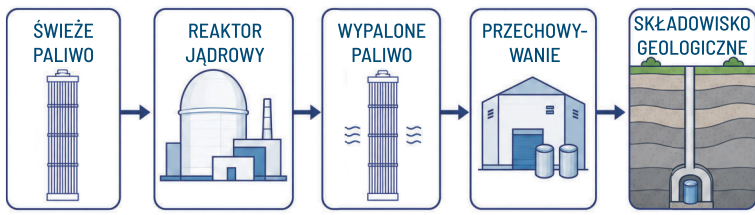
Rozdzielenie cywilnej energetyki od zbrojeń nie jest więc kwestią dobrej woli, lecz połączenia praw fizyki z jednym z najściślej kontrolowanych systemów nadzoru na świecie. Materiały jądrowe w elektrowni są liczone, pilnowane i regularnie sprawdzane przez niezależnych, międzynarodowych inspektorów.

CZY WYPALONE PALIWO TO ODPAD, CZY CENNY SUROWIEC? O RECYKLINGU I ZAMKNIĘTYM CYKLU PALIWOWYM

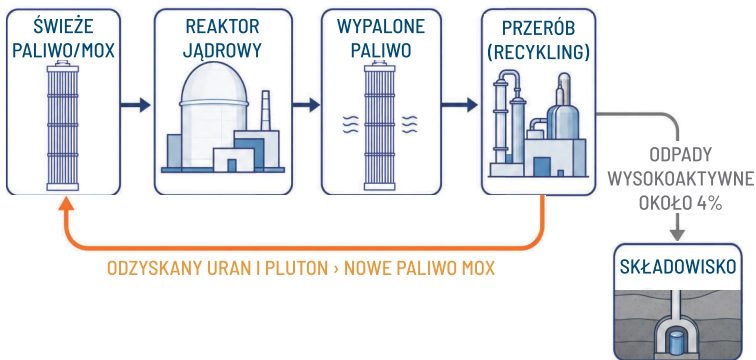
17

Zacznijmy od tego, co właściwie kryje wypalone paliwo. Po kilku latach w reaktorze przestaje się ono nadawać do dalszej pracy – nie dlatego, że wyczerpał się uran (tego zostaje niemal tyle, ile było), lecz dlatego, że ubyło rozszczepialnego U-235, a także nagromadziły się w nim fragmenty rozszczepienia, które pochłaniają neutrony i gaszą

CYKL OTWARTY



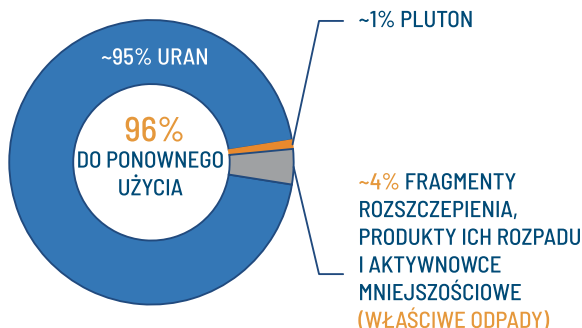
CYKL ZAMKNIĘTY



RYS. 3.7 Dwie drogi wypalonego paliwa jądrowego: cykl otwarty (paliwo > reaktor > składowisko) i zamknięty (z przerobem i ponownym użyciem jako MOX).

reakcję łańcuchową. Materiałowo jednak to paliwo wciąż w ok. 95% składa się z uranu, w ok. 1% z plutonu, a jedynie w ok. 4% z właściwych odpadów – fragmentów rozszczepienia (oraz produktów ich rozpadu promieniotwórczego) oraz długożyciowych aktywności mniejszościowych, takich jak neptun, ameryk i kiur (rys. 3.8). Innymi słowy: większość „wypalonego” paliwa to nadal użyteczny materiał.

Stąd dwie możliwe drogi (rys. 3.7). W **cyklu otwartym** wypalone paliwo traktuje się w całości jak odpad: chłodzi, przechowuje, a docelowo umieszcza w głębokim składowisku geologicznym (zob. pyt. 43–44). To rozwiązanie prostsze i wybrane przez wiele krajów. W **cyklu zamkniętym** wypalone paliwo poddaje się przerobowi: oddziela



RYŚ. 3.8 Wbrew nazwie „wypalone” paliwo to wciąż w ok. 95% uran i w ok. 1% pluton – razem 96% masy, którą można wykorzystać ponownie. Właściwe odpady, czyli produkty rozszczepienia i aktywności mniejszościowe, stanowią zaledwie ok. 4%. Ten podział ujawnia się jednak dopiero w cyklu zamkniętym: tam, gdzie paliwo się nie przerabia, za odpad uznaje się je w całości.

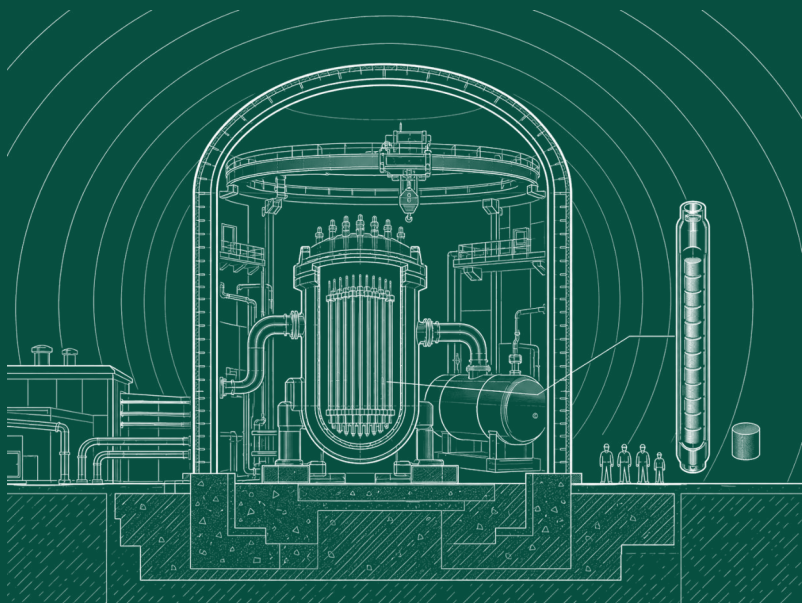
użyteczny uran i pluton, a z nich wytwarza nowe paliwo MOX (Mixed Oxide Fuel) – mieszanek tlenków uranu i plutonu – które ponownie trafia do reaktora. Tą drogą od dziesięcioleci idzie m.in. Francja.

Która droga jest lepsza? Nie ma jednej odpowiedzi – każda ma swoją cenę. Recykling wydłuża wykorzystanie zasobów uranu i zmniejsza objętość wypalonego paliwa, ale jest kosztowny i technicznie wymagający. Cykl otwarty jest tańszy i prostszy, lecz „marnuje” materiał, który dałoby się jeszcze wykorzystać. To, którą ścieżkę wybiera dany kraj, zależy od rachunku ekonomicznego, skali programu i decyzji politycznych.

Warto też patrzeć w przód. W wypalonym paliwie kryje się wciąż ogromna część pierwotnej energii, a niektóre reaktory przyszłości – generacji IV (zob. pyt. 69) – mogłyby ją odzyskać, jednocześnie wielokrotnie zmniejszając ilość długożyciowych odpadów. Dlatego niektóre kraje traktują wypalone paliwo nie jako kłopot do zakopania, lecz jako surowiec „na później”. Odpowiedź na tytułowe pytanie brzmi więc: to po części kwestia wyboru, a nie tylko fizyki – i wybór ten wciąż pozostaje otwarty dla kraju, który dopiero zaczyna energetykę jądrową.

WARTO WIEDZIEĆ

Recykling paliwa to nie teoria, lecz przemysłowa codzienność. Największy na świecie zakład przerobu wypalonego paliwa działa w La Hague na normandzkim wybrzeżu Francji: ma zdolność przerobu ok. 1700 ton paliwa rocznie i obsługuje również klientów zagranicznych.



bezpieczeństwo – jak chroni się ludzi i środowisko

NA CZYM POLEGA „OBRONA W GŁĄB” – FUNDAMENT BEZPIECZEŃSTWA JĄDROWEGO?

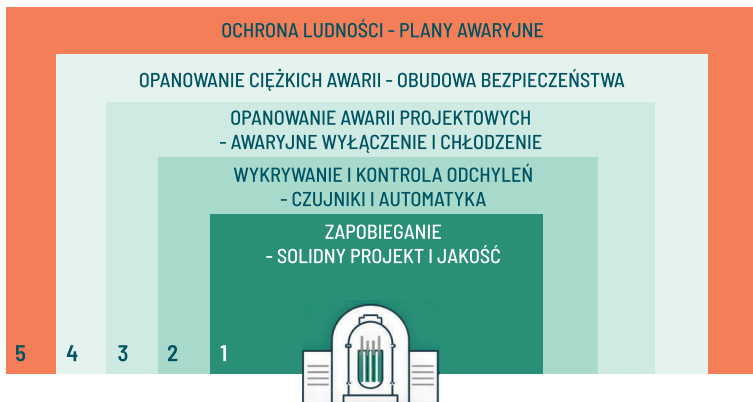
18

Gdyby bezpieczeństwo elektrowni jądrowej zależało od jednego, choćby najdoskonalszego zabezpieczenia, zawsze pozostawałoby pytanie: a co, jeśli właśnie ono zawiedzie? Energetyka jądrowa poszła więc inną drogą. Jej fundamentem jest filozofia obrony w głąb: szereg kolejnych, niezależnych od siebie warstw ochrony, z których każda przejmuje zadanie, gdyby poprzednia nie podołała. Dobrze oddaje to porównanie do średniowiecznej twierdzy (rys. 4.2): kto sforsuje fosę, staje przed murem, a za murem czeka go jeszcze wieża – pokonanie jednej przeszkody wcale nie oznacza zdobycia całości. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej ujmuje tę filozofię w pięć poziomów (rys. 4.1).

Wszystko zaczyna się od zapobiegania (poziom pierwszy) – bo najlepsza awaria to ta, do której w ogóle nie dochodzi. Elektrownię projektuje się zachowawczo, z dużym zapasem wytrzymałości ponad przewidywane obciążenia, buduje z materiałów najwyższej jakości, eksploatuje we-

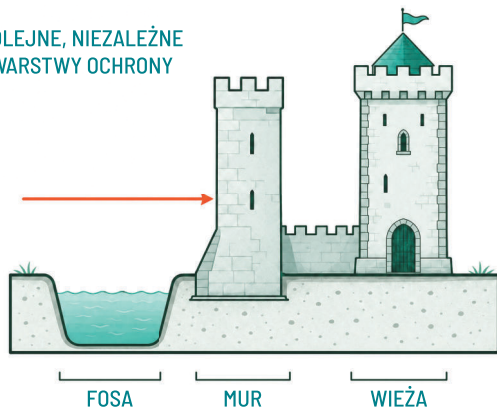
CZY WIESZ, ŻE...

Projektanci reaktora wychodzą z przewrotnego założenia: „przyjmijmy, że każdy element może zawieść”. Dlatego dla każdej ważnej funkcji bezpieczeństwa istnieje kilka niezależnych zabezpieczeń.



RYŚ. 4.1 Pięć poziomów obrony w głąb. Wszystkie są utrzymywane w gotowości – kolejne ograniczają rozwój i skutki zdarzenia, gdy wcześniejszy poziom nie wystarczy.

KOLEJNE, NIEZALEŻNE WARSTWY OCHRONY



RYS. 4.2 Jak w twierdzy: pokonanie jednej przeszkody nie oznacza zdobycia całości.

WARTO WIEDZIEĆ

Termin „obrona w głąb” zapożyczono wprost ze sztuki wojennej – z taktyki rozmieszczania kolejnych linii obrony, w której przełamanie pierwszej nie rozstrzyga bitwy, a jedynie osłabia natarcie przed następną. Inżynierowie przejęli tę ideę niemal bez zmian, ale z jedną różnicą – tu wszystko podporządkowano temu, aby z ostatniej linii nie trzeba było nigdy skorzystać.

dług ścisłych procedur, a szkolenie operatorów jest stale doskonalone i sprawdzane. Celem jest, aby odstępstwa od normalnej pracy pojawiały się możliwie rzadko.

Ponieważ jednak żadna maszyna nie działa idealnie, poziom drugi czuwa nad wykrywaniem odchyłeń. Tysiące czujników nieustannie mierzą temperatury, ciśnienia i przepływy, a układy automatycznej regulacji korygują drobne zakłócenia, zanim zdążą przerodzić się w rzeczywisty problem. Ogromna większość zdarzeń w elektrowni kończy się właśnie tutaj – jako niepozorny wpis w dzienniku eksploatacji.

Poziom trzeci wkracza, gdyby mimo wszystko doszło do awarii projektowej – czyli jednego ze scenariuszy, które projektanci z góry przewidzieli i na które przygotowali konkretne odpowiedzi. Czekają na nie specjalnie do tego przeznaczone układy bezpieczeństwa: awaryjne wyłączenie reaktora (zob. pyt. 10) i awaryjne chłodzenie rdzenia (zob. pyt. 20).

Poziom czwarty sięga jeszcze dalej – obejmuje zdarzenia poważniejsze, niż zakładano w projekcie. Nawet wtedy pozostają obudowa bezpieczeństwa (zob. pyt. 19) i procedury zarządzania ciężką awarią, których wspólny cel jest jeden: zatrzymać substancje promieniotwórcze wewnątrz obiektu.

Poziom piątą, ostatnią, wykracza już poza teren elektrowni. To plany awaryjne dla okolicy: system powiadamiania mieszkańców, a w razie potrzeby ewakuacja i podanie stabilnego jodu. Samo istnienie takich planów nie oznacza, że ich użycie jest prawdopodobne – to po prostu ostatnia warstwa tej samej, konsekwentnie ostrożnej filozofii.

Aby obrona w głąb działała, warstwy ochrony muszą być od siebie możliwie niezależne – tak, aby jedno zdarzenie nie mogło powodować utraty kilku z nich naraz. Dlatego kluczowe układy bezpieczeństwa buduje się w kilku egzemplarzach (to tzw. redundancja), nierzadko w odmiennych technologiach (różnorodność) i w oddalonych od siebie częściach obiektu (separacja). Ta sama logika działa więc także w obrębie jednej funkcji: gdy zawiedzie jeden układ, jego zadanie przejmuje kolejny – np. każdy z kilku awaryjnych układów chłodzenia rdzenia sam zapewni skuteczne chłodzenie. Prawdopodobieństwo, że jednocześnie zawiedzie wiele niezależnych zabezpieczeń, jest znikome – i, co ważne, policzalne (zob. pyt. 22). Obronę w głąb uzupełnia zasada ALARA (ang. As Low As Reasonably Achievable): ryzyko i dawki promieniowania utrzymuje się na poziomie tak niskim, jak to rozsądnie osiągalne.

ZAPAMIĘTAJ!

Bezpieczeństwo jądrowe nie opiera się na wierze, że nic nie zawiedzie, lecz na założeniu, że zawieść może wszystko. Za każdym zabezpieczeniem stoi więc następne – a do realnej szkody potrzebna byłaby jednoczesna awaria wielu niezależnych warstw.

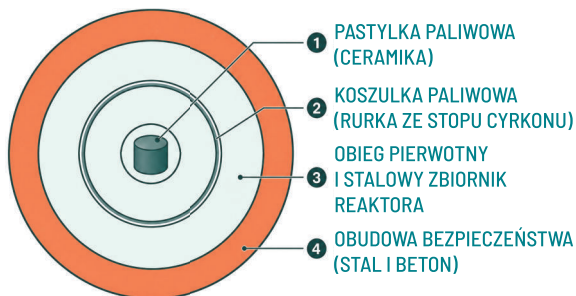
JAKIE KOLEJNE BARIERY ODDZIELAJĄ SUBSTANCJE PROMIENIOTWÓRCZE OD OTOCZENIA?

19

Jeśli obrona w głąb (zob. pyt. 18) jest strategią, to bariery są jej materialnym wcieleniem: rzeczywistymi barierami z ceramiki, metalu, stali i betonu. Standardowo wyróżnia się ich cztery (rys. 4.3). Najłatwiej zrozumieć ich sens, śledząc drogę, jaką musiałby pokonać pojedynczy promieniotwórczy atom – powiedzmy cezu – powstały w rozszczepieniu, zanim wydostałby się na zewnątrz.

Pierwsza przeszkoda czeka go już w miejscu narodzin. **Pastryłka paliwowa** to twarda, spiekana ceramika o temperaturze topnienia sięgającej 2800°C – i to właśnie w jej krystalicznej strukturze pozostaje uwięziona przeważająca

RYŚ. 4.3 Cztery kolejne bariery między paliwem a otoczeniem – jak w matryosce. Substancje promieniotwórcze, aby się wydostać do otoczenia, musiałyby przejść przez kilka barier.



CIĘKAWOSTKA

Obudowa bezpieczeństwa to nie jedna, lecz dwie ściany – o różnych zadaniach. Wewnętrzna powłoka jest w stanie wytrzymać nadciśnienie wewnętrzne 2,5 do 5,5 bara: była ze sprężonego żelbetu spiętego stalowymi cięgnami. Otacza ją zewnętrzny budynek osłonowy z betonu o grubości 1–1,5 m, który przejmuje ciosy z zewnątrz – aż po uderzenie dużego samolotu pasażerskiego. Wymagają tego wprost polskie przepisy.

część fragmentów rozszczepienia i produktów ich rozpadu promieniotwórczego. Większość promieniotwórczych atomów nigdy nie opuszcza pastylki, w której powstała.

Gdyby nasz atom – jako jeden z nielicznych – przedostał się na powierzchnię pastylki, natrafiłby na barierę drugą: **koszulkę paliwową**. To szczelnie zaspawana rurka ze stopu cyrkonu, w której pastylki umieszczone są w kolumnie jedna za drugą. Dopóki koszulka pozostaje szczelna – a w normalnej eksploatacji pozostaje – substancje promieniotwórcze, jeśli wydostaną się z pastylki, gromadzą się w wolnej przestrzeni wewnątrz koszulki i tam kończą podróż.

Trzecią barierą jest **granica obiegu pierwotnego**: gruby stalowy zbiornik reaktora o ściankach grubości rzędu 20 cm wraz z całym szczelnym obiegiem chłodzenia (zob. pyt. 8). Nawet gdyby koszulka uległa rozszczelnieniu, substancje promieniotwórcze pozostałyby zamknięte w wodzie obiegu pierwotnego, która jest zresztą stale oczyszczana i monitorowana.

I wreszcie bariera czwarta, największa: **obudowa bezpieczeństwa** – potężna, szczelna konstrukcja ze stali i betonu, o ścianach grubości rzędu metra. Obejmuje ona reaktor wraz z całym obiegiem pierwotnym i pracuje w obie strony: zatrzymuje wszystko wewnątrz, a zarazem chroni reaktor przed zagrożeniami z zewnątrz – aż po uderzenie samolotu (zob. pyt. 21).

Pomysł tkwi w niezależności barier: naruszenie jednej nie osłabia pozostałych. Aby substancje promieniotwórcze

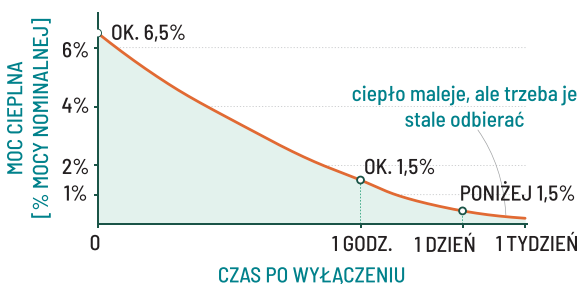
trafiły do otoczenia, wszystkie cztery musiałyby zostać zniszczone jednocześnie. Dlatego podczas normalnej pracy elektrowni na zewnątrz nie wydostaje się praktycznie nic – a śladowe, ściśle kontrolowane i mierzone uwolnienia odpowiadają dawkom setki razy mniejszym od naturalnego tła promieniowania jonizującego (zob. pyt. 51).

CZYM SĄ PASYWNE SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA I CO SIĘ STANIE, GDY ELEKTROWNIA STRACI ZASILANIE?

20

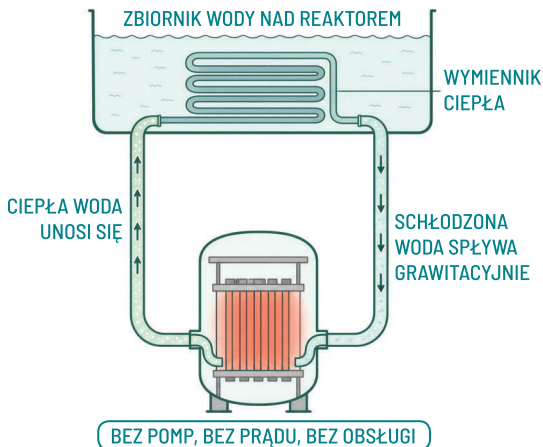
Zacznijmy od nieoczywistego faktu: wyłączony reaktor nie stygnie od razu. Choć reakcja łańcuchowa ustaje w kilka sekund, nagromadzone w paliwie fragmenty rozszczepienia rozpadają się dalej, wydzielając tzw. ciepło powyłączeniowe. Tuż po wyłączeniu jest to ok. 6,5% pełnej mocy, po godzinie już tylko ok. 1,5%, a po dobie – mniej niż pół procenta (rys. 4.4). Na tle normalnej pracy to niewiele, ale w liczbach bezwzględnych wciąż dziesiątki megawatów, które trzeba nieprzerwanie odprowadzać – inaczej rdzeń mógłby się przegrzać, a w skrajnym przypadku stopić.

GENERACJA CIEPŁA PO WYŁĄCZENIU REAKTORA



RYŚ. 4.4 Reakcja łańcuchowa ustaje w kilka sekund, wydzielanie ciepła – nie. Rdzeń oddaje jeszcze ok. 6,5% mocy nominalnej, po godzinie ok. 1,5%, po dobie mniej niż pół procenta. Maleje, ale odbierać je trzeba nieprzerwanie.

RYS. 4.5 System pasywny: ciepła woda unosi się, oddaje ciepło zbiornikowi nad reaktorem i grawitacyjnie spływa z powrotem – bez pomp, prądu i obsługi.



Na tym właśnie polegała awaria w Fukushima (zob. pyt. 63): reaktory wyłączyły się prawidłowo, ale fala tsunami zalała awaryjne generatory, a bez prądu elektrycznego stanęły pompy odbierające ciepło powyłączeniowe. Chłodzenie zależne od pomp i zasilania – podejście wykorzystujące systemy „aktywne” – okazało się piętą achillesową starszych konstrukcji.

CZY WIESZ, ŻE...

Nowoczesny reaktor – np. AP1000 – po utracie całego zasilania potrafi chłodzić się sam przez co najmniej 72 godziny bez jakiegokolwiek interwencji człowieka – a z minimalną pomocą praktycznie bez ograniczeń.

Odpowiedzią nowoczesnych projektów są pasywne systemy bezpieczeństwa (rys. 4.5). Zamiast pomp i prądu wykorzystują one siły, których nie sposób wyłączyć: grawitację i cyrkulację naturalną. Rozgrzana w rdzeniu woda sama unosi się ku górze, oddaje ciepło w wymienniku zanurzonego w wielkim zbiorniku umieszczonym wysoko nad reaktorem, a schłodzona – grawitacyjnie spływa z powrotem w dół. Powstaje samoczynny obieg, który nie potrzebuje ani jednej pompy, ani jednego wata energii, ani decyzji operatora. To ta sama zasada, która przez dziesięciolecia napędzała wodę w ogrzewaniu grawitacyjnym przedwojennych kamienic – tyle że zaprzęgnięta do najważniejszego zadania w elektrowni.

Czy naprawdę nic nie musi „zadziać”? Prawie nic. Do uruchomienia niektórych układów potrzebne jest jeszcze otwarcie kilku zaworów – ale i je zaprojektowano według

zasady fail-safe: w gotowości utrzymuje je sprężyna albo sprężony gaz, a zanik zasilania sprawia, że zawór sam się otwiera. Brak prądu nie wyłącza więc zabezpieczeń – przeciwnie, właśnie je uruchamia.

Jak długo taki reaktor poradzi sobie zupełnie sam? Konstrukcje generacji III+ chłodzą rdzeń, np. w AP1000, przez co najmniej 72 godziny bez zasilania i bez jakichkolwiek działań człowieka, a po tym czasie – przy minimalnej pomocy, takiej jak uzupełnienie wody w zbiorniku – praktycznie bez ograniczeń. Całkowita utrata zasilania, tzw. blackout, przestaje więc być jednym z najpoważniejszych scenariuszy awaryjnych: reaktor po prostu spokojnie się wychładza.

To jedna z najważniejszych zmian, jakie przyniosły reaktory nowej generacji. Bezpieczeństwo przestało zależeć od tego, czy zadziała pompa i czy na czas dojedzie paliwo do awaryjnego generatora – a zaczęło opierać się na grawitacji i konwekcji: prawach fizyki, których nie trzeba włączać i których nie sposób wyłączyć.

JAK PROJEKTUJE SIĘ ELEKTROWNIĘ NA ZDARZENIA EKSTREMALNE – TRZĘSIENIA ZIEMI, POWODZIE, UPADEK SAMOLOTU?

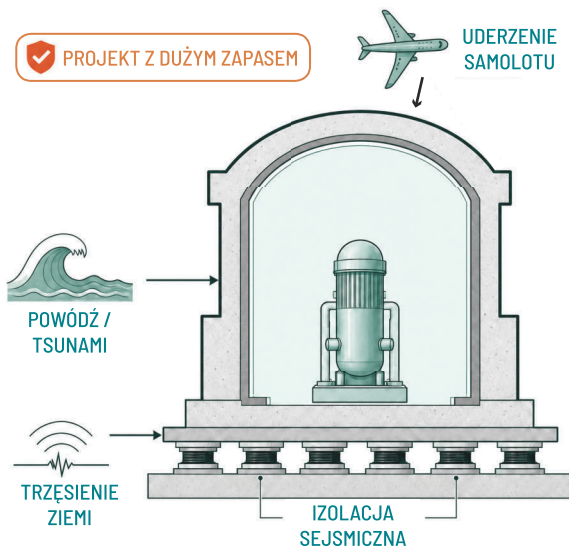
21

Punktem wyjścia jest rzetelne rozpoznanie wszystkich wiarygodnych zagrożeń zewnętrznych w danej lokalizacji: trzęsień ziemi, powodzi i fal tsunami, ekstremalnej pogody – huraganów, tornad, gradu, wielkiego mrozu – a także zagrożeń spowodowanych przez człowieka, jak uderzenie samolotu czy wybuch w pobliskim zakładzie. Dla każdego z nich wyznacza się następnie wymaganie projektowe: poprzeczkę zawieszoną znacznie wyżej niż najgorsze zdarzenie zapisane w historii lub w śladach geologicznych danego miejsca (rys. 4.6).

Zacznijmy od trzęsień ziemi. Pierwszą linią obrony jest sam wybór miejsca: unika się lokalizacji o niedopuszczalnych właściwościach geologicznych, a dla wybranego

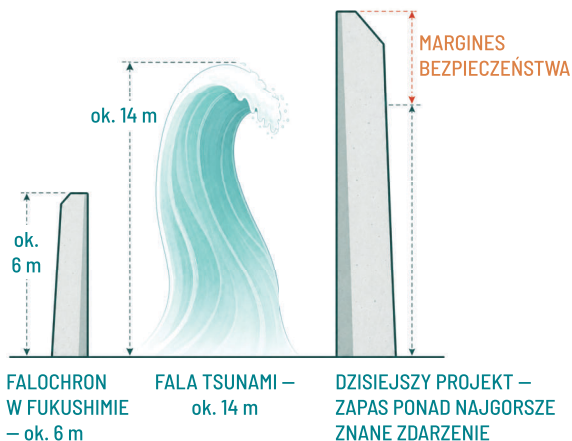
RYS. 4.6

Obudowa bezpieczeństwa chroni reaktor przed zagrożeniami zewnętrznymi – projektowana z dużym zapasem ponad najgorsze zdarzenia.



miejsca szczegółowo wyznacza się zagrożenie sejsmiczne. Zgodnie z polskimi przepisami projektowe zdarzenie sejsmiczne przyjmuje się dla powtarzalności raz na 10 000 lat. Konstrukcję projektuje się na wypadek silnego wstrząsu, przy czym kluczowe budynki i urządzenia muszą po takim wstrząsie nie tylko pozostać nienaruszone, ale i dalej pełnić funkcje bezpieczeństwa. W niektórych projektach stosuje się dodatkowo izolację sejsmiczną: specjalne łożyska między fundamentem a budynkiem, które niczym amortyzatory odcinają konstrukcję od drgań gruntu.

Przed wielką wodą chroni przede wszystkim wysokość: teren elektrowni wynosi się ponad poziom najwyższej wiarygodnej powodzi, a newralgiczne urządzenia – jak awaryjne generatory – umieszcza w miejscach osłoniętych i uszczelnionych. To właśnie tu kryła się najboleśniej-sza lekcja Fukushima: falochron projektowano na fale do ok. 6 m, a tsunami z 2011 r. miało w tym miejscu ok. 14 m i załapało pomieszczenia z generatorami (rys. 4.7). Dzisiejsze wymagania każą przyjmować zapas znacznie ponad



RYS. 4.7 Lekcja Fukushima: falochron projektowano na ok. 6 m, fala miała ok. 14 m. Dziś projektuje się z zapasem znacznie ponad najgorsze znane zdarzenie.

najgorsze zdarzenie znane z historii i geologii danego wybrzeża.

Na zagrożenia spowodowane przez człowieka odpowiada przede wszystkim obudowa bezpieczeństwa (zob. pyt. 19): potężna powłoka z żelbetu, zaprojektowana tak, aby wytrzymać nawet celowe uderzenie dużego samolotu pasażerskiego. Osobno chroni się układy chłodzenia i sterowania, rozmieszczając je w oddalonych od siebie, wzmocnionych częściach obiektu – tak, aby jedno zdarzenie nie mogło spowodować utraty wszystkich naraz.

Po awarii w Fukushima wszystkie elektrownie jądrowe w Unii Europejskiej przeszły ponadto tzw. testy wytrzymałościowe (ang. stress tests), w których sprawdzano, czy przetrwają zdarzenia jeszcze bardziej ekstremalne, niż zakładano przy ich budowie. Idea pozostaje jedna: nie chodzi o to, aby przewidzieć przyszłość co do metra i co do roku, lecz by margines bezpieczeństwa był tak duży, że nawet zdarzenie gorsze od wszystkiego, co zna historia, nie zaskoczy konstrukcji.

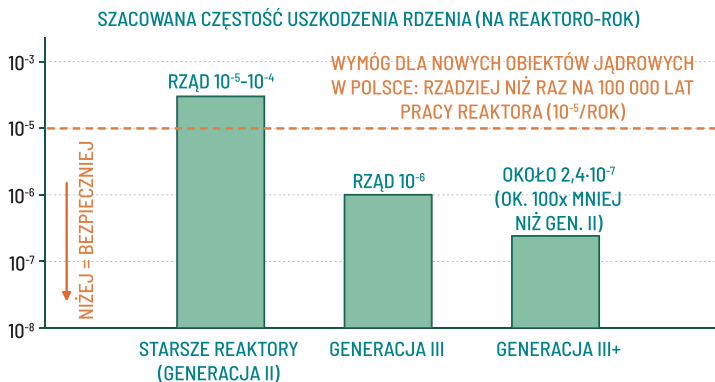
CZY WIESZ, ŻE...

Pierwszym „systemem bezpieczeństwa” jest sam wybór miejsca.

Zanim powstanie projekt, lokalizację prześwietla się pod kątem sejsmiki, hydrologii i pogody na podstawie danych sięgających setek, a nierzadko tysięcy lat wstecz – a wymagania projektowe ustawa się z zapasem ponad najgorsze znalezione zdarzenie.

JAK INŻYNIEROWIE SZACUJĄ RYZYKO POWAŻNEJ AWARII I CO MÓWIĄ WYNIKI TYCH ANALIZ?

S kąd właściwie wiadomo, że ryzyko poważnej awarii jest małe? Nie z zapewnień, lecz z rachunku. Służy do tego probabilistyczna analiza bezpieczeństwa (ang. Probabilistic Safety Assessment, PSA) – metoda przypominająca rozrysowanie mapy wszystkich dróg, którymi zdarzenia mogłyby prowadzić do szkody. Dla każdego zdarzenia zdolnego zapoczątkować awarię – od pęknięcia rury, przez pożar, po utratę zasilania – rozpisuje się drzewo dalszych możliwości: które zabezpieczenia musiałyby po kolei zawieść, aby sprawy potoczyły się źle. Każdej gałęzi przypisuje się prawdopodobieństwo oparte na danych o niezawodności urządzeń i na doświadczeniu eksploatacyjnym, a następnie mnoży się je wzdłuż całej



RYS. 4.8 Z każdą generacją reaktorów szacowane ryzyko uszkodzenia rdzenia maleje – reaktory generacji III+ są pod tym względem około sto razy bezpieczniejsze od starszych konstrukcji. Oś pionowa jest logarytmiczna: każda kolejna linia oznacza częstość dziesięciokrotnie mniejszą. Linia przerywana to próg wymagany w Polsce od projektów nowych elektrowni jądrowych – degradacja rdzenia rzadziej niż raz na 100 000 lat pracy reaktora (§ 10 pkt 1 rozporządzenia Rady Ministrów z 31 sierpnia 2012 r., Dz.U. 2012 poz. 1048). Wartości jako rzędy wielkości. Źródła: AP1000 Design Control Document, rozdz. 19 ($2,41 \times 10^{-7}$ /rok); EPRI 2008 i badanie KE 2003.



RYS. 4.9 Nie każde zakłócenie kończy się awarią, a nie każda awaria – uwolnieniem. Spośród usterek i zakłóceń, które zdarzają się w każdej elektrowni, tylko znikoma część mogłaby doprowadzić do uszkodzenia rdzenia – dla reaktorów generacji III+ to rząd 10^{-7} na reaktor-rok. Scenariusz prowadzący do dużego uwolnienia substancji promieniotwórczych jest jeszcze około dziesięciokrotnie rzadszy od uszkodzenia rdzenia. Szerokości trapezów są poglądowe.

drogi. Tysiące takich scenariuszy składają się na jedną odpowiedź: jak często, statystycznie, mogłoby dojść do poważnej szkody.

Najważniejszą liczbą uzyskiwaną z tych analiz jest częstość uszkodzenia rdzenia (ang. core damage frequency, CDF): ile razy – w przeliczeniu na rok pracy jednego reaktora – mogłoby statystycznie dojść do uszkodzenia paliwa w rdzeniu. Dla nowoczesnych reaktorów generacji III+ wynik jest rzędu jednego zdarzenia na milion do dziesięciu milionów lat pracy reaktora. Dla reaktora AP1000 wartość projektowa to ok. $2,4 \times 10^{-7}$ na rok – około sto razy mniej niż w typowych reaktorach pracujących obecnie (rys. 4.8)¹. Mówiąc wprost: to zdarzenie skrajnie rzadkie.

ZAPAMIĘTAJ!

Ryzyka nie da się sprowadzić do zera – można je jednak oszacować, ujawnić i systematycznie zmniejszać. W energetyce jawdrowej wyniki tych rachunków są jawne, weryfikuje je niezależny dozór, a każda kolejna generacja reaktorów obniża je.

¹Westinghouse Electric Company, „AP1000 Design Control Document”, Rev. 19, Tier 2, rozdz. 19 (Probabilistic Risk Assessment).

WARTO WIEDZIEĆ

Co właściwie znaczy „raz na milion lat”? Gdyby na świecie pracowało tysiąc reaktorów o takim poziomie ryzyka, jedno- go uszkodzenia rdzenia należało- by statystycznie oczekiwać raz na tysiąc lat – czyli, w skali dziejów, mniej więcej raz od czasów Bolesława Chrobrego. A i wtedy obudowa bezpieczeństwa najpewniej zatrzymałaby substancje promieniotwórcze wewnątrz.

I rzecz kluczowa: nawet uszkodzenie rdzenia nie oznacza jeszcze skażenia otoczenia (rys. 4.9). Na drodze wciąż sto- ją kolejne bariery, przede wszystkim obudowa bezpieczeń- stwa (zob. pyt. 19). Dlatego częstość tzw. dużego uwolnie- nia substancji promieniotwórczych do otoczenia jest jesz- cze wielokrotnie niższa niż częstość samego uszkodzenia rdzenia – dla AP1000 to rząd 10^{-8} na rok. To „obrona w głąb” (zob. pyt. 18) wyrażona liczbami: każda kolejna warstwa zabezpieczeń czyni najgorszy scenariusz jeszcze mniej prawdopodobnym.

Co ważne, analizy te nie służą jedynie do wystawiania „cen- zurki”. Ich największą praktyczną wartością jest wskazy- wanie najłagodniejszych ogniw: jeśli rachunek pokaże, że jakiś scenariusz waży w ryzyku więcej niż inne, właśnie tam kieruje się ulepszenia – dodatkowe zabezpieczenie, zmie- nioną procedurę, częstszą kontrolę. Analiz nie wykonuje się też raz na zawsze: aktualizuje się je przez całe życie elektrowni, a ich wyniki weryfikuje niezależny dozór ją- drowy (zob. dział V). Uczciwa puenta brzmi: ryzyko nigdy nie jest zerowe, bo nic na świecie nie jest stuprocentowo pewne. Ale w energetyce jądrowej jest ono policzone, jaw- ne i utrzymywane na skrajnie niskim poziomie – a z każdą kolejną generacją reaktorów jeszcze maleje.

Report, który przewidział awarię

W 1975 r. zespół prof. N. Rasmussena opublikował WASH-1400 – pierwszą peł- ną ilościową ocenę ryzyka awarii reaktorów. Wyko- rzystano drzewa zdarzeń i uszkodzeń, znane wcze- śniej z techniki rakietowej i lotnictwa.

Report wskazał, że zagroże- niem są nie tylko pęknięcia wielkich rurociągów, lecz

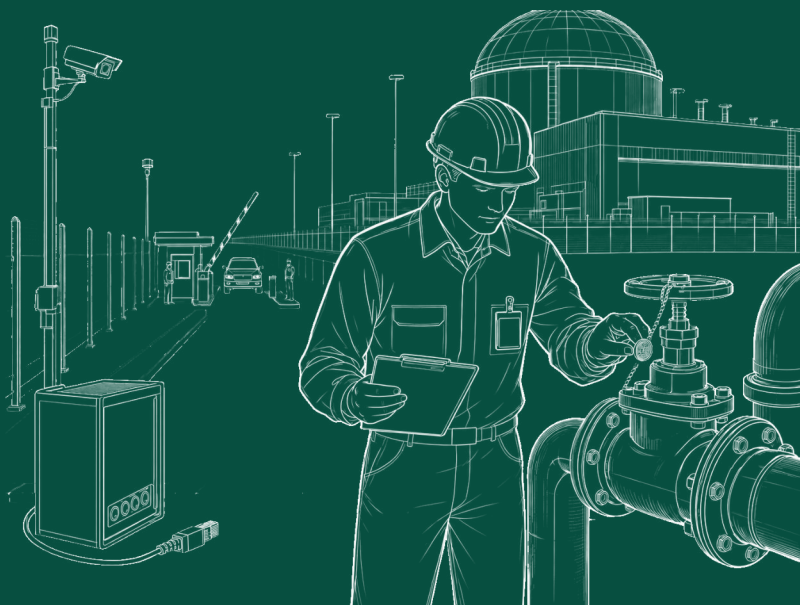
także małe utraty chłodzi- wa połączone z błędami operatorów.

Niespełna cztery lata póź- niej, 28 marca 1979 r., podob- ny splot zdarzeń wystąpił w Three Mile Island: zawór upustowy utknął w położe- niu otwartym, wskazania były mylące, a operatorzy ograniczyli dopływ wody chłodzącej. Rdzeń części- wo się stopił, lecz bariery zatrzymały większość sub- stancji promieniotwórczych.



Norman Carl Rasmussen

DZIAŁ V

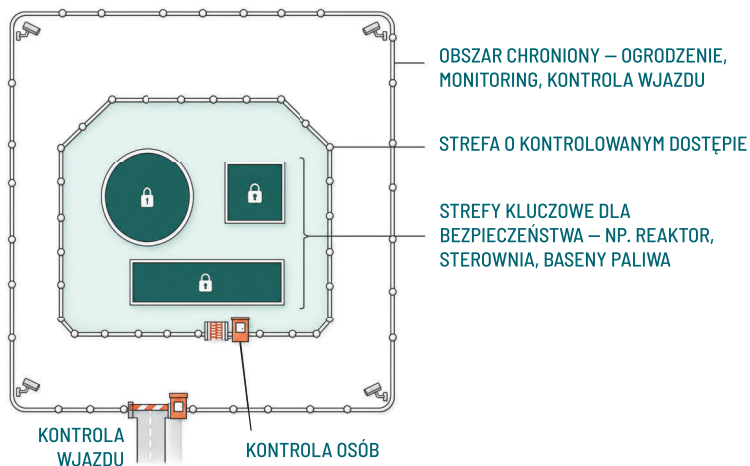


**ochrona
i nadzór**

JAK ZAPOBIEGA SIĘ SABOTAŻOWI I ATAKOM TERRORYSTYCZNYM NA ELEKTROWNIĘ JĄDROWĄ?

Zacznijmy od rozróżnienia dwóch angielskich pojęć: „safety” i „security”, które w języku polskim określamy jednym słowem – bezpieczeństwo. Bezpieczeństwo, o którym mówiliśmy w poprzednim dziale, to ochrona przed awarią – przed tym, co może pójść źle „samo”, wskutek usterki, błędu czy żywiołu. Ten rodzaj bezpieczeństwa odpowiada angielskiemu słowu „safety”. Natomiast bezpieczeństwo polegające na obronie przed celowym, wrogim działaniem człowieka – sabotażem, dywersją, atakiem terrorystycznym lub próbą kradzieży materiałów jądrowych – to ochrona fizyczna, odpowiadająca angielskiemu słowu „security”.

Obie dziedziny łączy jednak filozofia znana już z techniki reaktorowej (zob. pyt. 18): nie jedna „doskonała” zaporą, lecz wiele wzajemnie uzupełniających się warstw.



RYS. 5.1 Ochrona warstwowa: od zewnętrznego obszaru chronionego, przez strefę kontrolowanego dostępu, po strefy kluczowe dla bezpieczeństwa wokół reaktora.



RYS. 5.2 Na ochronę składają się ludzie i procedury.

Warstwę pierwszą widać już z daleka: to strefy dostępu (rys. 5.1). Teren elektrowni tworzy układ zagnieżdżonych pierścieni. Najpierw zewnętrzna strefa chroniona – ogrodzenia, czujniki, monitoring, kontrola każdego wjazdu. Dalej strefa wewnętrzna, do której wchodzi się wyłącznie z odpowiednimi uprawnieniami, przez bramki i śluzy. Wreszcie strefy kluczowe dla bezpieczeństwa: reaktor, sterownia, baseny wypalonego paliwa. Im bliżej serca obiektu, tym więcej barier i kontroli trzeba pokonać – i tym krótsza lista osób, które w ogóle mają tam prawo wstępu.

Warstwa druga to ludzie (rys. 5.2). Zanim ktokolwiek otrzyma przepustkę, przechodzi szczegółowe sprawdzenie, a wstęp do miejsc newralgicznych odbywa się każdorazowo na podstawie uprawnień i potwierdzenia tożsamości. W strefach najważniejszych obowiązuje ponadto zasada dwóch osób: przy materiałach jądrowych nikt nie przebywa i nie pracuje w pojedynkę, bez świadka. Ta prosta reguła utrudnia działanie nie tylko intruzowi z zewnątrz, lecz także – co równie istotne – potencjalnemu nieuczciwemu pracownikowi.

Warstwa trzecia to wyspecjalizowana ochrona fizyczna: uzbrojone, zawodowo wyszkolone formacje, które regularnie ćwiczą scenariusze napaści i na co dzień współpracują ze służbami państwa. Co ważne, ich liczebności i wyposażenia nie dobiera się „na wyczucie”. Punktem wyjścia jest tzw. zagrożenie projektowe – opracowywany wspólnie ze służbami i regularnie aktualizowany scenariusz realistycznej napaści, określający m.in. liczebność, wyposażenie i sposób działania hipotetycznych napastników, których

CZY WIESZ, ŻE...

W 1988 r. w laboratoriach Sandia myśliwiec F-4D Phantom uderzył z prędkością ok. 770 km/h w żelbetowy blok grubości 3,66 m. Samolot został całkowicie zniszczony, a beton uszkodzony najwyżej na 6 cm. Nie był to jednak test obudowy reaktora, lecz pomiar siły uderzenia.



RYŚ. 5.3 Elektrownia Barakah w budowie (2017). Obudowy bezpieczeństwa – grube na około metr powłoki z żelbetu – zostaną z reaktorami przez całe ich życie.

ZAPAMIĘTAJ!

Bezpieczeństwo jądrowe chroni przed awarią, ochrona fizyczna – przed celowym działaniem człowieka. Obie dziedziny stosują tę samą zasadę: wiele niezależnych warstw zamiast jednej „doskonałej” zapory.

system ochrony musi być w stanie powstrzymać. A czy rzeczywiście potrafi, sprawdza się w praktyce: w ćwiczeniach, w których rolę napastników odgrywa specjalnie przygotowany zespół pozorujący atak.

Warstwa czwarta nie robi nic – i właśnie w tym jej siła. Potężna, żelbetowa obudowa bezpieczeństwa (zob. pyt. 19 i 21), projektowana na skrajne obciążenia, z uderzeniem dużego samolotu włącznie, jest zarazem barierą, której nie sposób sforsować ani szybko, ani po cichu (rys. 5.3). Napastnik potrzebowałby czasu i ciężkiego sprzętu – a czas działa tu na korzyść obrońców.

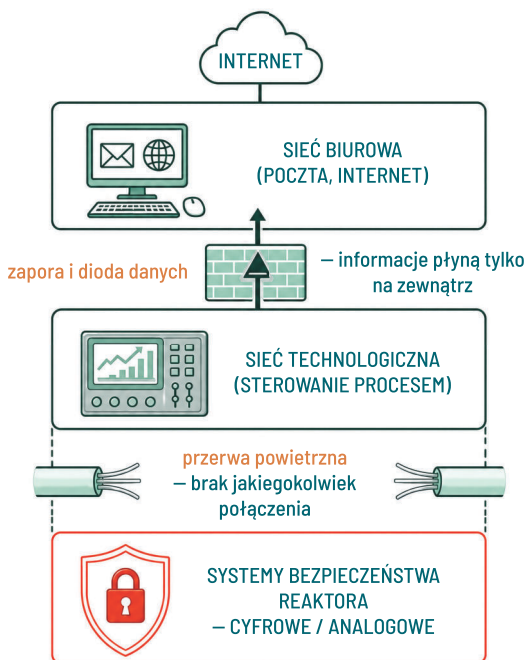
Wszystko to spina codzienna czujność załogi i kultura zgłaszania niepokojących sytuacji (zob. pyt. 27) – bo najlepszy system czujników nie zastąpi ludzi, którzy wiedzą, że nietypowe zdarzenie należy zgłosić, a nie zbagatelizować. Ochrona elektrowni jądrowej nie jest więc jednym murem, lecz systemem warstw: technicznych, ludzkich, proceduralnych i konstrukcyjnych. Aby doszło do realnego zagrożenia, wszystkie musiałyby zawieść jednocześnie – i właśnie na tym polega pomysł.

CZY ELEKTROWNIĘ JĄDROWĄ MOŻNA „ZHAKOWAĆ”? O CYBERBEZPIECZEŃSTWIE SYSTEMÓW STEROWANIA

24

S koro cyberprzestępcy potrafią sparaliżować banki, szpitale i całe sieci handlowe, pytanie nasuwa się samo: czy mogliby przejąć reaktor? Obawa jest zrozumiała – i właśnie dlatego kluczowe systemy elektrowni zaprojektowano tak, aby scenariusz „włamania przez internet” był nie tyle trudny, ile fizycznie niewykonalny.

Fundamentem jest separacja sieci (rys. 5.4). Elektrownia nie ma jednej sieci komputerowej, lecz kilka rozdzielonych warstw o różnym znaczeniu. Sieć biurowa – z pocztą i dostępem do internetu – służy administracji i nigdy nie



RYŚ. 5.4 Sieci elektrowni są rozdzielone: między warstwami dane płyną tylko w jedną stronę, a najważniejsze układy bezpieczeństwa nie mają żadnego połączenia ze światem zewnętrznym.

WARTO WIEDZIEĆ

Najśłynniejszy cyberatak na obiekt jądrowy – wykryty w 2010 r. robak Stuxnet – nie dotyczył elektrowni, lecz zakładu wzbogacania uranu. Nie przyszedł też „z internetu”: systemy w Natanie były od niego odcięte, a szkodliwy kod trafił do środka najprawdopodobniej na przenośnym nośniku danych. Dlatego w elektrowni jądrowej zwykła pamięć USB traktowana jest niemal jak materiał niebezpieczny: podlega ewidencji i kontroli przed każdym użyciem.

styka się ze sterowaniem reaktorem. Głębiej leży sieć technologiczna, nadzorująca proces wytwarzania energii. A najgłębiej – układy bezpieczeństwa reaktora, oddzielone od świata zewnętrznego tzw. przerwą powietrzną: nie prowadzi do nich żaden kabel ani łącze radiowe. Nie da się zdalnie sięgnąć do czegoś, co z niczym nie jest połączone.

Tam, gdzie warstwy muszą wymieniać dane – na przykład po to, by wyniki pomiarów trafiały do systemów raportowania – stosuje się zapory oraz tzw. diody danych: urządzenia przepuszczające informacje wyłącznie w jedną stronę, na zewnątrz. Działają jak zawór zwrotny w instalacji wodnej: dane mogą wypłynąć, ale nic nie może wpłynąć do środka.

Druga zasada brzmi: w funkcjach krytycznych sprzęt zamiast oprogramowania. Najważniejsze zabezpieczenia – z awaryjnym wyłączeniem reaktora na czele (zob. pyt. 10) – realizuje się sprzętowo, mechanicznie albo w prostej technice analogowej. Pręty bezpieczeństwa wpadają do rdzenia pod własnym ciężarem, gdy tylko zniknie prąd w podtrzymujących je elektromagnesach. Zabezpieczenie zadziała, bo takie są prawa fizyki, a nie dlatego, że jakiś program wykonał zadanie. W układzie, w którym nie ma kodu, dosłownie nie ma czego „zhakować”.

Do tego dochodzą warstwy organizacyjne: ścisła kontrola nośników danych (każda pamięć USB jest ewidencjonowana i sprawdzana, zanim w ogóle zbliży się do systemów technologicznych), monitorowanie ruchu w sieciach i rygorystyczne procedury dostępu. W nowych elektrowniach obowiązuje ponadto zasada różnorodności: rezerwowe systemy bezpieczeństwa buduje się w innej technice niż podstawowe, aby jeden błąd projektowy czy programistyczny nie mógł dotknąć obu naraz. Całość podlega wytycznym Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej i kontroli dozoru jądrowego (zob. pyt. 26). Cyberbezpieczeństwo elektrowni opiera się więc na tej samej filozofii co wszystko inne w tej publikacji: na wielu niezależnych warstwach – i na tym, że to, co najważniejsze, w ogóle nie zależy od podatnego na błędy oprogramowania.

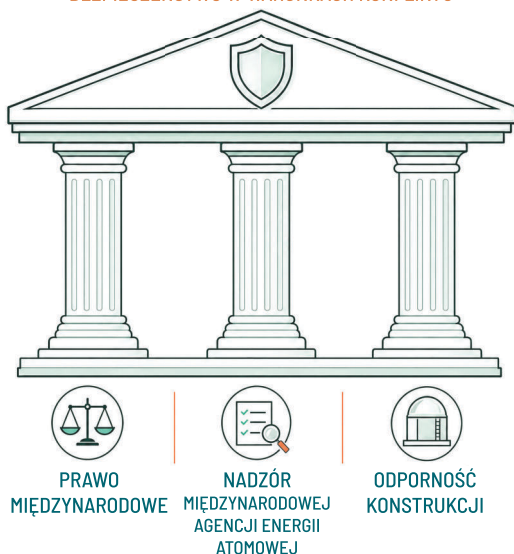
CO Z BEZPIECZEŃSTWEM ELEKTROWNI JĄDROWYCH W CZASIE KONFLIKTU ZBROJNEGO?

25

Na to pytanie nie ma czysto technicznej odpowiedzi. Bezpieczeństwo elektrowni w warunkach konfliktu zbrojnego opiera się na trzech filarach (rys. 5.5), z których tylko jeden jest dziełem inżynierów.

Filar pierwszy to prawo. Międzynarodowe prawo humanitarne – konwencje genewskie wraz z protokołami dodatkowymi – otacza elektrownie jądrowe szczególną ochroną: wymienia je, obok zapór wodnych i wałów przeciwpowodziowych, wśród „budowli i urządzeń zawierających niebezpieczne siły” – czyli obiektów, w których uwięziony jest żywioł zdolny wyrwać się na zewnątrz: masy spiętrzonej wody albo substancje promieniotwórcze. Atakowanie ich jest zakazane, jeżeli mogłoby ten żywioł uwolnić i spowodować dotkliwe straty wśród ludności

BEZPIECZEŃSTWO W WARUNKACH KONFLIKTU



RYS. 5.5 Trzy filary bezpieczeństwa elektrowni w warunkach konfliktu: prawo międzynarodowe, nadzór MAEA i wytrzymałość konstrukcji.



RYŚ. 5.6 Trzy pomarańczowe koła – międzynarodowy znak obiektów zawierających niebezpieczne siły.

cywilnej². Obiekty takie wolno oznaczać specjalnym znakiem – trzema jasnopomarańczowymi kołami na wspólnej osi (rys. 5.6) – pełniącym funkcję ochronną podobną do czerwonego krzyża.

ZAPAMIĘTAJ!

Zapas odporności elektrowni jądrowej nie wziął się z myślenia o wojnie. Obiekty jądrowe od zawsze projektuje się na ekstremalne zdarzenia zewnętrzne – trzęsienia ziemi, powodzie, huragany, uderzenie samolotu – i ten sam margines wytrzymałości pracuje w każdych okolicznościach.

Filar drugi to nadzór międzynarodowy. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej monitoruje sytuację, dostarcza ekspertyz i sformułowała siedem filarów, które muszą pozostać zachowane, aby obiekt jądrowy był bezpieczny nawet w trudnych warunkach – m.in. nienaruszalność fizyczna obiektu, sprawność systemów bezpieczeństwa, ciągłość zasilania, możliwość pracy obsługi bez nacisków, sprawna łączność i monitoring promieniowania.

Filar trzeci to konstrukcja. Obudowa bezpieczeństwa, projektowana na skrajne obciążenia – w tym uderzenie samolotu (zob. pyt. 21) – daje reaktorowi znaczną odporność fizyczną, a pasywne układy bezpieczeństwa (zob. pyt. 20) pozwalają bezpiecznie go wyłączyć i schładzać nawet po utracie zasilania. Co ważne, reaktor można też wyłączyć zapobiegawczo, z wyprzedzeniem. Ciepłota powyłaczeniowe maleje z każdą godziną i każdym dniem, lecz cały czas musi być odbierane, dlatego reaktor jest wyposażony w wiele aktywnych i pasywnych systemów chłodzenia.

²Art. 56 Protokołu dodatkowego do konwencji genewskich z 12 sierpnia 1949 r., dotyczącego ochrony ofiar międzynarodowych konfliktów zbrojnych (Protokół I), sporządzonego w Genewie 8 czerwca 1977 r. (Dz. U. 1992 nr 41 poz. 175). Polska jest jego stroną od 23 kwietnia 1992 r. Ochrona ta nie jest bezwarunkowa: zgodnie z ust. 2 ustaje ona wobec elektrowni jądrowej, jeżeli dostarcza ona prądu do regularnego, istotnego i bezpośredniego wsparcia operacji wojskowych, a atak jest jedynym możliwym sposobem przerwania tego wsparcia. Analogiczną ochronę w konfliktach niemiedzynarodowych przewiduje art. 15 Protokołu II.

Trzeba jednak powiedzieć uczciwie: żadnego obiektu cywilnego nie projektuje się z myślą o tym, że stanie się celem militarnym, a przedłużające się działania zbrojne niosą ryzyka wykraczające poza samą inżynierię. Pokazała to wojna za naszą wschodnią granicą: Zaporoska Elektrownia Jądrowa, największa w Europie, od 2022 r. znajduje się w strefie działań wojennych i wielokrotnie traciła zasilanie z sieci zewnętrznej. Prawo międzynarodowe i niezależny nadzór nie są więc gwarancją – są najmocniejszym narzędziem, jakim dysponuje społeczność międzynarodowa: wyznaczają granicę, której przekroczenie jest naruszeniem prawa, i pozwalają to udokumentować. To zagadnienie z pogranicza techniki, prawa i polityki. Tu przedstawiamy je wyłącznie na poziomie ogólnych zasad.

KTO PATRZY ELEKTROWNI JĄDROWEJ NA RĘCE?

26

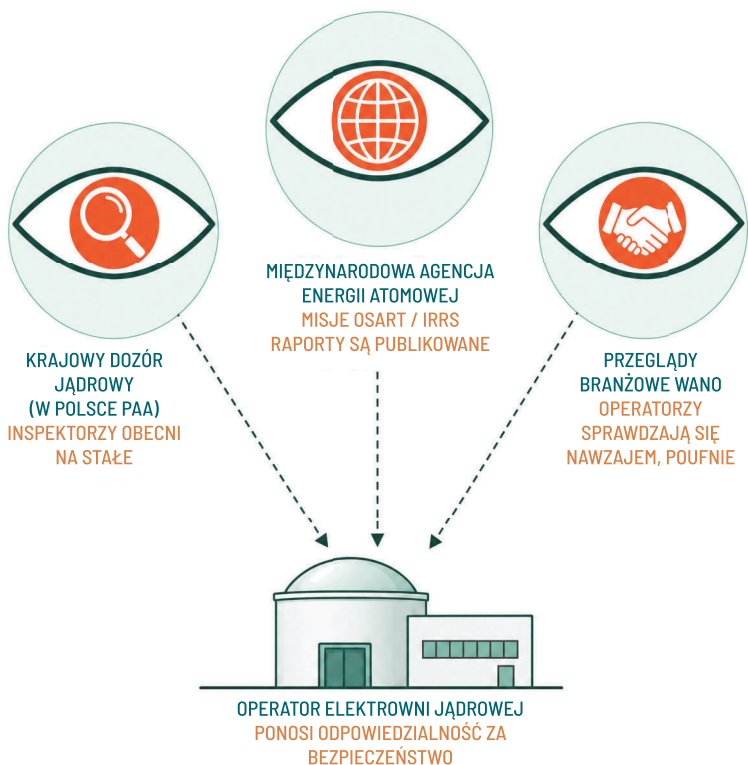
Zaufanie jest w energetyce jądrowej miłym dodatkiem – podstawą jest weryfikacja. Nad każdą elektrownią czuwa kilka niezależnych od siebie instytucji, z których każda patrzy z innej perspektywy i ma inne uprawnienia (rys. 5.7).

Krajowy dozór jądrowy. Pierwsza i najważniejsza warstwa jest państwowa: dozór jądrowy, w Polsce Państwowa Agencja Atomistyki (zob. pyt. 7). To niezależny urząd, który wydaje zezwolenia na każdy etap życia obiektu, prowadzi inspekcje i dysponuje twardymi sankcjami – z nakazem wstrzymania pracy reaktora włącznie. W dużych elektrowniach inspektorzy dozoru pracują na stałe, na miejscu, z prawem wejścia do każdego pomieszczenia o każdej porze dnia i nocy (rys. 5.8).

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA). Drugą parę oczu zapewniają eksperckie misje MAEA, przyjeżdżające na zaproszenie państwa. Misja OSART (Operational Safety Review Team) ocenia bezpieczeństwo eksploatacji konkretnej elektrowni, ze szczególnym

ZAPAMIĘTAJ!

Nadzór nad elektrownią jądrową nie opiera się na zaufaniu, lecz na weryfikacji – prowadzonej przez kilka niezależnych od siebie instytucji, z których każda patrzy z innej perspektywy i sprawdza pozostałe.



RYS. 5.7 Kilka niezależnych warstw nadzoru elektrowni jądrowej.

uwzględnieniem czynnika ludzkiego. Misja IRRS (Integrated Regulatory Review Service) sprawdza natomiast... sam dozór – czy krajowy urząd kontrolny rzeczywiście dobrze wykonuje swoją pracę. To odpowiedź na odwieczne pytanie, kto pilnuje pilnujących. Wnioski misji są jawne: każdy może przeczytać, co zalecono i co poprawiono.

Przeglądy branżowe (WANO). Najciekawsza jest warstwa trzecia. Po katastrofie w Czarnobylu operatorzy elektrowni z całego świata – ponad rywalizacją i podziałami zimnej wojny – założyli w 1989 r. Światowe Stowarzyszenie Operatorów Jądrowych (WANO). Należą do niego opera-



RYS. 5.8 Inspektorzy amerykańskiego dozoru jądrowego kontrolują aparaturę do pomiaru szczelności obudowy bezpieczeństwa w elektrowni St. Lucie na Florydzie. W dużych elektrowniach inspektorzy dozoru obecni są na stałe.

torzy wszystkich cywilnych elektrowni jądrowych świata, a sednem jego działania są przeglądy partnerskie (peer review): co kilka lat zespół doświadczonych praktyków z innych elektrowni przez kilka tygodni patrzy kolegom na ręce i wskazuje, w czym odstają od najlepszych. Wyniki są poufne — właśnie po to, by rozmowa mogła być całkowicie szczerą — a motywacja prosta: w tej branży awaria u jednego jest problemem wszystkich.

Klamrą spinającą całość są międzynarodowe konwencje — jak Konwencja bezpieczeństwa jądrowego — zobowiązujące państwa do okresowego, wzajemnego przeglądu swoich systemów bezpieczeństwa. W efekcie elektrownię regularnie ogląda kilka niezależnych instytucji: krajowa, międzynarodowa i branżowa, urzędowa i ekspercka, jawna i poufna. Trudno wskazać drugą gałąź przemysłu nadzorowaną równie intensywnie i z tylu stron naraz. A krajowy nadzór to nie tylko PAA — Urząd Dozoru Technicznego kontroluje m.in. zbiornik reaktora, wytwornice pary i inne urządzenia ważne dla bezpieczeństwa jądrowego.

WARTO WIEDZIEĆ

Polski dozór był oceniany przez misję IRRS dwukrotnie: w 2013 i 2023 r., a w 2017 r. sprawdzano, czy wcześniejsze założeń wdrożono. Zespół 15 ekspertów z 14 krajów uznał PAA za kompetentny urząd, ale wskazał też główne wyzwania: zapewnienie jej rzeczywistej niezależności i stabilnego finansowania. Raporty są jawne i dostępne na stronie PAA.

CZYM JEST KULTURA BEZPIECZEŃSTWA I DLACZEGO KAŻDY PRACOWNIK MA PRAWO PRZERWAĆ PRACĘ, GDY DOSTRZEŻE ZAGROŻENIE?

WARTO WIEDZIEĆ

Kultura bezpieczeństwa podlega ocenie tak samo jak stan techniczny elektrowni. Istnieją metody jej badania – ankiety, obserwacje odpraw, analiza zgłoszeń – a jej przeglądy są stałym elementem inspekcji dozorcu i przeglądów branżowych.

Najlepsza technika nie wystarczy, jeśli zawiedzie sposób myślenia ludzi, którzy się nią posługują. Ta lekcja płynie wprost z Czarnobyla: analizy katastrofy pokazały, że umożliwiły ją nie tylko wady konstrukcji, lecz także postawa – przekonanie obsługi i przełożonych, że procedury można naginać, a niewygodne sygnały pomijać. To właśnie wtedy, w raportach po awarii, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej ukuła pojęcie kultury bezpieczeństwa – i dziś traktuje się ją równie poważnie jak beton i stal. W praktyce opiera się ona na kilku prostych zasadach (rys. 5.9).

Postawa pytająca. W dobrej elektrowni nikt nie zakłada, że „na pewno jest dobrze”. Nietypowy odczyt, dziwny



RYŚ. 5.9 Cztery praktyki wzmacniające kulturę bezpieczeństwa.



RYS. 5.10 Kultura bezpieczeństwa to przede wszystkim ludzie – ich czujność i sposób myślenia o bezpieczeństwie.

dźwięk, niejasny zapis w procedurze – wszystko to jest powodem, aby zapytać i sprawdzić, a nie przejść obojętnie. Pomagają w tym proste narzędzia, jak powtarzana przed każdą niecodzienną czynnością reguła: zatrzymaj się – pomyśl – działaj – sprawdź.

Prawo do przerywania pracy. Każdy – od operatora reaktora po monter na rusztowaniu – może i powinien przerwać wykonywaną czynność, własną lub obserwowaną, jeśli dostrzeże zagrożenie. Nie oznacza to, rzecz jasna, że dowolny pracownik „wyłącza elektrownię”: o pracy reaktora decydują uprawnieni operatorzy, zgodnie z procedurami (zob. pyt. 12). Chodzi o coś innego – o to, że żadne polecenie, harmonogram ani presja terminu nie mogą zmusić człowieka do kontynuowania pracy, którą uważa za niebezpieczną, dopóki wątpliwość nie zostanie wyjaśniona. I o to, że za takie zatrzymanie nikt nie zostanie ukarany ani wysmiany – nawet jeśli alarm okaże się fałszywy.

Zgłaszanie bez kary. Za ujawnienie problemu – także własnej pomyłki – pracownik nie ponosi sankcji. Tylko wtedy usterki i błędy wychodzą na jaw wcześniej, póki są drobiazgami. Kultura karania sprawiłaby, że ludzie zaczęliby je ukrywać, a ukryty błąd to błąd, który narasta. Nie jest to jednak bezkarność: świadome i celowe łamanie zasad pozostaje niedopuszczalne. Tę granicę – chronimy zgłaszającego, nie lekceważącego – określa się mianem kultury sprawiedliwej.

Uczenie się na doświadczeniach. Wnioski z każdego istotnego zdarzenia, gdziekolwiek na świecie by zaszło,

CZY WIESZ, ŻE...

Pojęcie „kultury bezpieczeństwa” narodziło się po Czarnobylu – pojawiło się w pierwszym raporcie ekspertów MAEA z 1986 r., a szczegółowo opisano je pięć lat później. Od tamtej pory zrobiło karierę daleko poza energetyką: o kulturze bezpieczeństwa mówi się dziś w lotnictwie, kolejnictwie, górnictwie i szpitalach.

DO CZEGO SŁUŻY MIĘDZYNARODOWA SKALA INES I CO MÓWI O WADZE ZDARZEŃ?

ZAPAMIĘTAJ!

INES służy do informowania opinii publicznej, a nie do rankingów. Nie porównuje się na jej podstawie krajów ani elektrowni, a liczba zgłoszeń niskich poziomów mówi więcej o skrupulatności raportowania niż o stanie bezpieczeństwa. Wstępna ocena zdarzenia bywa też z czasem korygowana – w miarę jak przybywa danych.

są zbierane, analizowane i wdrażane w pozostałych elektrowniach (zob. pyt. 26 i 28). Branża jądrowa należy do niewielu, które konsekwentnie uczą się na cudzych błędach – po to, by nie musieć uczyć się na własnych.

Dlatego dozór i przeglądy (zob. pyt. 26) oceniają nie tylko stan urządzeń, lecz także te „miękkie” postawy: sposób prowadzenia odpraw, jakość zgłoszeń, reakcję przełożonych na złe wieści. Puenta jest prosta: bezpieczeństwo jądrowe w ostatecznym rachunku tworzą nie systemy, lecz ludzie – i ich codzienny sposób myślenia (rys. 5.10).

„W elektrowni X doszło do zdarzenia” – taki komunikat może znaczyć niemal wszystko: od usterki czujnika w budynku pomocniczym po poważną awarię. Aby cały świat mówił w tej sprawie jednym językiem, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej i Agencja Energii Jądrowej OECD wprowadziły w 1990 r. wspólną, zrozumiałą miarę: Międzynarodową Skalę Zdarzeń Jądrowych i Radiologicznych, w skrócie INES, ang. International Nuclear and Radiological Event Scale (rys. 5.11).

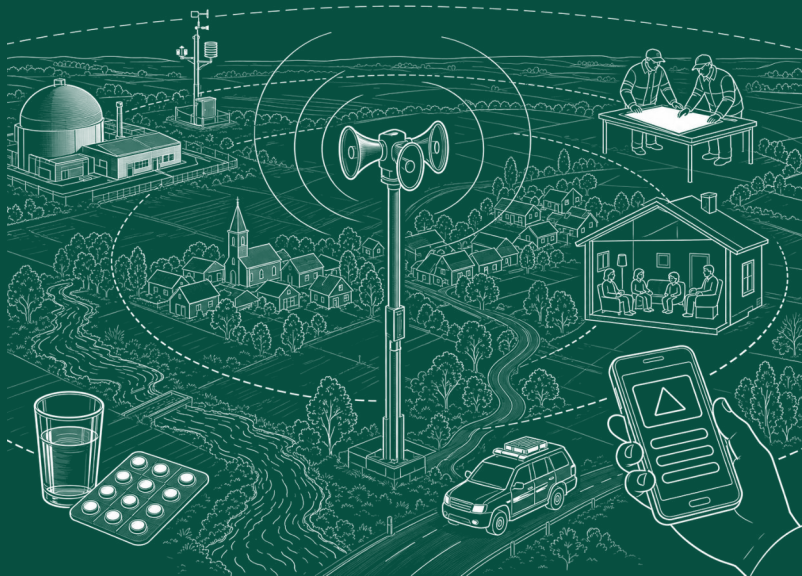
Skala obejmuje poziomy od 1 do 7, a zdarzenia bez znaczenia dla bezpieczeństwa oznacza się poziomem 0 (odchylenie). Poziomy 1–3 to incydenty – anomalia, incydent i poważny incydent – bez istotnych skutków poza terenem obiektu. Dopiero poziomy 4–7 oznaczają awarie, o skutkach od lokalnych po rozległe. Najwyższy, siódmy poziom przyznano w historii dwóm zdarzeniom: Czarnobylowi (1986) i Fukushima (2011). Awaria Three Mile Island (1979), najpoważniejsza w dziejach amerykańskiej energetyki, to poziom 5. Skala jest przy tym logarytmiczna: każdy kolejny poziom oznacza zdarzenie mniej więcej dziesięciokrotnie poważniejsze – zupełnie jak w skalach opisujących trzęsienia ziemi.



RYS. 5.11 Międzynarodowa Skala Zdarzeń Jądrowych i Radiologicznych INES (ang. International Nuclear and Radiological Event Scale).

Warto też wiedzieć, że INES nie ogranicza się do elektrowni jądrowych. Klasyfikuje się w niej także zdarzenia radiologiczne: zagubione źródła przemysłowe i medyczne, wypadki w transporcie, zdarzenia w laboratoriach. Niektóre z najpoważniejszych pozycji w historii skali nie mają z energetyką nic wspólnego.

I myśl najważniejsza, często rozumiana opacznie. To, że elektrownie jawnie zgłaszają i klasyfikują nawet zdarzenia poziomu 0 czy 1 – bez realnego znaczenia dla bezpieczeństwa – jest zaletą systemu, a nie znakiem, że „ciągle coś się dzieje”. Świadczy o przejrzystości i o tym, że niczego się nie ukrywa: raportuje się wszystko, również drobiazgi, aby móc wyciągać wnioski (zob. pyt. 27). Duża liczba zgłoszeń o niskich poziomach to dowód, że system działa – a nie że jest niebezpiecznie.

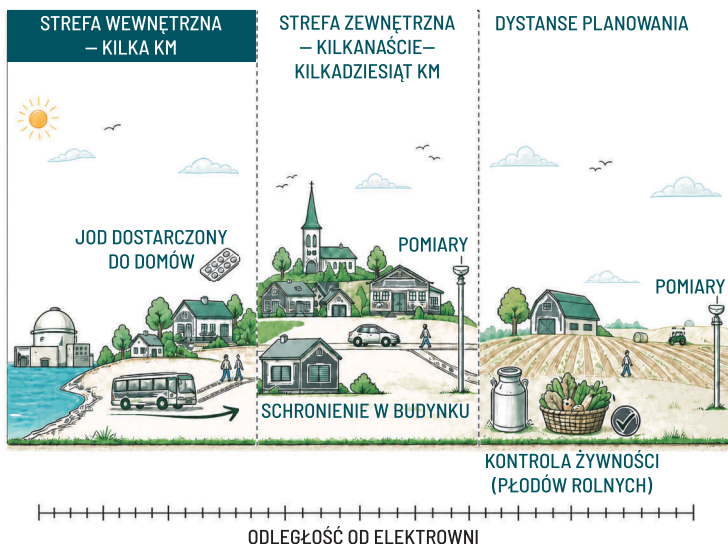


**przygotowani
na wszelki
wypadek**

CZYM SĄ STREFY PLANOWANIA AWARYJNEGO I SKĄD BIORĄ SIĘ ICH GRANICE?

29

W każdym hotelu na drzwiach pokoju wisi plan ewakuacji, a przepisy przeciwpożarowe wymagają, aby w szkołach, urzędach i biurach regularnie przeprowadzać próbne ewakuacje. Nikomu nie przychodzi przy tym do głowy, że budynek zaraz stanie w płomieniach – przeciwnie: obecność planu świadczy o tym, że ktoś pomyślał o bezpieczeństwie zawczasu. Dokładnie taką rolę pełnią strefy planowania awaryjnego wokół elektrowni jądrowej. Ich nazwa bywa myląca i budzi niepokój, choć oznacza coś wręcz uspokajającego: plan działania istnieje z dużym wyprzedzeniem, zanim jeszcze cokolwiek mogłoby się wydarzyć.



RYS. 6.1 Strefy planowania awaryjnego wokół elektrowni: wewnętrzna (najbliższa), zewnętrzna (dalej) oraz sięgające jeszcze dalej dystanse monitoringu i kontroli żywności.

RYŚ. 6.2 Granice stref wynikają z analiz bezpieczeństwa i wymagają zatwierdzenia przez krajowy dozór jądrowy.



CZY WIESZ, ŻE...

Granice stref nikt nie kreśli linijką na mapie. Wynikają one z analiz najważniejszych rozważanych awarii i muszą zostać zatwierdzone przez krajowy dozór jądrowy. Nie muszą też być idealnymi okręgami – prawo każe uwzględnić uwarunkowania lokalne.

Wokół elektrowni wyznacza się dwie strefy oraz sięgające dalej dystanse planowania (rys. 6.1). **Strefa wewnętrzna** (formalnie: strefa planowania wyprzedzających działań interwencyjnych) obejmuje obszar najbliższej obiektu – dla dużej elektrowni jej promień jest rzędu kilku kilometrów. Tutaj działania ochronne, na przykład ewakuację, planuje się z góry i można je uruchomić już wtedy, gdy pojawi się sama możliwość zagrożenia poza terenem elektrowni – jeszcze zanim cokolwiek wydostałoby się na zewnątrz. Trochę tak, jak straż pożarna rusza do akcji po sygnale czujki dymu, nie czekając, aż ktoś zobaczy ogień. **Strefa zewnętrzna** (planowania natychmiastowych działań interwencyjnych) sięga dalej, na kilkanaście do kilkudziesięciu kilometrów. Tu podstawą działań – ukrycia się, ewakuacji czy podania jodu – są wyniki pomiarów promieniowania jonizującego, prognozy rozprzestrzeniania się substancji promieniotwórczych albo sam stan elektrowni. Nie trzeba więc czekać, aż przyrządy cokolwiek pokażą. W obu strefach decyzję o wprowadzeniu działań podejmuje wojewoda (zob. pyt. 31). Jeszcze dalej rozciągają się dystanse planowania: na pierwszym z nich przewiduje się monitoring środowiska, pozwalający szybko wykryć ewentualne skażenia i ocenić, czy potrzebne są dalsze kroki, a na drugim – ochronę żywności, wody i pasz oraz kontrolę płodów rolnych.

Skąd biorą się granice? Na pewno nie z przypadku. Wynikają z analiz bezpieczeństwa obejmujących bardzo szeroki zakres scenariuszy – aż po sytuacje awaryjne o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na dziesięć milionów lat – oraz z prognoz dawek, jakie mogłyby wówczas wystąpić (rys. 6.2). Granice wyznacza operator elektrowni, ale ostatnie słowo należy do państwa: zatwierdza je, w drodze decyzji administracyjnej, Prezes Państwowej Agencji Atomistyki. Wcześniej pyta jednak o zdanie wojewodę – i to o rzecz bardzo praktyczną: czy zaplanowane działania ochronne da się na tym obszarze rzeczywiście przeprowadzić. Do wniosku o zatwierdzenie dołącza się mapę administracyjną z naniesionymi granicami stref i wykazem objętych nimi gmin.

Warto więc zapamiętać: strefa planowania awaryjnego to dowód przygotowania, a nie zagrożenia. Im staranniej rozplanowana, tym większe bezpieczeństwo mieszkańców – dokładnie odwrotnie, niż podpowiada pierwsze, odruchowe skojarzenie z nazwą.

ZAPAMIĘTAJ!

Strefa planowania awaryjnego ≠ strefa zagrożenia. Jej granice wynikają z analiz nawet skrajnie mało prawdopodobnych awarii i podlegają zatwierdzeniu przez dozór jądrowy. Plan ewakuacji w hotelu nie oznacza pożaru – a strefa planowania nie oznacza awarii.

CO STREFA PLANOWANIA AWARYJNEGO OZNACZA W PRAKTYCE DLA MIESZKAŃCÓW?

30

Zacznijmy od najczęściej mylonych pojęć: strefa planowania to nie strefa wykluczenia. Można w niej normalnie mieszkać, budować dom, prowadzić firmę i uprawiać ziemię – dokładnie tak samo jak w każdym innym zakątku kraju. Sama obecność strefy nie nakłada na mieszkańców żadnych ograniczeń ani nie zmienia codziennego funkcjonowania gminy.

Co więc realnie się zmienia? Przede wszystkim mieszkańcy więcej wiedzą (rys. 6.3). Z wyprzedzeniem otrzymują jasne informacje, co robić w razie sygnału alarmowego: ulotki, materiały edukacyjne, spotkania informacyjne, czytelne oznaczenia. Chodzi o to, aby nikt nie był zaskoczony i nie musiał niczego domyślać się w biegu. Po drugie, plany nie leżą w szufladzie: służby regularnie ćwiczą – niekiedy z udziałem mieszkańców – sprawdzając w praktyce



RYS. 6.3 Życie w strefie planowania awaryjnego toczy się normalnie. Zmienia się to, że mieszkańcy są lepiej poinformowani, przygotowani i mają zapewniony dostęp do jodu.

procedury i współdziałanie, zupełnie jak podczas próbnych alarmów przeciwpożarowych. Po trzecie, tabletki ze stabilnym jodem są przygotowane zawnazu, a sposób ich rozprowadzenia zależy od strefy: mieszkańcy strefy wewnętrznej dostają je wprost do domu, w ciągu trzech miesięcy od zatwierdzenia strefy, wraz z dołączoną informacją o stosowaniu. W strefie zewnętrznej tabletki czekają w wyznaczonych punktach, między innymi w szkołach i urzędach. Nikt nie musi ich kupować na własną rękę, a zażywa się je dopiero na polecenie służb (zob. pyt. 33). Po czwarte wreszcie, wojewódzki plan postępowania awaryj-

nego uwzględnia osobno miejsca, w których przebywają większe grupy ludzi – szkoły, przedszkola, szpitale, domy opieki i hotele – nanosząc je na mapy razem z drogami ewakuacyjnymi i miejscami tymczasowego pobytu.

Kto to organizuje i kto za to płaci? Zadania związane z zakupem, przechowywaniem i dystrybucją preparatów jodowych realizuje wojewoda. To on określa ich liczbę, biorąc pod uwagę nie tylko mieszkańców, ale też osoby przebywające w strefach czasowo, dzieci w szkołach i przedszkolach, łóżka w szpitalach i hotelach, a nawet osoby pełniące służbę wojskową. Do tego dolicza dziesięcioprocentową rezerwę i co pięć lat weryfikuje dane. Rachunek nie obciąża jednak ani gminy, ani podatnika – koszty zakupu, przechowywania, wymiany i utylizacji preparatów pokrywa operator elektrowni. Zatem mieszkać w strefie planowania awaryjnego to nie „mieszkać w niebezpieczeństwie”, lecz mieszkać w miejscu lepiej przygotowanym na mało prawdopodobną sytuację niż większość kraju.

ZAPAMIĘTAJ!

Życie w strefie planowania awaryjnego wygląda normalnie: nie ma zakazu budowy domów ani ograniczeń w codziennym życiu. Zmienia się jedno – mieszkańcy są lepiej poinformowani i przygotowani.

JAK DZIAŁA SYSTEM OSTRZEGANIA I KTO KIERUJE DZIAŁANAMI, GDYBY DOSZŁO DO ZDARZENIA RADIACYJNEGO?

31

Za sprawnym reagowaniem stoi jasny, ustalony z góry podział ról – przypominający dobrze zgraną sztafetę, w której każdy wie, od kogo odbiera pałeczkę i komu ją przekazuje.

Bieg otwiera operator elektrowni: to on jako pierwszy wykrywa i klasyfikuje zdarzenie oraz niezwłocznie powiadamia krajowy dozór jądrowy i właściwe służby. Wojewodę powiadamia także wtedy, gdy zdarzenie może powodować zagrożenie o zasięgu wojewódzkim lub krajowym. Na zwłokę nie ma tu miejsca – obowiązek powiadomienia jest natychmiastowy i bezwarunkowy. Kolejny odcinek należy do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki (PAA), któremu ustawa Prawo atomowe powierza ocenę zdarzenia. Prezes dokonuje oceny przy pomocy Centrum do Spraw Zdarzeń Radiacyjnych. Analizuje on sytuację radiacyjną,



RYG. 6.4 Ostrzeżenie dociera kilkoma kanałami naraz, a role są ustalone z góry: od operatora, przez dozór i wojewodę, po służby.

prognozuje jej rozwój, doradza oraz informuje rząd i partnerów międzynarodowych.

Kto natomiast dowodzi? Zależy to od zasięgu zdarzenia – i kryje się w tym prosta, uspokajająca logika: im szerszy zasięg, tym wyższy szczebel kierowania. Dopóki skutki nie wykraczają poza teren elektrowni, akcją kieruje jej kierownictwo. Gdy zagrożenie obejmuje województwo, dowodzenie przejmuje wojewoda, działając we współpracy z państwowym wojewódzkim inspektorem sanitarnym: to on rozstrzyga o działaniach ochronnych dla ludności – ukryciu się, ewakuacji, podaniu jodu – i kieruje służbami,

od straży pożarnej po ratownictwo medyczne. Gdyby zaś zagrożenie miało zasięg krajowy albo przerastało możliwości służb podległych wojewodzie, kierowanie przejmie minister właściwy do spraw wewnętrznych, przy pomocy Prezesa PAA. Nikt nie zostaje więc sam z problemem większym od swoich kompetencji.

A jak wiadomość dociera do mieszkańców? Kilkoma drogami naraz (rys. 6.4): syrenami alarmowymi, komunikatami w radiu i telewizji oraz alertem SMS wysyłanym wprost na telefony (Alert RCB). Ta wielotorowość jest celowa — z tego samego powodu, dla którego w elektrowni zwielokrotnia się układy bezpieczeństwa: aby zawodność jednego kanału niczego nie przesądzała. Samo informowanie nie jest przy tym dobrą wolą urzędu, lecz ustawowym obowiązkiem — zarówno przed zdarzeniem, jak i po nim.

Dzięki temu w sytuacji awaryjnej każdy zna swoją rolę — od operatora, przez dozór i wojewodę, po służby. Mieszkaniec ma zadanie najprostsze ze wszystkich: odebrać komunikat i zastosować się do zaleceń (zob. pyt. 32).

WARTO WIEDZIEĆ

Krajowy dozór jądrowy prowadzi centrum, które przez całą dobę śledzi sytuację radiacyjną w kraju i jest gotowe natychmiast zareagować.

NA CZYM POLEGAJĄ DZIAŁANIA OCHRONNE I DLACZEGO CZASEM NAJBEZPIECZNIEJ JEST PO PROSTU ZOSTAĆ W DOMU?

32

Zestaw działań ochronnych jest niewielki i celowo prosty — tak, aby każdy mógł je wykonać spokojnie, bez pośpiechu i bez specjalistycznej wiedzy (rys. 6.5).

Jednym z podstawowych działań jest **ukrycie się**: wejść do budynku, zamknąć okna, wyłączyć wentylację. Ściany działają tu jak osłony, o których była mowa w pyt. 4 — każda warstwa cegły i betonu osłabia promieniowanie jonizujące — a szczelnie zamknięte pomieszczenie odcina drogę skażonemu powietrzu. Zwykły murowany dom potrafi zmniejszyć narażenie kilkukrotnie, a pomieszczenia w głębi budynku lub piwnica osłaniają jeszcze skuteczniej (rys. 6.6). Drugim działaniem jest **ewakuacja** — zorganizowane opuszczenie terenu, przewidywane przede wszystkim dla strefy wewnętrznej, najbliższej elektrowni. Trzecim



NAJCZĘŚCIEJ TO WYSTARCZY

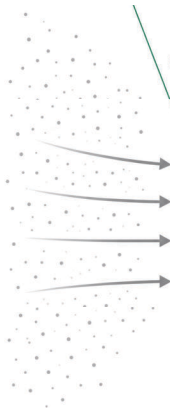


RYS. 6.5 W razie komunikatu najważniejsze jest schronienie się w budynku. Jod przyjmuje się tylko na polecenie służb, a ewakuację zarządza się jedynie wtedy, gdy naprawdę jest potrzebna.

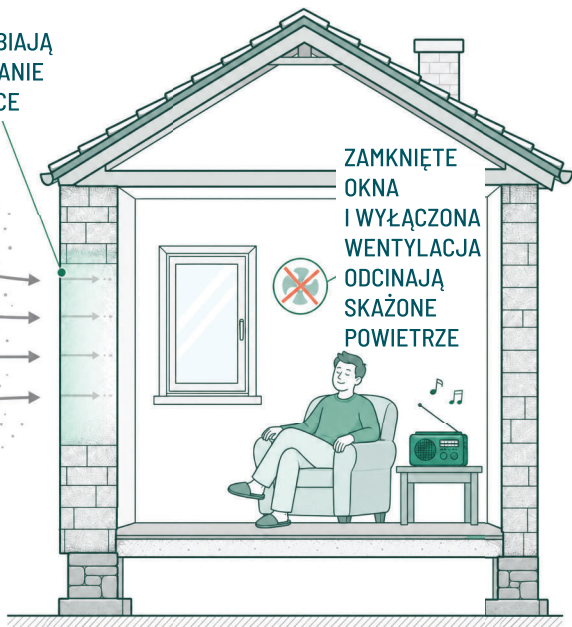
— **tabletki jodowe**, przyjmowane wyłącznie na polecenie służb i w wyznaczonym momencie (zob. pyt. 33). Czwarte jest najmniej widoczne, a bywa najważniejsze: ochrona żywności i wody przed skażeniem — ich **czasowa kontrola** oraz ewentualny zakaz lub ograniczenie spożywania lokalnych produktów i wody z lokalnych ujęć. To proste ograniczenie potrafi wyeliminować znaczną część możliwego narażenia, bo w wielu scenariuszach to właśnie jedzenie i picie — a nie powietrze — byłoby jego głównym źródłem. W razie potrzeby służby prowadzą też dekontaminację, czyli usuwanie skażenia — najczęściej przez zwykłe umycie i zmianę odzieży.

Dlaczego czasem lepiej zostać, niż wyjeżdżać? Przy krótkotrwałym uwolnieniu pozostanie w budynku często ozna-

ŚCIANY OSŁABIAJĄ
PROMIENIOWANIE
JONIZUJĄCE



ZAMKNIĘTE
OKNA
I WYŁĄCZONA
WENTYLACJA
ODCINAJĄ
SKAŻONE
POWIERZCHE



RYS. 6.6 Zamknięty budynek osłabia promieniowanie jonizujące i odcina dopływ skażonego powietrza.

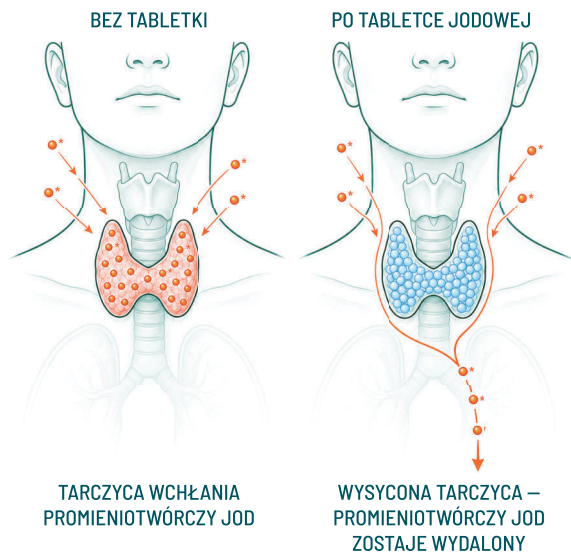
cza mniejszą dawkę niż podróż przez skażony teren, a sama ewakuacja niesie własne, realne ryzyko: wypadki drogowe, stres, zagrożenie dla osób chorych, starszych i hospitalizowanych. Dobitnie pokazała to Fukushima: według ocen komitetu naukowego ONZ (UNSCEAR) nie udokumentowano tam zgonów, które można byłoby przypisać promieniowaniu, natomiast pośpieszna ewakuacja szpitali i domów opieki przyczyniła się do śmierci pacjentów i pensjonariuszy. Zalecenie „zostań w domu” bywa więc decyzją najlepiej chroniącą zdrowie – a nie oznaką bagatelizowania sytuacji.

Dla mieszkańca najważniejsze pozostaje jedno: słuchać komunikatów i stosować się do zaleceń. Służby dobierają działania tak, aby realnie chronić – nie po to, by wywoływać niepotrzebny popłoch.

JAK DZIAŁA JOD STABILNY I DLACZEGO PRZYJMUJE SIĘ GO WYŁĄCZNIE NA POLECENIE SŁUŻB?

Zacznijmy od mechanizmu (rys. 6.7). Tarczyca to gruczoł, który naturalnie gromadzi jod – i nie odróżnia przy tym jego odmiany stabilnej od promieniotwórczej. Gdyby podczas awarii do powietrza dostał się promieniotwórczy jod-131, tarczyca wchłonełaby go równie chętnie jak jod z pożywienia – i mogłaby na tym ucierpieć, włącznie z ryzykiem raka tarczycy, zwłaszcza u dzieci. Cały pomysł ochrony polega więc na ubiegnięciu zagrożenia: podaniu tarczycy zawczasu dużej porcji zwykłego, stabilnego jodu. Tarczyca wysycona stabilnym jodem nie wchłonie jodu promieniotwórczego, który, nie znajdując „miejsca”, zostaje po prostu wydalony z organizmu. To tak zwana blokada tarczycy.

Teraz ograniczenia – i wynikające z nich powody, dla których jodu nie przyjmuje się na własną rękę. Po pierwsze,



RYŚ. 6.7 Blokada tarczycy: wysycona zwykłym jodem tarczyca „nie ma miejsca” na jod promieniotwórczy, który zostaje wydalony.

chroni on **tylko tarczycę**: nie jest „pigułką na promieniowanie” i nie zastępuje ukrycia się ani ewakuacji. Po drugie, działa **wyłącznie przeciw promieniotwórczemu jodowi** – wobec innych substancji jest bezużyteczny. Po trzecie, ma **wąskie okno czasowe**: najlepiej działa przyjęty tuż przed narażeniem lub w ciągu kilku godzin po nim – wzięty za wcześnie albo za późno traci skuteczność (rys. 6.8).

Znaczenie ma również, kto tabletkę przyjmuje – i stoi za tym prosta biologia. Tarczycza dziecka jest mniejsza i dopiero się rozwija, więc ta sama ilość wdychanego jodu promieniotwórczego daje w niej dawkę kilkakrotnie, a nawet kilkunastokrotnie wyższą niż u dorosłego. U dziecka szybko dzielące się komórki są znacznie wrażliwsze na promieniowanie. Po ekspozycji w wieku dorosłym ryzyko jest znacznie mniejsze, choć nie należy przedstawiać go jako zerowego. Jednocześnie z wiekiem rośnie częstość chorób tarczycy, zwłaszcza wola guzkowego, a duża porcja jodu może u takich osób wywołać nadczynność. Bilans korzyści i ryzyka przesuwają się więc z wiekiem – i stąd wynika cała reszta zaleceń.

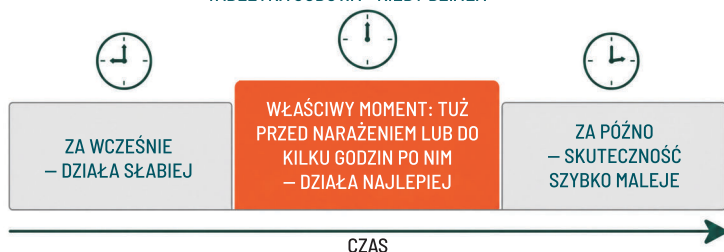
Największą korzyść odnoszą zatem dzieci, młodzież oraz kobiety w ciąży i karmiące piersią. Światowa Organizacja Zdrowia wskazuje, że powyżej 40. roku życia korzyść z blokady tarczycy jest już niewielka i przy ograniczonych zapasach pierwszeństwo należy dawać młodszym. Polskie przepisy nie wykluczają jednak nikogo: *rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie preparatów ze stabilnym jodem, w jakie wyposaża się osoby znajdujące się w strefie planowania wyprzedzających działań interwencyjnych* różnicuje dawki według wieku, a osobom powyżej 60. roku życia przewiduje jedną dawkę zamiast dwóch. W razie realnego zdarzenia rozstrzygająca jest więc ulotka dołączona do opakowania i komunikat służb.

Samodzielne, przedwczesne zażycie tabletki nie pomoże (złe okno czasowe), a może zaszkodzić – zwłaszcza osobom z chorobami tarczycy – i uspić czujność złudnym poczuciem bezpieczeństwa. Właśnie dlatego moment podania wyznaczają służby.

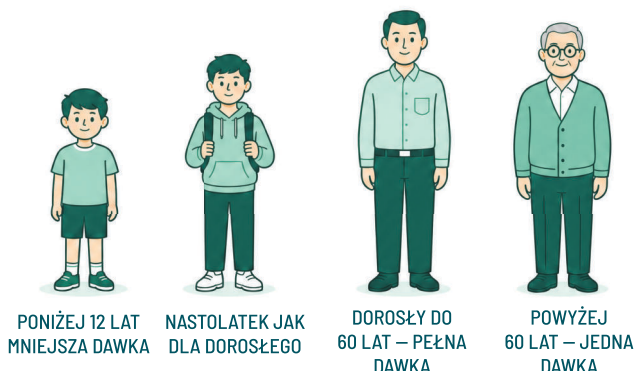
ZAPAMIĘTAJ!

Tabletka jodowa chroni tylko tarczycę, tylko przed promieniotwórczym jodem i tylko przyjęta we właściwym momencie. Nie kupuj jej i nie zażywaj „na zapas” – w razie potrzeby tabletki będą czekać w wyznaczonym punkcie, a o momencie podania poinformują służby.

TABLETKA JODOWA - KIEDY DZIAŁA



DLA KOGO – DAWKA ZALEŻY OD WIEKU

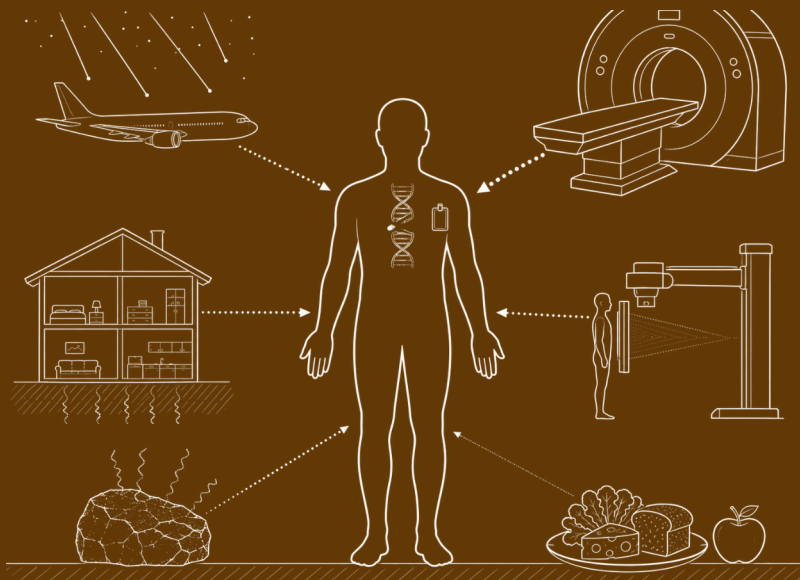


**DOKŁADNE DAWKOWANIE PODAJE ULOTKA DOŁĄCZONA DO OPAKOWANIA
– JOD PRZYJMUJE SIĘ NA POLECENIE SŁUŻB**

RYS. 6.8 Jod działa tylko w wąskim oknie czasowym. Największą korzyść odnoszą dzieci, młodzież oraz kobiety w ciąży i karmiące, ale dawki przewidziano dla wszystkich grup wiekowych – dokładne dawki podaje ulotka.

Jod stabilny to zatem narzędzie ważne, ale wąskie – skuteczne tylko we właściwym momencie i wobec właściwych osób. Stąd jedna prosta zasada: nie „na zapas”, lecz zgodnie z zaleceniem służb.

DZIAŁ VII



promieniowanie a zdrowie

JAK PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE ODDZIAŁUJE NA ORGANIZM – I SKĄD TO WIEMY?

WARTO WIEDZIEĆ

Nasze komórki naprawiają uszkodzenia DNA bez ustanku – także te powstające naturalnie. Szacuje się, że w każdej komórce dochodzi dziennie do dziesiątek tysięcy takich uszkodzeń, a mimo to zwykle żyjemy z nimi w zgodzie. Sprawność tego procesu jest jednym z powodów, dla których przy małych dawkach promieniowania trudno w ogóle mówić o mierzalnej szkodzie.

RYS. 7.1

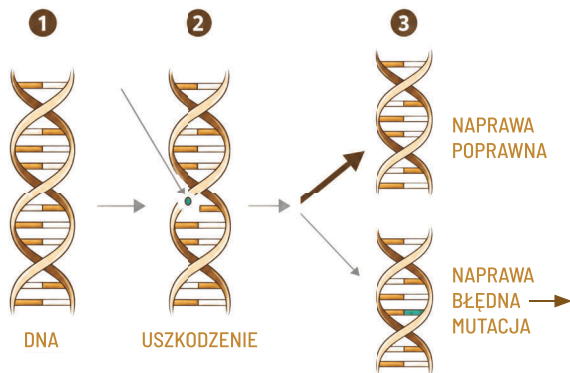
Promieniowanie jonizujące może uszkodzić DNA. Większość uszkodzeń komórka naprawia, a dopiero rzadka błędna naprawa daje trwałą mutację.

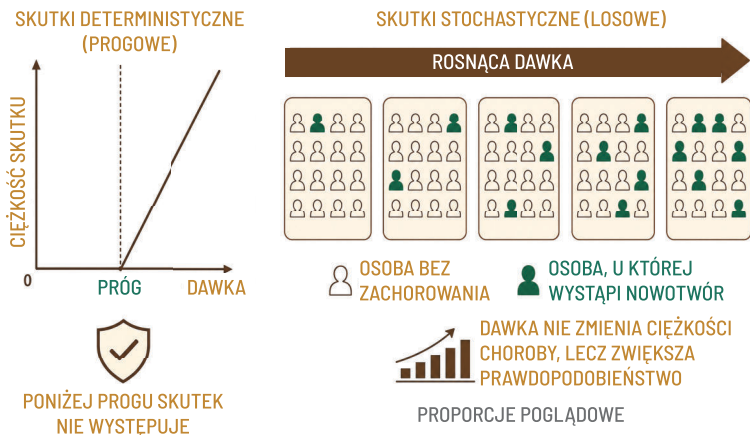
Zacznijmy od tego, co dzieje się w pojedynczej komórce. Promieniowanie jonizujące niesie na tyle dużo energii, że przechodząc przez tkankę, potrafi rozrywać wiązania chemiczne – także w cząsteczce DNA, w której zapisane są instrukcje pracy komórki (rys. 7.1). Brzmi groźnie, ale warto od razu dodać drugą połowę prawdy: takie uszkodzenia powstają w nas bez przerwy, również całkiem naturalnie, a komórka ma sprawną „ekipę remontową”, która większość z nich naprawia od ręki. Dopiero gdy naprawa się nie powiedzie albo przebiegnie błędnie, zostaje trwała zmiana – mutacja, która po latach może, choć wcale nie musi, dać początek nowotworowi.

Skutki promieniowania wygodnie podzielić na dwie rodziny, bo rządzą się zupełnie inną logiką (rys. 7.2).

Dwa rodzaje skutków

Skutki deterministyczne (reakcje tkankowe). Pojawiają się dopiero po przekroczeniu pewnego progu dawki, a potem są tym cięższe, im dawka jest większa – to na przykład poparzenia skóry, choroba popromienna czy zaćma. Kluczowa jest tu wysokość progu: jest on rzędu 0,5–1 Gy, czyli





RYG. 7.2 Dwa rodzaje skutków promieniowania. Deterministyczne pojawiają się dopiero powyżej progu dawki i są tym cięższe, im dawka większa. Stochastyczne progu nie mają: rosnąca dawka zwiększa jedynie odsetek osób, u których wystąpi nowotwór – a nie ciężkość samej choroby.

tysiące razy powyżej dawek, z jakimi mamy do czynienia w codziennym życiu, w tym również mieszkania w sąsiedztwie elektrowni jądrowej. Przy zwykłym narażeniu takie skutki po prostu nie występują – nie „rzadko”, tylko wcale, bo nie ma jak przekroczyć progu.

Skutki stochastyczne (losowe). To przede wszystkim nowotwory. Tu progu nie ma – a przynajmniej nikt nie udowodnił jego istnienia: dawka nie zmienia ciężkości choroby, lecz zwiększa prawdopodobieństwo, że ona w ogóle wystąpi. To właśnie tych skutków dotyczy cała rozmo- wa o „małych dawkach” (zob. pyt. 36), i dlatego mówimy o statystycznym ryzyku, a nie o pewnej szkodzie. Różnica jest jak między pewnym oparzeniem od gorącego pieca a nieco podwyższoną szansą na wypadek przy każdym dodatkowym kilometrze jazdy.

Skąd to wiemy?

Można by pomyśleć, że o tak nieuchwytnym zjawisku wie- my niewiele. Jest odwrotnie: skutki promieniowania joni- zującego należą do najlepiej zbadanych zagrożeń zdrowot-

CIĘKAWOSTKA

Najważniejsze da- ne o skutkach pro- mieniowania po- chodzą z jednego badania. Od 1950 r. *Life Span Study*, dziś prowadzone przez RERF, śledzi ok. 120 tys. osób z Hiroshimy i Na- gasaki – ocala- łych z wybuchów i grupę porównaw- czą. Jego wyniki stanowią jedną z głównych pod- staw norm ochrony radiologicznej na świecie.

nych w historii medycyny. Fundamentem jest obserwacja grupy około 120 tysięcy ocalałych mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki oraz osób, które w chwili wybuchu znajdowały się poza miastem i służą jako grupa porównawcza – prowadzona nieprzerwanie od 1950 r. przez japońsko-amerykańską fundację Radiation Effects Research Foundation (RERF). Do tego dochodzą badania pacjentów po radioterapii, setek tysięcy pracowników branży nuklearnej (zob. pyt. 40) oraz ludności terenów o wysokim naturalnym tle promieniowania jonizującego (zob. pyt. 5). Te dane, zbierane i uzgadniane przez międzynarodowe gremia naukowe: Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) oraz Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP), są podstawą wszystkich obowiązujących dziś limitów i zasad ochrony. Krótko: nie zgadujemy – stoją za tym blisko cztery pokolenia twardej obserwacji.

35

JAKIE DAWKI OTRZYMUJEMY NA CO DZIEŃ I JAK NA ICH TŁE WYPADA SĄSIEDZTWO ELEKTROWNI JĄDROWEJ?

Promieniowanie najłatwiej ośwoić wtedy, gdy zestawimy je z czymś znajomym. Na rysunku 7.3 zebraliśmy dziewięć sytuacji z życia, w których przyjmujemy dawki promieniowania, uporządkowanych rosnąco – wiersz po wierszu, od lewej do prawej. Zaczynamy od tysięcznych części milisiwerta, a kończymy na dawce, jaką w ciągu roku zbiera astronauta na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Rozpiętość jest przy tym trudna do wyobrażenia: między pierwszą a ostatnią pozycją różnica sięga kilkudziesięciu tysięcy razy.

Samo to zestawienie układa się w opowieść. Zdjęcie rentgenowskie zęba u dentysty to około 0,002 mSv, lot przez Atlantyk – około 0,05 mSv, bo wysoko nad ziemią słabnie osłona z powietrza i mocniej dosięga nas promieniowanie kosmiczne. Zdjęcie klatki piersiowej to mniej więcej 0,1 mSv. Dopiero powyżej pojawia się to, czego nikt z nas



DODATKOWA DAWKA OD
ELEKTROWNI JĄDROWEJ
~0,002 mSv/ROK



ZDJĘCIE RTG ZĘBA
~0,002 mSv



LOT PRZESZ ATLANTYK
~0,05 mSv



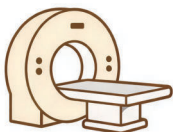
ZDJĘCIE RTG KŁATKI
PIERSIOWEJ
~0,1 mSv



LIMIT DODATKOWEJ DAWKI
DLA MIESZKAŃCA
1 mSv



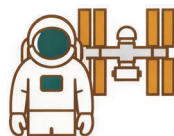
TŁO NATURALNE W POLSCE
~2,6 mSv



TOMOGRAFIA
KOMPUTEROWA
KILKA-KILKANAŚCIE mSv



LIMIT DAWKI DLA
PRACOWNIKA NARAŻONEGO
~20 mSv



ASTRONAUTA NA ISS
~150 mSv

RYS. 7.3 Przykładowe dawki promieniowania jonizującego. Sąsiedztwo elektrowni to jedna z najniższych pozycji – znikomy ułamek tego, co i tak otrzymujemy od natury i medycyny.

nie wybiera: naturalne tło, które w Polsce daje statystycznie około 2,6 mSv rocznie (zob. pyt. 5). Jeszcze wyżej stoi tomografia komputerowa – od kilku do kilkunastu mSv – potem roczny limit dla pracownika narażonego zawodowo, a na samym końcu astronauta, który przez rok na orbicie zbiera około 150 mSv.

Gdzie w tym wszystkim mieści się elektrownia jądrowa? Na samym początku, wśród dawek najmniejszych – i nie jest to ostrożne przypuszczenie, lecz liczba publikowana co roku przez dozór jądrowy, osobno dla każdego obiektu. W Finlandii tamtejszy dozór, STUK, wylicza, że mieszkańiec okolic elektrowni Loviisa otrzymywał w ostatnich latach od 0,1 do 0,3 mikrosiwerta rocznie, a w sąsiedz-

CZY WIESZ, ŻE...

Żałogi samolotów pasażerskich otrzymują od promieniowania kosmicznego więcej niż niejeden pracownik elektrowni jądrowej — dlatego w wielu krajach personel pokładowy zalicza się formalnie do osób narażonych zawodowo i podlega kontroli dawek. Nikomu jednak nie przychodzi do głowy nazwać latania zajęciem niebezpiecznym z powodu promieniowania jonizującego.

twie Olkiluoto — najczęściej od 0,2 do 0,4 mikrosiwerta, czyli poniżej jednego procenta fińskiego limitu³. W Wielkiej Brytanii, gdzie wyniki ogłasza się w ramach programu RIFE, w 2024 r. dla wszystkich elektrowni jądrowych dawka dla najbardziej narażonego mieszkańca nie przekroczyła dwóch procent rocznego limitu: przy elektrowni Sizewell wyniosła 1,4 procenta, przy Hinkley Point również 1,4, a przy Heysham 1,6⁴. Warto przy tym wiedzieć, kogo te liczby opisują, bo to najlepiej pokazuje, jak ostrożnie się je liczy. Nie chodzi o przeciętnego mieszkańca, lecz o tak zwaną osobę reprezentatywną — postać z założenia skrajną, która je głównie miejscowe ryby, grzyby i jagody, pije mleko z pobliskiego gospodarstwa i spędza mnóstwo czasu nad brzegiem morza tuż przy elektrowni. Ktoś taki w rzeczywistości nie istnieje. Zwykły sąsiad elektrowni otrzymuje jeszcze mniej.

Przełożmy to na coś namacalnego. Rok mieszkania tuż za płotem elektrowni to dawka porównywalna z jednym zdjęciem zęba u dentysty — obie pozycje są na rysunku 7.3 obok siebie, bo są po prostu tego samego rzędu. To kilkadziesiąt do ponad tysiąca razy mniej niż naturalne tło, które i tak otrzymujemy co roku. I wielokrotnie poniżej granicy, jaką wyznacza prawo: ogółowi ludności wolno dołożyć

³Fiński dozór jądrowy STUK co roku oblicza dawkę dla tzw. osoby reprezentatywnej w otoczeniu każdej elektrowni. Dla elektrowni Loviisa w latach 2014–2023 wynosiła ona 0,1–0,3 μSv rocznie (najwyższa w 2017 r. — 0,27 μSv), a dla Olkiluoto najczęściej 0,2–0,4 μSv (najwyższa w 2016 r. — 0,51 μSv). Fińskie rozporządzenie o energii jądrowej (161/1988) wyznacza dla mieszkańców otoczenia elektrowni limit 0,1 mSv rocznie. Za: STUK, *Radiation safety of nuclear facilities*, stuk.fi, oraz raport roczny *Monitoring of radioactivity in the environment of Finnish nuclear power plants*.

⁴Brytyjski program monitoringu RIFE (*Radioactivity in Food and the Environment*), prowadzony wspólnie przez Environment Agency, Food Standards Agency, Natural Resources Wales i Cefas, podaje dawki dla osoby reprezentatywnej osobno dla każdej lokalizacji. W raporcie RIFE 30 (dane za 2024 r.) dla wszystkich elektrowni jądrowych była ona niższa niż 2% rocznego limitu 1 mSv, m.in.: Sizewell 1,4%, Hinkley Point 1,4%, Heysham 1,6%, Torness 1,1%, Hartlepool 0,7%. Uwaga: brytyjska „dawka całkowita” obejmuje nie tylko emisje do powietrza i wody, lecz także promieniowanie bezpośrednie od obiektu, dlatego bywa wyższa od wartości fińskich.

najwyżej 1 mSv rocznie ze wszystkich obiektów przemysłowych razem⁵.

Płynie stąd wniosek, do którego wracamy w całym dziale: o zagrożeniu nie decyduje to, czy promieniowanie w ogóle występuje — bo występuje zawsze i wszędzie — lecz to, ile go jest. A w sąsiedztwie elektrowni jest go tak mało, że ginie w naturalnym tle, którego i tak nie sposób uniknąć, mieszkając gdziekolwiek na Ziemi.

CZY MAŁE DAWKI PROMIENIOWANIA SZKODZĄ? CO POKAZUJĄ BADANIA WIELKICH GRUP LUDZI

36

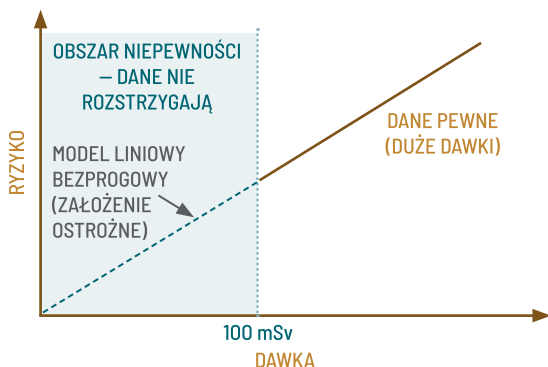
To jedno z najczęściej zadawanych, a zarazem trudnych pytań w całej publikacji — więc odpowiedzmy uczciwie, także tam, gdzie kończy się pewność. Dla dużych dawek sprawa jest jasna: im większa dawka, tym większe ryzyko nowotworu, i wiemy to od dekad (zob. pyt. 34). Problem zaczyna się nisko na skali, przy dawkach porównywalnych z naturalnym tłem.

Poniżej mniej więcej 100 mSv badania epidemiologiczne przestają cokolwiek jednoznacznie pokazywać. Powód nie jest żadną tajemnicą. Nowotwory są, niestety, częste — w ciągu życia zachoruje na nie blisko połowa z nas — a ewentualny wpływ małej dawki jest tak niewielki, że tonie w tym naturalnym tle i wymyka się pomiarom. To ważne rozróżnienie: „nie potrafimy wykryć szkody” nie oznacza, że „na pewno jej nie ma”. Znaczy tylko, że jeśli coś jest, to jest zbyt małe, aby dało się to zmierzyć, nawet na próbach liczących setki tysięcy osób (rys. 7.4).

Jak w takiej niepewności ustalać zasady bezpieczeństwa? Przyjęto rozwiązanie z gatunku „dmuchać na zimne”: model liniowy bezprogowy (w skrócie LNT, od angielskiego *linear no-threshold*), czyli założenie, że ryzyko rośnie

⁵Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. — Prawo atomowe wraz z przepisami wykonawczymi: dawka graniczna dla osób z ogółu ludności wynosi 1 mSv rocznie i dotyczy dodatkowego narażenia od działalności człowieka, poza tłem naturalnym i diagnostyką medyczną.

RYZIKO NOWOTWORU A DAWKA



RYŚ. 7.4 Przy dużych dawkach wzrost ryzyka jest zmierzony i pewny. Poniżej około 100 mSv zaczyna się „obszar niepewności”: linia przerywana nie jest już wynikiem pomiaru, lecz ostrożnym przedłużeniem modelu liniowego bezprogowego (LNT) – przyjętym po to, by ryzyka nie zaniżyć.

ZAPAMIĘTAJ!

„Nie da się wykryć szkody” to nie to samo co „udowodniono jej brak”.

Przy małych dawkach efekt (jeśli istnieje) jest zbyt mały, by go zmierzyć wobec naturalnej częstości nowotworów. Model LNT to ostrożna reguła ochrony przyjęta z zapasem, nie zmierzona prawo przyrody.

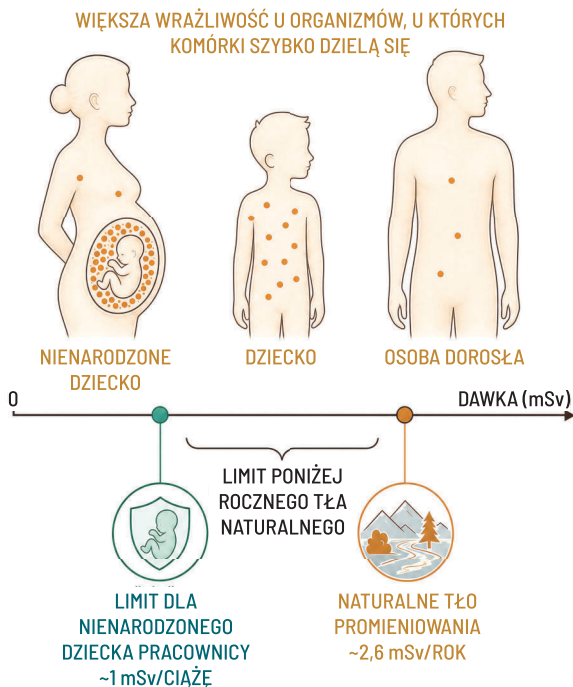
wprost proporcjonalnie do dawki i że nie istnieje dawka całkowicie „zerowa”. To założenie celowo ostrożne – najprawdopodobniej zawyża realne ryzyko przy najmniejszych dawkach – ale właśnie dzięki temu pozwala ustawić limity z solidnym zapasem. Warto to podkreślić: LNT jest narzędziem ochrony i wygodną regułą administracyjną, a nie udowodnionym prawem przyrody.

Co mówią największe badania? Najnowsza analiza pracowników przemysłu jądowego INWORKS – obejmująca blisko 310 tysięcy osób z Francji, Wielkiej Brytanii i USA – wskazuje na niewielki wzrost ryzyka nowotworów rosnący wraz z dawką, co wspiera ostrożne podejście LNT. Z drugiej strony pojawiają się dane sugerujące, że przy naprawdę małych dawkach organizm radzi sobie lepiej, niż zakłada prosty model liniowy. Uczciwa odpowiedź brzmi więc tak: w obszarze najmniejszych dawek nauka nie ma jeszcze rozstrzygnięcia, ale różnica między ryzykiem „zerowym” a „bardzo małym” jest tak nikła, że w praktyce nie przekłada się na zdrowie mieszkańców. Dlatego regulacje wolą przesadzić w stronę ostrożności – i słusznie.

CZY DZIECI I KOBIETY W CIĄŻY WYMAGAJĄ SZCZEGÓLNEJ OCHRONY PRZED PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM?

37

Obawa o dzieci jest naturalna i w pełni zrozumiała, więc potraktujmy ją poważnie. U dzieci, a zwłaszcza u nie narodzonego dziecka, komórki dzielą się szybciej niż u dorosłych – a tam, gdzie podziały są intensywne, tkanka jest bardziej podatna na uszkodzenia promieniowaniem jonizującym (inaczej mówiąc – większa promieniowrażliwość). Właśnie dlatego ochrona radiologiczna stosuje wobec tych grup surowsze kryteria. Nie dlatego, że dzieje się coś złego, lecz dlatego, że przy grupach wrażliwych po prostu rozsądnie jest dmuchać na zimne (rys. 7.5).



RYS. 7.5 Grupy wrażliwe chroni się z zapasem. Kobięcie pracującej w narażeniu prawo pozwala przyjąć do 20 mSv rocznie, ale jej nienarodzonemu dziecku – najwyżej 1 mSv, czyli poniżej połowy tego, co każdy z nas i tak otrzymuje w ciąży roku od naturalnego tła.

ZAPAMIĘTAJ!

W kilku regionach świata – jak Kerała w Indiach, Ramsar w Iranie czy Guarapari w Brazylii – naturalne tło promieniowania jest wielokrotnie wyższe niż w Polsce, a mimo to kolejne pokolenia dzieci rodzą się i dorastają tam bez wykazanego wzrostu zachorowań. To jedna z pośrednich, ale wymownych wskazówek, że margines bezpieczeństwa przyjęty w naszych limitach jest naprawdę duży.

Jak to wygląda w przepisach? Najostrzejszą regułę polskie Prawo atomowe przewiduje dla kobiet pracujących w narażeniu na promieniowanie jonizujące. Od chwili, gdy pracownica zawiadomi pracodawcę o ciąży, nie wolno jej pracować w warunkach, w których mające urodzić się dziecko otrzymałoby dawkę przekraczającą 1 mSv⁶. Warto zobaczyć, co ta liczba naprawdę znaczy. Pracownikowi narażonemu zawodowo prawo pozwala przyjąć do 20 mSv rocznie (zob. pyt. 40), ale nienarodzonemu dziecku – już tylko 1 mSv, czyli dokładnie tyle, ile przysługuje zwykłemu mieszkańcowi. Ustawodawca odbiera więc dziecku „przywilej” pracownika i obejmuje je najwyższym poziomem ochrony, jaki zna cały system. Taka jest zresztą logika zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP), z których ta wartość się wywodzi: płód ma być chroniony tak samo jak osoba z ogółu ludności⁷.

A co z mieszkankami okolic elektrowni? Tu odrębnego limitu dla kobiet w ciąży po prostu nie ma – i nie jest potrzebny. Granica 1 mSv rocznie obowiązuje bowiem wobec każdego z nas, niezależnie od wieku i stanu, a realna dawka od normalnie pracującej elektrowni jądrowej jest od niej setki razy niższa (zob. pyt. 35). Innymi słowy: nienarodzone dziecko mieszkanki jest chronione tą samą granicą, którą prawo uznaje za wystarczającą dla wszystkich, i z ogromnym zapasem. Naturalne tło, którego przecież

⁶Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (tekst jednolity Dz.U. 2026 poz. 1), art. 14 ust. 1b: kobieta, od chwili zawiadomienia kierownika jednostki organizacyjnej, a w przypadku pracownika zewnętrznego – pracodawcy zewnętrznego, że jest w ciąży, nie może pracować w warunkach prowadzących do otrzymania przez mające urodzić się dziecko dawki skutecznej (efektywnej) przekraczającej 1 mSv. Art. 14 ust. 1c zakazuje z kolei pracy kobiety karmiącej piersią w warunkach narażenia na skażenie promieniotwórcze. Uwaga: jest to przepis z zakresu ochrony pracownic, a nie odrębny limit środowiskowy dla mieszkanek okolicy obiektu jądrowego.

⁷Zalecenia ICRP: po zgłoszeniu ciąży warunki pracy powinny być takie, by dodatkowa dawka dla zarodka lub płodu nie przekroczyła około 1 mSv w pozostałym okresie ciąży, a poziom ochrony był porównywalny z zapewnianym osobom z ogółu ludności. Za: ICRP Publication 103 (2007); dyrektywa Rady 2013/59/Euratom, art. 10, wdrożona do polskiego porządku prawnego. ICRP posługuje się przy tym dawką równoważną, a polska ustawa – skuteczną (efektywną); przy napromienieniu całego ciała obie wartości są zbieżne.

nie unikniemy, oddziałuje zresztą na kobiety w ciąży i dzieci od zawsze — a mimo to w regionach o wyraźnie wyższym tle promieniowania nie rodzi się więcej chorych dzieci.

Zupełnie osobną sprawą są badania medyczne z użyciem promieniowania jonizującego. Dawek granicznych w ogóle się do nich nie stosuje, bo rachunek jest tu inny: waży się korzyść zdrowotną konkretnej pacjentki przeciw ryzyku, a nie odmierza dawkę do ustawowego pułapu. Prawo nakazuje jednak wyjątkową staranność, gdy pacjentka jest w ciąży lub gdy ciąży nie można wykluczyć — a w medycynie nuklearnej, przy procedurach mogących dać nie-narodzonemu dziecku ponad 5 mSv, wymaga dodatkowo osobnej oceny dawki⁸. To jednak jest decyzja medyczna, ważona indywidualnie przez lekarza — a nie kwestia sąsiedztwa elektrowni.

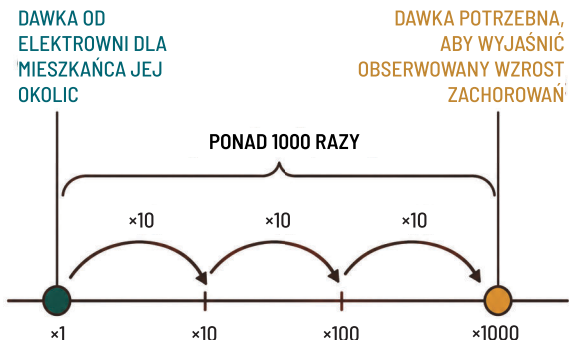
CZY MIESZKANIE W POBLIŻU ELEKTROWNI JĄDROWEJ WPŁYWA NA ZDROWIE? CO MÓWIĄ BADANIA EPIDEMIOLOGICZNE

38

To pytanie zadaje sobie w duchu każdy przyszły sąsiad elektrowni — i dobrze się składa, że akurat na nie nauka odpowiada z niezwykłą wręcz dokładnością. Zdrowie ludzi mieszkających wokół obiektów jądrowych bada się od dziesięcioleci, na próbach liczonych w dziesiątkach tysięcy dzieci, w kilkunastu krajach i metodami, które sprawdzają się nawzajem. Trudno wskazać drugą gałąź przemysłu poddaną równie drobiazgowej obserwacji.

Obraz, jaki z tych badań wychodzi, jest spójny i uspokajający. Najnowsza analiza brytyjska, wykonana na zlecenie rządowego komitetu COMARE (The Committee on Medical

⁸Prawo atomowe, art. 14 ust. 2 (dawek granicznych nie stosuje się do osób poddawanych działaniu promieniowania jonizującego w celach medycznych) oraz art. 33e: gdy pacjentka jest w ciąży lub ciąży nie można wykluczyć, zwraca się szczególną uwagę na uzasadnienie i optymalizację procedury; w medycynie nuklearnej procedury mogące prowadzić do otrzymania przez nienarodzone dziecko dawki przekraczającej 5 mSv wymagają przeprowadzenia oceny dawki dla dziecka. Zob. też ICRP Publication 84, *Pregnancy and Medical Radiation* (2000).



RYS. 7.6 Dlaczego promieniowanie zostało wykluczone jako przyczyna lokalnych obserwacji: dawka od pracującej elektrowni jest o trzy rzędy wielkości mniejsza od tej, która byłaby potrzebna, by wyjaśnić wzrost zachorowań. Skala logarytmiczna – każdy skok oznacza dziesięciokrotność.

Aspects of Radiation in the Environment), objęła blisko 50 tysięcy przypadków nowotworów u dzieci mieszkających w pobliżu 28 obiektów jądrowych w latach 1995–2016 i nie wykazała podwyższonego ryzyka – ani białaczki, ani chłoniaka, ani guzów mózgu⁹. Szwajcarskie badanie kohortowe CANUPIS (Childhood Cancer and Nuclear Power Plants in Switzerland) prześledziło losy wszystkich dzieci urodzonych w kraju przez ćwierć wieku – ponad dwadzieścia milionów osobołat obserwacji – i również nie znalazło związku między zamieszkaniem blisko elektrowni

⁹Davies K. i in. (Small Area Health Statistics Unit, Imperial College London, na zlecenie COMARE), „Childhood cancer incidence around nuclear installations in Great Britain, 1995–2016”, *International Journal of Epidemiology* 54(4), 2025. Analiza objęła dzieci w wieku 0–14 lat mieszkające w promieniu 25 km od 28 obiektów jądrowych, nie stwierdzono istotnych statystycznie wzrostów zachorowań na białaczkę i chłoniaka niezajadniczego, guzy ośrodkowego układu nerwowego ani inne guzy lite.

a zachorowaniami¹⁰. Do tych samych wniosków doszły wcześniejsze analizy brytyjskie i fińskie¹¹.

Rzetelność wymaga jednak dopowiedzenia, że wśród kilkudziesięciu przeprowadzonych badań kilka zaobserwowało lokalne skupiska zachorowań – najgłośniej dyskutowane pochodzą z Niemiec i Francji¹². Takie obserwacje traktuje się poważnie i bada dalej – ale żadnej z nich nie udało się powiązać z promieniowaniem, i to z powodów, które warto poznać, bo są rozstrzygające.

Pierwszy powód to skala dawki. Aby wyjaśnić obserwowane wzrosty, promieniowanie z elektrowni jądrowej musiałyby być o kilka rzędów wielkości silniejsze, niż jest w rzeczywistości. Ocenili tak zarówno autorzy tych prac, jak i niemiecka Komisja Ochrony Radiologicznej (rys. 7.6)¹³. Drugi powód jest jeszcze mocniejszy: gdy francuscy badacze podzielili okolice elektrowni nie według odległości, lecz według wyliczonej dawki, okazało się, że tam, gdzie dawka była najwyższa, wzrostu zachorowań nie było w ogóle¹⁴. W epidemiologii to argument rozstrzygający:

WARTO WIEDZIEĆ

Zdrowie mieszkańców okolic elektrowni jądrowych to jeden z najdokładniej przebadanych tematów w całej epidemiologii środowiskowej. W samej Wielkiej Brytanii dane o nowotworach dziecięcych zbiera się nieprzerwanie od lat sześćdziesiątych, a kolejne analizy obejmują dziesiątki tysięcy przypadków. Trudno wskazać drugą gałąź przemysłu poddaną równie drobiazgowej obserwacji.

¹⁰Spycher B.D. i in., „Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study”, *International Journal of Epidemiology* 40(5), 2011, s. 1247–1260. Badanie objęło 2925 dzieci z rozpoznaniem nowotworu w ciągu 21,1 mln osobolat obserwacji, nie stwierdzono zależności ryzyka od odległości od elektrowni.

¹¹Bithell J.F. i in., „Leukaemia in young children in the vicinity of British nuclear power plants: a case-control study”, *British Journal of Cancer* 109(11), 2013, s. 2880–2885; COMARE, *Fourteenth Report*, 2011; Heinävaara S. i in., „Cancer incidence in the vicinity of Finnish nuclear power plants”, *Cancer Causes & Control*, 2010.

¹²Kaatsch P. i in., „Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants”, *International Journal of Cancer* 122(4), 2008 (badanie KiKK); Spix C. i in., „Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980–2003”, *European Journal of Cancer* 44(2), 2008; Sermage-Faure C. i in., „Childhood leukemia around French nuclear power plants – the Geocap study, 2002–2007”, *International Journal of Cancer* 131(5), 2012, s. E769–E780.

¹³Stanowisko niemieckiej Komisji Ochrony Radiologicznej (Strahlenschutzkommission, SSK): *Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie)*, 2008. Komisja potwierdziła obserwację statystyczną, lecz uznała, że dawka promieniowania od elektrowni jest o ponad trzy rzędy wielkości za mała, aby ją wyjaśnić. Przyczyna pozostaje nieustalona.

¹⁴W badaniu Geocap zastosowano równolegle podział według odległości oraz strefowanie oparte na oszacowanej dawce dla szpiku od wy-

ZAPAMIĘTAJ!

We Francji, gdzie działa kilkadziesiąt reaktorów, elektrownie sąsiadują z winnicami, gospodarstwami i kąpieliskami nad Rodanem. W Szwajcarii stoją w gęsto zaludnionych dolinach, kilkanaście kilometrów od dużych miast. Dla milionów Europejczyków sąsiedztwo elektrowni jądrowej to po prostu element krajobrazu, w którym przeżyli całe życie.

jeśli domniemana przyczyna nie rośnie razem ze skutkiem, przyczyną nie jest.

Co więc odpowiada za lokalne skupiska zachorowań? Najpoważniej traktowana hipoteza nie ma z atomem nic wspólnego. Zgodnie z teorią mieszania populacji nagły napływ ludzi do wcześniej odizolowanej, wiejskiej okolicy sprzyja krążeniu pospolitych zakażeń, na które białaczka dziecięca bywa rzadką odpowiedzią¹⁵. Skupiska białaczki obserwowano bowiem także przy wielkich budowach niemających z energetyką jądrową nic wspólnego. To wciąż hipoteza, nie pewnik – ale dobrze pokazuje, że sąsiedztwo elektrowni jądrowej i przyczyna choroby mogą być dwiema różnymi rzeczami, które jedynie spotkały się w tym samym miejscu.

Podsumujemy zgodnie z najlepszym stanem wiedzy. Wielkie badania populacyjne nie wykazują, by mieszkanie w pobliżu elektrowni jądrowej zwiększało zachorowalność. Tam, gdzie zaobserwowano lokalne anomalie, promieniowanie jonizujące zostało wykluczone jako przyczyna – nie na podstawie zapewnień, lecz dlatego, że dawki są o rzędy wielkości za małe, a ryzyko nie rośnie tam, gdzie dawka jest największa. I co ważne, nauka nie zamyka tego tematu: monitoring epidemiologiczny wokół obiektów jądrowych prowadzi się dalej, bo zdrowie mieszkańców jest zbyt cenne, by poprzestać na raz wyciągniętym wniosku.

rzutów gazowych elektrowni. W strefach o najwyższej dawce nie stwierdzono wzrostu zachorowań, a sam wynik opierał się na 14 przypadkach. W dłuższym oknie obserwacji (1990–2007) zapadalność była wyższa o 10% od spodziewanej, ale niepewność tego oszacowania obejmowała również brak jakiegokolwiek różnicy – wyniku nie można więc uznać za istotny statystycznie. Za: Sermage-Faure C. i in., 2012, dz. cyt.

¹⁵ Kinlen L.J., „Evidence for an infective cause of childhood leukaemia: comparison of a Scottish new town with nuclear reprocessing sites in Britain”, *The Lancet* 332(8624), 1988, s. 1323–1327; „Population mixing and childhood leukaemia”, *European Journal of Epidemiology* 30, 2015. Hipotezę wsparto badaniami skupisk białaczki przy dużych inwestycjach niezwiązanych z energetyką jądrową (m.in. budowy w rejonach wiejskich, obozy wojskowe, przemysł wydobywczy).

JAK KONTROLUJE SIĘ PROMIENIOWANIE W ŚRODOWISKU, WODZIE I ŻYWNOSCI – I CZY MOGĘ TO SPRAWDZIĆ SAMODZIELNIE?

39

Zacznijmy od rzeczy najważniejszej: nie trzeba tu nikomu wierzyć na słowo, bo dane są jawne. Państwowa Agencja Atomistyki prowadzi krajową sieć monitoringu radiacyjnego – automatyczne stacje rozstawione w całym kraju (rys. 7.7) bez przerwy mierzą moc dawki promieniowania gamma i wychwytyją ewentualne skażenia, a wyniki trafiają do ogólnodostępnego serwisu internetowego. Każdy mieszkaniec może więc na bieżąco sprawdzić, jaki jest poziom promieniowania w jego regionie, i porównać go z innymi zakątkami Polski.

Kontrola nie kończy się jednak na powietrzu. Regularnie badane są też próbki wody, gleby, mleka i żywności – pod kątem zawartości substancji promieniotwórczych. Co istotne, nie robi tego jeden podmiot. Operator obiektu ma ustawowy obowiązek prowadzenia własnego pro-



▲ STACJE PODSTAWOWE PAA
▲ STACJE WSPOMAGAJĄCE PAA

RYŚ. 7.7 Krajowa sieć monitoringu mierzy moc dawki promieniowania gamma całą dobę, a dane są publicznie dostępne – może je sprawdzić każdy. Sieć jest stale rozbudowywana.

CZY WIESZ, ŻE...

Prosty dozymetr można dziś kupić za kilkaset złotych i samodzielnie zmierzyć tło promieniowania jonizującego w swojej okolicy – od piwnicy po górski szlak. Wielu użytkowników ze zdziwieniem odkrywa, że w wysokich górach albo w samolocie licznik „przyspiesza”, a w mieszkaniu jest spokojny. To najlepsza z możliwych lekcja: promieniowanie jonizujące jest naturalną częścią świata, którą da się zmierzyć i zrozumieć.

gramu monitoringu – i to nie tylko na swoim terenie, lecz także poza nim – a zakres tego programu, łącznie z rozmieszczeniem punktów poboru próbek i częstotścią pomiarów, wyznacza rozporządzenie Rady Ministrów, nie sam operator¹⁶. Równolegle działa niezależna sieć krajowa: kilkadziesiąt automatycznych stacji pomiarowych oraz placówki badające żywność i mleko, ulokowane w stacjach sanitarno-epidemiologicznych – w tym samym sanepidzie, który na co dzień kontroluje jakość żywności. Całość nadzoruje i ocenia dozór jądrowy, który dodatkowo zleca własne pomiary w otoczeniu obiektów¹⁷. Ta wielowarstwowość jest w pełni zamierzona – zwielokrotnienie jednostek prowadzących monitoring pozwala im na wzajemną weryfikację i uzupełnianie się, tak aby nikt nie „sprawdzał się” wyłącznie sam.

A gdyby ktoś chciał sprawdzić wszystko na własną rękę? Proszę bardzo. Prosty licznik promieniowania – dozymetr – można dziś kupić za kilkaset złotych i samodzielnie zmierzyć naturalne tło w swojej okolicy: na podwórku,

¹⁶ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (tekst jednolity Dz.U. 2026 poz. 1), art. 86o: kierownik jednostki organizacyjnej zakwalifikowanej do I lub II kategorii zagrożeń opracowuje i wdraża program monitoringu radiacyjnego środowiska na terenie i poza terenem jednostki, w sytuacji normalnej oraz w przypadku zdarzenia radiacyjnego. Program obejmuje strefy planowania awaryjnego oraz dystans rozszerzonego planowania. Zakres programu określa rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie zakresu programu monitoringu radiacyjnego środowiska opracowywanego i wdrażanego przez jednostki organizacyjne zakwalifikowane do I lub II kategorii zagrożeń (Dz.U. 2022 poz. 2058), wdrażające art. 35 Traktatu Euratom oraz dyrektywę 2013/59/Euratom. Elektrownia jądrowa należy do I kategorii zagrożeń.

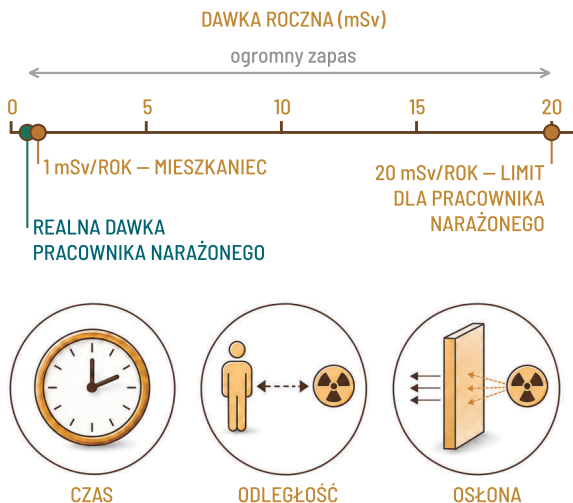
¹⁷ Prawo atomowe, art. 72 i nast.: Prezes PAA dokonuje systematycznej oceny sytuacji radiacyjnej kraju na podstawie danych ze stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych oraz placówek prowadzących pomiary skażeń; stacje i placówki działają w PAA, w jednostkach PAN oraz w jednostkach ministrów właściwych m.in. do spraw wewnętrznych, klimatu, rolnictwa i zdrowia oraz Ministra Obrony Narodowej. Gdy dane z sieci są niewystarczające, Prezes PAA prowadzi pomiary własne. Może też powierzyć te zadania instytucji wyspecjalizowanej w dziedzinie ochrony radiologicznej. Przykład kontroli krzyżowej: monitoring otoczenia ośrodka w Świerku prowadzi Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych NCBJ, a niezależnie od niego – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej na zlecenie Prezesa PAA.

w piwnicy, na górskim szlaku. To zresztą pouczające doświadczenie, bo na własne oczy pokazuje dwie prawdy z tej publikacji: że promieniowanie jonizujące jest wszędzie i że różni się w zależności od miejsca (zob. pyt. 5). Świadomość mieszkańca nie musi polegać wyłącznie na zaufaniu instytucjom – można po prostu zmierzyć i przekonać się osobiście.

JAK CHRONI SIĘ PRACOWNIKÓW ELEKTROWNI I JAKIE DAWKI MOGĄ OTRZYMAĆ?

40

Osoby pracujące przy źródłach promieniowania jonizującego to grupa objęta najściślejszą kontrolą – ściślejszą niż ogół mieszkańców. Podstawą jest limit dawki: dla pracownika narażonego zawodowo wynosi on 20 mSv na rok, wobec 1 mSv rocznie dla przeciętnego obywatela. Ale sam limit to dopiero górna, nieprzekraczalna granica – nie cel, do którego wolno się zbliżać. Nad tym czuwa zasada ALARA (od angielskiego as low as reasonably achievable, „tak nisko, jak rozsądnie osiągalne”): dawkę



RYS. 7.8 Limit 20 mSv/rok to górna granica, nie cel – realne dawki załogi są zwykle ułamkiem limitu. Decydują o tym trzy sposoby ochrony: czas, odległość i osłona.



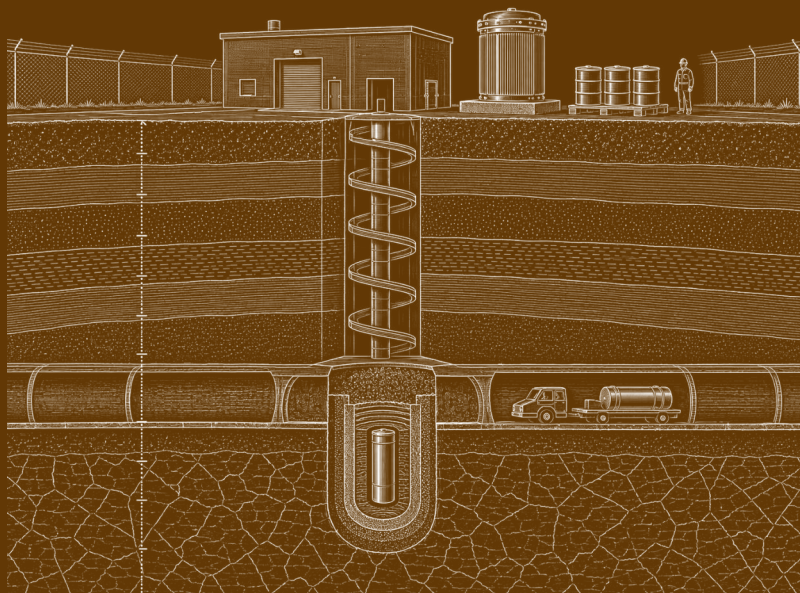
RYS. 7.9 Każdy pracownik nosi własny dozymetr – jego dawka jest dokładnie mierzona, a nie szacowana.

utrzymuje się możliwie najniższą, często daleko poniżej dozwolonego pułapu.

Jak się to osiąga w praktyce? Przez trzy proste zasady ochrony radiologicznej, które łatwo zapamiętać: czas (krócej przy źródle), odległość (dalej od niego) i osłony (coś gęstego między człowiekiem a źródłem). Do tego dochodzą procedury, szkolenia oraz – co najważniejsze – indywidualny pomiar. Każdy pracownik nosi własny dozymetr rejestrujący jego dawkę, a odczyty są regularnie sprawdzane (rys. 7.8, 7.9). Dzięki temu niczego się tu nie szacuje „na oko”: wiadomo dokładnie, ile dawki otrzymała każda osoba, i można zareagować, zanim zbliży się ona do limitu.

Czy taka praca szkodzi zdrowiu? Bada się to od dziesięcioleci, i to na ogromnych grupach. Najnowsza i największa analiza – wspomniane już badanie INWORKS (zob. pyt. 36), obejmujące blisko 310 tysięcy pracowników jądrowych z Francji, Wielkiej Brytanii i USA – pokazuje, że realne dawki zawodowe są niskie (średnio rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu mSv przez całą karierę), a związane z nimi ryzyko jest niewielkie i pozostaje przedmiotem dalszych badań. W nowoczesnych elektrowniach większość załogi otrzymuje w ciągu roku jedynie ułamek dozwolonego limitu – często niewiele ponad to, co i tak daje samo naturalne tło.

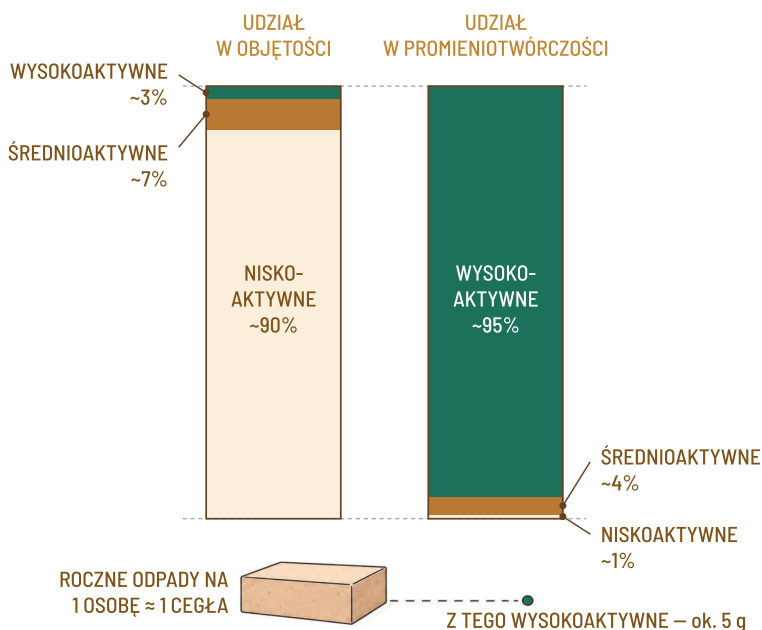
DZIAŁ VIII



odpady promieniotwórcze

JAKIE ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE POWSTAJĄ W ELEKTROWNI I ILE ICH NAPRAWDĘ JEST?

Wyobraźmy sobie, że robimy inwentaryzację wszystkiego, co w elektrowni jądrowej zostaje uznane za odpad promieniotwórczy. Większość tej listy wyglądałaby zaskakująco zwyczajnie: rękawice, kombinezony, folie, narzędzia, filtry – przedmioty, które zetknęły się z substancjami promieniotwórczymi i promieniają tylko nieznacznie. To odpady **niskoaktywne**. Dalej znalazłyby się odpady **średnioaktywne** – na przykład zużyte elementy z wnętrza reaktora (poza paliwem jądrowym) albo żywice z instalacji oczyszczania wody – które przy przenoszeniu



RYŚ. 8.1 W typowym globalnym zestawieniu odpady wysokoaktywne stanowią ok. 3% objętości, choć skupiają ok. 95% aktywności promieniotwórczej odpadów.

wymagają już osłon. Na samym końcu, w osobnej, najpilniej strzeżonej rubryce, figurowałoby wypalone paliwo jądrowe: silnie promieniotwórcze i gorące, wymagające chłodzenia i grubych osłon (zob. pyt. 43). To odpady **wysokoaktywne** (rys. 8.1).

I tu pojawia się liczba, która zaskakuje chyba każdego. Te trzy klasy rozkładają się skrajnie nierówno: odpady nisko- i średnioaktywne stanowią około 97% całej objętości, ale odpowiadają za ledwie kilka procent promieniotwórczości. Z odpadami wysokoaktywnymi jest dokładnie odwrotnie: to tylko ok. 3% objętości, za to ok. 95% całej promieniotwórczości. Innymi słowy: tego, co naprawdę groźne, jest bardzo mało. Problem nie jest wielki, lecz skoncentrowany i został skutecznie rozwiązany na kilka sposobów, tak aby wypalone paliwo nie zagrażało ludziom i środowisku.

Przełożmy to na wyobrażalne miary – tak jak w pytaniu 1 przeliczaliśmy energię pastylki paliwowej na tony węgla. Duży blok jądrowy wytwarza rocznie ok. 25–30 ton wypalonego paliwa: ładunek kilku ciężarówek. Wszystkie odpady promieniotwórcze przypadające na roczne zużycie prądu jednej osoby zmieściłyby się w objętości mniej więcej jednej cegły – a zawarta w niej część wysokoaktywna waży około 5 gramów, mniej więcej tyle, ile kartka papieru. Dla porównania: elektrownia węglowa o tej samej mocy pozostawia co roku setki tysięcy ton popiołów i emituje miliony ton dwutlenku węgla. Odpad jądrowy jest od nich nieporównanie mniejszy, a przy tym zebrany w jednym miejscu, zamknięty i policzony co do kilograma.

CIEKAWOSTKA

Całe wypalone paliwo, jakie amerykańska energetyka jądrowa wytworzyła od lat pięćdziesiątych – dostarczając przez dekady ok. jednej piątej prądu w USA – zmieściłoby się, ułożone warstwami, na jednym boisku futbolowym w stosie o wysokości poniżej 10 metrów.

Popiół z elektrowni węglowej sam jest lekko promieniotwórczy – węgiel zawiera bowiem śladowe ilości naturalnego uranu i toru, które po spaleniu zatężają się w popiele. Rzecz w skali: blok węglowy pozostawia setki tysięcy ton takiego popiołu rocznie, składowanego na otwartych hałdach, podczas gdy odpady jądrowe są ściśle zamykane i ewidencjonowane co do sztuki.



JAK PRZETWARZA SIĘ I ZABEZPIECZA ODPADY NISKO- I ŚREDNIOAKTYWNE – I GDZIE TRAFIAJĄ DZIŚ ODPADY W POLSCE?

WARTO WIEDZIEĆ

Odpady nisko- i średnioaktywne zostają się na trwałe – najczęściej zatapiając w cementzie – tak, aby nic nie mogło się z nich wypłukać nawet w kontakcie z wodą.

Z odpadem promieniotwórczym postępuje się trochę jak z owadem zatopionym w bursztynie: celem wszystkich zabiegów jest unieruchomienie go na trwałe (rys. 8.2). Zależnie od rodzaju odpadu stosuje się odpowiednio dobrane etapy jego przetwarzania. Najpierw zmniejsza się objętość: odpady stałe rozdrabnia się i prasuje pod ogromnym naciskiem, dzięki czemu zajmują kilkakrotnie mniej miejsca, a z odpadów ciekłych odprowadza się wodę na wyparkach (tak jak sól zostaje na dnie garnka po wygotowaniu) i wyłapuje substancje promieniotwórcze na sorbentach (materiałach działających jak filtr do wody). Następnie przychodzi czas na zestawienie: pozostałość zatapia się w cementzie, asfalcie lub żywicy tak, by żadna substancja promieniotwórcza nie mogła się z niej wydostać ani zostać wypłukana przez wodę. Dopiero taki twardy, monolityczny blok zamyka się w szczelnych, wytrzymałych pojemnikach – metalowych lub betonowych.

Dokąd jadą gotowe pojemniki? Tu przydaje się intuicja z pytania 3: odpady nisko- i średnioaktywne zawierają



RYŚ. 8.2 Odpady nisko- i średnioaktywne zmniejsza się objętościowo, zestala, pakuje w pojemniki i składowe na powierzchni.



RYS. 8.3 Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie – działa bezpiecznie od 1961 r.

głównie izotopy krótkożyciowe, więc ich promieniotwórczość zanika w skali dziesięcioleci, najwyżej kilkuset lat (zob. pyt. 45). Nie trzeba dla nich drążyć głębokich składowisk w skale – wystarczają składowiska powierzchniowe lub płytko podziemne: odizolowane od wód gruntowych, obwałowane i stale monitorowane. Takie obiekty działają na świecie od dziesięcioleci i należą do najlepiej sprawdzonych elementów całej gospodarki jądrowej.

A w Polsce? Wbrew pozorom niczego nie zaczynamy od zera. Odpady promieniotwórcze z medycyny, przemysłu i badań trafiają u nas od 1961 r. do Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie nad Narwią – składowiska powierzchniowego urządzonego w dawnym forcie wojskowym z początku XX wieku, prowadzonego przez wyspecjalizowane państwowe przedsiębiorstwo (ZUOP, rys. 8.3). Ponad sześćdziesiąt lat jego bezpiecznej eksploatacji to praktyczny dowód, że gospodarka takimi odpadami jest w Polsce codzienną rutyną, a nie eksperymentem. Ponieważ jednak Różan powoli się zapełnia, a program jądrowy przyniesie nowe strumienie odpadów, przygotowana jest budowa nowego składowiska powierzchniowego.

Warto przy tym utrwalić rozróżnienie, do którego jeszcze wrócimy: składowiska powierzchniowe są przeznaczone wyłącznie dla odpadów nisko- i średnioaktywnych. Wypalone paliwo – wysokoaktywne – podąża zupełnie inną drogą, którą opisujemy w pytaniach 43 i 44.

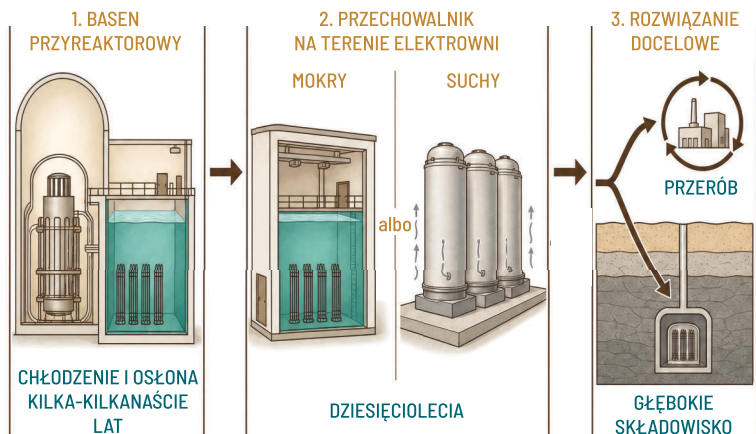
ZAPAMIĘTAJ!

Składowanie to nie to samo co przechowywanie. Przechowalnik (np. basen czy suchy pojemnik przy elektrowni) jest z założenia tymczasowy i nadzorowany. Składowisko – docelowe i zaprojektowane tak, aby po zamknięciu nie wymagało już żadnej interwencji. W debacie publicznej te pojęcia bywają mylone, a to dwa różne etapy tej samej drogi.

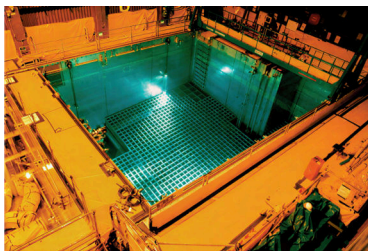
CO DZIEJE SIĘ Z WYPALONYM PALIWEM PO WYJĘCIU Z REAKTORA?

Wypalone paliwo nie wędruje z reaktora nigdzie „od razu” – jego droga jest rozpisana na etapy, a każdy kolejny obniża zagrożenie (rys. 8.4). Stoi za tym fizyka, którą poznaliśmy w pytaniu 2: świeżo wyjęte paliwo wciąż wydiera ciepło powyłaczeniowe i jest silnie promieniotwórcze, bo zawiera mnóstwo krótkożyciowych fragmentów rozszczepienia i produktów ich rozpadu promieniotwórczego. Ale właśnie dlatego, że są krótkożyciowe, zanikają one szybko – i to pierwsze lata przynoszą największą poprawę.

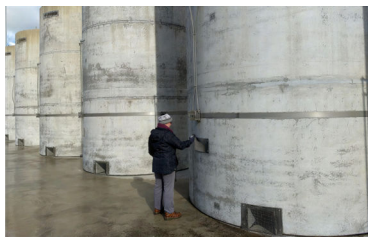
Etap 1 – basen przyreaktorowy. Wyjęte z rdzenia kasety trafiają do głębokiego basenu z wodą tuż obok reaktora. Woda pełni tu dwie role jednocześnie: odbiera ciepło i stanowi znakomitą osłonę przed promieniowaniem jonizującym – kilka metrów wody tłumi je tak skutecznie, że nad basenem można bezpiecznie pracować. Paliwo



RYŚ. 8.4 Droga wypalonego paliwa: najpierw kilkuletnie chłodzenie w basenie przyreaktorowym, potem przechowywanie na terenie elektrowni – w basenie albo w pojemnikach chłodzonych powietrzem – a docelowo przerób lub składowisko głębokie.



RYS. 8.5 Basen do mokrego przechowywania wypalonego paliwa w Elektrowni Jądrowej San Onofre w Kalifornii.



RYS. 8.6 Suche przechowniki wypalonego paliwa na terenie zlikwidowanej Elektrowni Jądrowej Big Rock Point w Michigan. Inspektorka amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego wykonuje pomiar radiacyjny przy jednym z pojemników.

spędza tu zwykle od kilku do kilkunastu lat, a jego promieniotwórczość i moc cieplna zmniejszają się w tym czasie wielokrotnie.

Etap 2 – przechownik na terenie elektrowni. Basen przyreaktorowy ma jednak ograniczoną pojemność, a elektrownia pracuje przez dziesięciolecia. Dlatego w zależności od przyjętej strategii po kilku lub kilkunastu latach paliwo można przenieść do osobnego przechownika. Stosuje się tu dwa sprawdzone rozwiązania. Pierwsze to przechowywanie „na mokro”: dodatkowy basen wybudowany poza budynkiem reaktora, działający dokładnie na tej samej zasadzie co ten przyreaktorowy (rys. 8.5). Drugie to przechowywanie „na sucho”: ostudzone kasety zamyka się w masywnych pojemnikach ze stali i betonu, ustawianych na utwardzonym placu, albo w betonowych komorach – a chłodzi je już wyłącznie naturalny obieg powietrza, bez pomp, zasilania i bieżącej obsługi (rys. 8.6). Ten drugi wariant, jako w pełni bierny, zdobywa na świecie coraz większą popularność. Przy pierwszej polskiej elektrowni wybór nie został jeszcze przesądzony – oba rozwiązania są od dziesięcioleci eksploatowane, odporne na zagrożenia zewnętrzne i stale monitorowane.

Etap 3 – rozwiązanie docelowe. Przechowywanie przy elektrowni, choć bezpieczne, jest z założenia tymczasowe – daje czas na przygotowanie rozwiązania ostatecznego.

WARTO WIEDZIEĆ

Wypalone paliwo tylko umownie nazywamy „odpadem”: wciąż zawiera ok. 95% materiału potencjalnie nadającego się do ponownego wykorzystania – głównie uran oraz pluton, z których można wytworzyć świeże paliwo (zob. pyt. 17). Dlatego część państw traktuje je jak surowiec odłożony na później – a decydując „składować czy przerabiać” można podjąć nawet za kilkadziesiąt lat.

Drogi są dwie (zob. pyt. 17): przerób paliwa i odzyskanie z niego surowca albo skierowanie go, po odpowiednim zabezpieczeniu, do głębokiego składowiska geologicznego (zob. pyt. 44). Niezależnie od wyboru, na każdym etapie tej drogi wypalone paliwo pozostaje szczelnie zamknięte, policzone i pod stałą kontrolą.

CZYM JEST GŁĘBOKIE SKŁADOWISKO GEOLOGICZNE I DLACZEGO UZNAJE SIĘ JE ZA ROZWIĄZANIE DOCELOWE?

CIKAWOSTKA

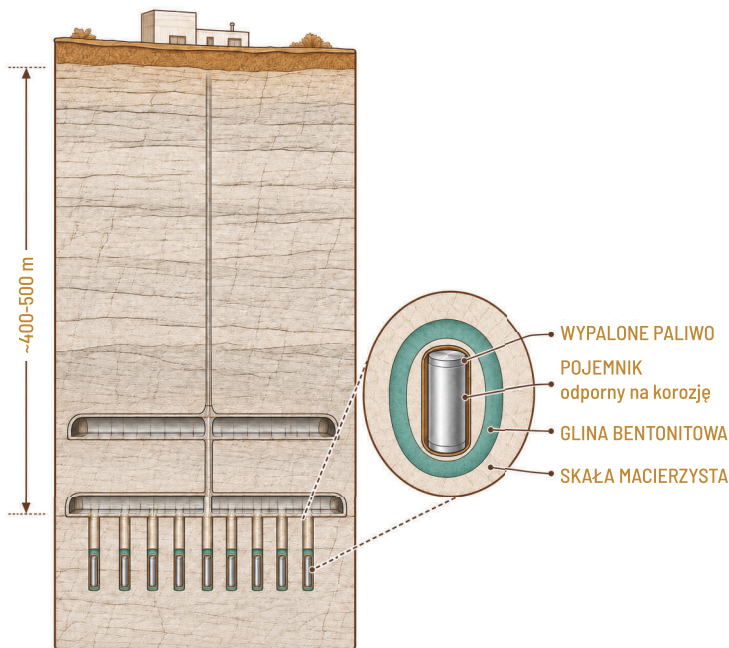
Projektanci składowisk mierzą się z pytaniem godnym filozofów: jak ostrzec przed składowiskiem ludzi, którzy będą żyć za 10 000 lat i mogą nie znać żadnego z dzisiejszych języków ani symboli? Rozważano monumentalne „krajobrazy cierni”, kamienne tablice z piktogramami, a nawet archiwa przekazywane z pokolenia na pokolenie. Jednak najlepsze składowisko to takie, które żadnych ostrzeżeń nie potrzebuje, bo nawet całkiem zapomniane pozostaje bezpieczne.

Pomysł jest w gruncie rzeczy prosty i opiera się na tej samej filozofii co bezpieczeństwo reaktora (zob. pyt. 19): na wielu niezależnych barierach, włożonych jedna w drugą niczym w matryosce (rys. 8.7). Jeśli któraś zawiedzie, kolejne wciąż chronią — a żadna nie zakłada z góry, że pozostałe są niezawodne.

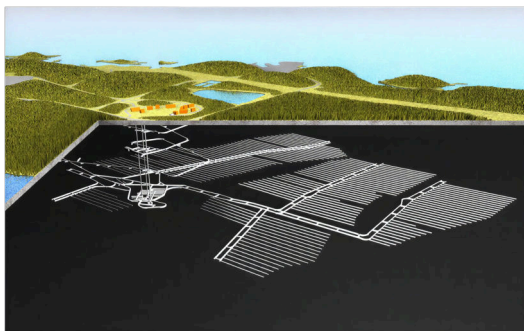
Pierwszą barierą jest sama postać odpadu: trwała ceramika paliwowa albo zeszlona pozostałość po przerobie, z której substancje promieniotwórcze mogłyby się uwalniać jedynie skrajnie powoli. Drugą — **pojemnik**: grubościenny i odporny na korozję. Trzecią — otulina z **gliny bentonitowej**, która w zetknięciu z wodą pęcznieje, sama uszczelnia przestrzeń wokół pojemnika i odcina dopływ wilgoci. Czwartą i najpotężniejszą — **skała macierzysta**, kilkaset metrów pod powierzchnią: stabilna geologicznie, nieulegająca erozji, z dala od wód pitnych i ludzi.

Dlaczego akurat głęboka geologia? Bo natura zdążyła już przeprowadzić za nas najdłuższy z możliwych eksperymentów. Złoża uranu tkwią w skałach nienaruszone od miliardów lat. W Oklo, na terenie dzisiejszego Gabonu, około dwóch miliardów lat temu samoczynnie „uruchomił się” naturalny reaktor jądrowy — i jego fragmenty rozszczepienia w większości pozostały tam, gdzie powstały: uwięzione w skale. Umieszczenie odpadów głęboko w stabilnej formacji sprawia, że izolacja jest bierna: nie wymaga pomp, dozoru ani jakiegokolwiek interwencji człowieka — działa w skali czasu, w której cywilizacje powstają i przemijają.

Czy to już rzeczywistość? Coraz bliżej. Fińskie Onkalo na wyspie Olkiluoto – pierwsze takie składowisko na świecie (rys. 8.8) – nie rozpoczęło jeszcze regularnej pracy. 4 sierpnia 2026 r. fiński dozór STUK zakończył ocenę wniosku o zezwolenie na eksploatację i wydał opinię przychylną udzieleniu zezwolenia, wskazując jednocześnie warunki bezpieczeństwa. Teraz decyzję podejmie rząd. Wypalone paliwo trafi tam w miedziano-żeliwnych pojemnikach otulonych bentonitem, do otworów wywierconych w litej skale krystalicznej liczącej ok. 1,9 miliarda lat, na głębokość ok. 400–430 m. Całość zaprojektowano na izolację przez co najmniej 100 000 lat. Śladem Finlandii idzie Szwecja: w styczniu 2025 r. ruszyła budowa bliźniaczego składowiska w Forsmark, na głębokości ok. 500 m, gdzie



RYŚ. 8.7 Głębokie składowisko chroni wieloma niezależnymi barierami: trwała forma odpadu, odporny pojemnik, otulina z gliny i stabilna skała kilkaset metrów pod ziemią.



RYŚ. 8.8 Fińskie Onkalo – pierwsze na świecie głębokie składowisko wypalonego paliwa, ok. 430 m pod ziemią.

pierwsze pojemniki mają trafić pod ziemię w latach trzydziestych¹⁸. Rozwiązanie docelowe przestało więc być teorią – obiekty stoją albo powstają, a w Finlandii pierwsze pojemniki czekają już właściwie tylko na jeden podpis urzędowy.

45

JAK DŁUGO ODPADY POZOSTAJĄ GROŹNE I CO TAK NAPRAWDĘ ZOSTAWIMY PRZYSZŁYM POKOLENIOM?

To pytanie zasługuje na uczciwą odpowiedź, powiedzmy więc wprost również to, co trudne. Zaczniemy od dobrej wiadomości: promieniotwórczość nie jest dana raz na zawsze, lecz zanika, i to najszybciej na początku (rys. 8.9). Odpowiadają za to krótkożyciowe produkty rozszczepienia, z cezem-137 i strontem-90 na czele (okres połowicznego rozpadu ok. 30 lat), które w ciągu kilkuset lat w większości znikają. Dlatego odpady nisko- i średnioaktywne wystarczy izolować przez dziesięciolecia do

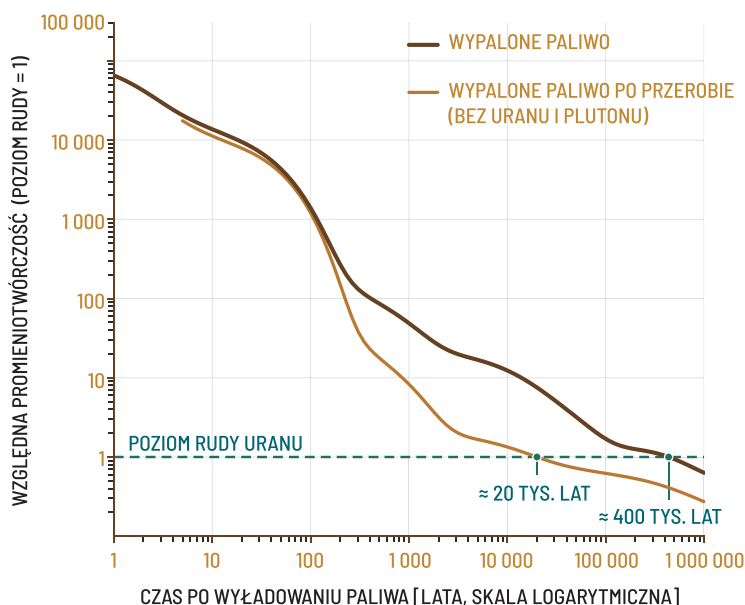
¹⁸Stan procedury licencyjnej Onkalo według World Nuclear Association, „Nuclear Power in Finland” (aktualizacja z 4 sierpnia 2026 r.) oraz komunikatów STUK. Parametry składowiska za: Posiva (posiva.fi). Szwedzkie składowisko w Forsmark: budowa rozpoczęta 15 stycznia 2025 r., głębokość ok. 500 m, gotowość do składowania w latach trzydziestych – za: SKB (skb.com).

kilkuset lat (zob. pyt. 42), a wypalone paliwo już po kilkudziesięciu latach jest wielokrotnie mniej groźne niż w dniu wyjęcia z reaktora.

Teraz część trudniejsza. W wypalonym paliwie pozostaje niewielka domieszka długożyjących aktywności, które – zgodnie z zasadą z pytania 3 – promieniają słabo, ale bardzo długo. To przez nie promieniotwórczość paliwa wraca do poziomu naturalnej rudy uranu dopiero po ok. 10–20 tys. lat (gdy paliwo przerobiono) albo po kilkuset tysiącach lat w cyklu otwartym. Nie ma powodu tego ukrywać: część odpadów rzeczywiście trzeba odizolować na bardzo długo – i właśnie po to projektuje się składowiska geologiczne, działające biernie przez taki czas (zob. pyt. 44).

ZAPAMIĘTAJ!

Wróćmy do intuicji z pyt. 3: izotop dla tej samej liczby atomów nie może być jednocześnie „wiecznie trwały” i „potężnie promieniujący” – to fizycznie sprzeczne żądania. To, co w odpadach promieniuje intensywnie, zanika szybko. To, co pozostaje na długo, promieniuje słabo.



RYŚ. 8.9 Aktywność promieniotwórcza wypalonego paliwa spada najszybciej na początku i po ok. 400 tys. lat (w cyklu otwartym – bez przerobu paliwa) wraca do poziomu rudy, z której paliwo powstało.

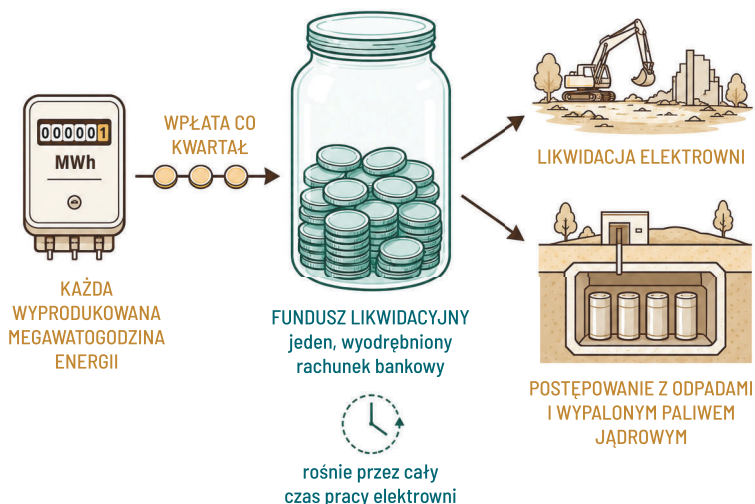
Co więc naprawdę zostawiamy przyszłym pokoleniom? Zrobimy rachunek problemów i korzyści. Zostawiamy odpad, który jest mały objętościowo (zob. pyt. 41), stały i szczelnie zamknięty, dokładnie policzony i udokumentowany, a przy tym — co kluczowe — z każdą dekadą mniej groźny. Dla porównania: wiele odpadów przemysłowych, jak rtęć, ołów czy kadm, pozostaje toksycznych bez końca — ich szkodliwość nie zanika nigdy, bo pierwiastki te nie mają żadnego „okresu połowicznego rozpadu”. Zostawiamy wreszcie coś jeszcze: energię wytworzoną bez emisji dwutlenku węgla, a więc mniejszy problem klimatyczny dla tych samych pokoleń, o które się martwimy. Odpady to nie jest brak problemu — to problem realny, ale ograniczony, policzalny i uczciwie wzięty na siebie już dziś (zob. pyt. 46).

46

KTO PŁACI ZA ODPADY I PRZYSZŁĄ LIKWIDACJĘ ELEKTROWNI — I CZY PIENIĄDZE ODKŁADA SIĘ JUŻ OD PIERWSZEJ KILOWATOGODZINY?

To pytanie pada rzadziej niż pytania o bezpieczeństwo, a dla wiarygodności całego przedsięwzięcia jest równie ważne — dotyczy bowiem tego, kto poniesie koszty wtedy, gdy elektrownia przestanie zarabiać. Odpowiedź opiera się na prostej regule, znanej z prawa ochrony środowiska: „zanieczyszczający płaci”. Za cały cykl życia obiektu — łącznie z zagospodarowaniem odpadów i rozbiórką po zakończeniu pracy (likwidacją, pyt. 61) — odpowiada operator, a nie państwo ani przyszli mieszkańcy.

Jak wygląda to w praktyce? Przede wszystkim: z pieniędzmi nie czeka się do końca. Polskie Prawo atomowe nakazuje operatorowi elektrowni jądrowej utworzyć wyodrębniony fundusz specjalny, na osobnym rachunku bankowym, na który raz na kwartał wpływa opłata naliczana od każdej wyprodukowanej megawatogodziny energii elektrycznej (rys. 8.10). Ustawa nazywa go funduszem likwidacyjnym, ale nazwa może być myląca: fundusz pokrywa dwie rzeczy naraz — przyszłą likwidację elektrowni



RYS. 8.10 Od każdej wyprodukowanej megawatogodziny operator odkłada co kwartał wpłatę na jeden wyodrębniony fundusz. Z niego finansowane są później dwa zadania: rozbiórka elektrowni i postępowanie z odpadami oraz wypalonym paliwem.

oraz końcowe postępowanie z wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi. Zgromadzonymi pieniędzmi nie wolno przy tym obracać. Ustawa dopuszcza wyłącznie lokaty terminowe i długoterminowe obligacje skarbowe. Fundusz rośnie więc przez wszystkie dziesięciolecia pracy elektrowni – trochę jak kapitał odkładany co miesiąc na emeryturę – tak, aby środki były gotowe dokładnie wtedy, gdy będą potrzebne, choćby za 60–80 lat.

Czy to tylko deklaracja na papierze? Nie, a sankcja robi wrażenie. Operator co kwartał raportuje właściwemu ministrowi zarówno wysokość wpłat, jak i liczbę wyprodukowanych megawatogodzin, a wypłacić cokolwiek z funduszu może dopiero po uzyskaniu jego pozytywnej opinii. Jeżeli zaś zalega z wpłatami co najmniej rok, minister kieruje wniosek do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, a ten niezwłocznie wydaje nakaz zawieszenia eksploatacji elektrowni. Mówiąc wprost: elektrownia, która nie odkłada na posprzątanie po sobie, przestaje produkować prąd.

Obowiązek zabezpieczenia środków wynika zresztą także z prawa unijnego (dyrektywa 2011/70/Euratom), choć mechanizmy bywają różne – w Szwecji jest to fundusz państwowy, w Polsce fundusz prowadzony przez samego operatora pod nadzorem administracji.

Dlaczego to takie istotne? Bo oznacza, że koszt „posprzątania po sobie” jest wliczony w cenę energii jądrowej od pierwszego dnia, a nie odsuwany w przyszłość. Na tle historii przemysłu wciąż nie jest to regułą oczywista – koszty likwidacji zakładów i usuwania skażeń nieraz spadały na całe społeczeństwo. W energetyce jądrowej zasada jest odwrotna: kto korzysta z prądu dziś, ten już dziś opłaca bezpieczne domknięcie całego cyklu jutro.

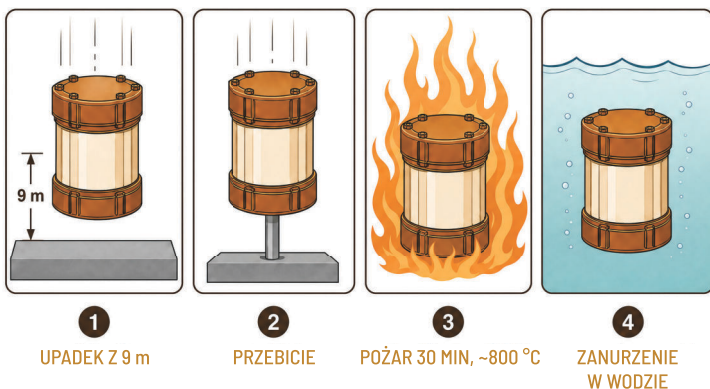
47

JAK TESTUJE SIĘ POJEMNIKI TRANSPORTOWE I CZY PRZEWÓZ MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH JEST BEZPIECZNY?

Zacznijmy od bohatera tego pytania – pojemnika. Materiały promieniotwórcze wysokoaktywne przewozi się w pojemnikach typu B: masywnych, grubościennych konstrukcjach ze stali (często z warstwą ołowiu), ważących dziesiątki ton i zaprojektowanych tak, aby zatrzymać



RYS. 8.11 Testowy pojemnik transferowy wypalonego paliwa w zakładzie hermetyzacji Posivy w Olkiluoto podczas próby procesu składowania w 2024 r. Próba została przeprowadzona bez materiału promieniotwórczego.



POJEMNIK NADAL SZCZELNY

RYŚ. 8.12 Pojemniki transportowe przechodzą ekstremalne próby – upadek, przebicie, pożar i zanurzenie – zachowując szczelność. Zderzenia z pociągiem były dodatkowymi próbami pokazowymi wybranych konstrukcji.

zawartość nawet w najcięższym wypadku (rys. 8.11). Zanim taki pojemnik zostanie dopuszczony do użytku, musi zdać serię następujących po sobie prób (rys. 8.12): upadek z 9 metrów na twarde podłoże, upadek z 1 metra na stalowy trzpień (próba przebicia), 30-minutowy pożar w temperaturze ok. 800°C i wreszcie zanurzenie w wodzie. Po tym wszystkim pojemnik nadal musi pozostać szczelny.

Teoria to jedno, lecz najsilniej działają na wyobraźnię próby pokazowe. W słynnym brytyjskim teście z 1984 r. pociąg rozpędzony do ok. 160 km/h uderzył wprost w pojemnik na wypalone paliwo ustawiony w poprzek toru. Lokomotywa uległa zniszczeniu – pojemnik zachował szczelność, a jego uszkodzenia okazały się powierzchowne. Takie pokazy nie są sztuką dla sztuki: unaocniają margines bezpieczeństwa sięgający daleko poza wszystko, co realnie może się wydarzyć na drodze czy torach.

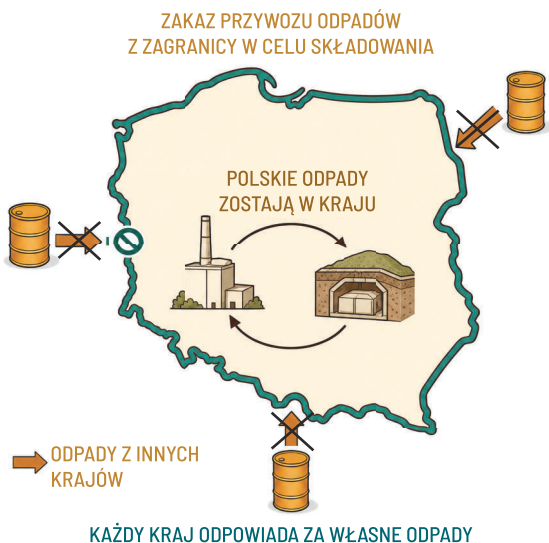
A jak wygląda codzienna praktyka? Materiały promieniotwórcze — od izotopów medycznych po wypalone paliwo — przewozi się na świecie od dziesięcioleci. Samych transportów wypalonego paliwa wykonano dziesiątki tysięcy. W całej tej historii nie odnotowano wypadku, w którym uwolnienie zawartości pojemnika zagroziłoby ludziom lub środowisku. Transport, którego wiele osób obawia się najbardziej, należy więc w rzeczywistości do najlepiej opartych ogniw całego przemysłu nuklearnego.

48

CZY DO POLSKI MOGĄ TRAFIAĆ ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE Z ZAGRANICY?

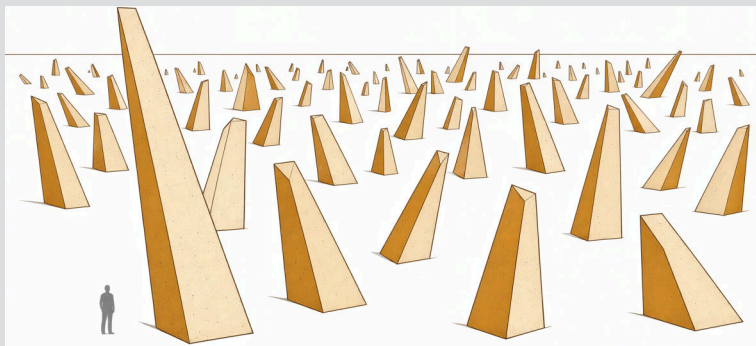
To jedna z najczęstszych obaw wokół energetyki jądrowej — i akurat na nią odpowiedź jest wyjątkowo krótka i jednoznaczna. Polskie prawo — ustawa Prawo atomowe — zakazuje przywozu odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa jądrowego z zagranicy w celu ich

RYŚ. 8.13 Polskie prawo zakazuje przywozu odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa z zagranicy w celu składowania. Zasada działa w obie strony: każdy kraj odpowiada za odpady powstałe na własnym terytorium.



składowania na terytorium Polski (rys. 8.13). Budowa elektrowni jądrowej nie oznacza więc, że nasz kraj stanie się „składowiskiem Europy” – takiego scenariusza po prostu nie dopuszczają przepisy.

Co więcej, zakaz ten nie jest wyłącznie polską decyzją: wpisuje się w powszechnie przyjętą zasadę międzynarodową – zapisaną m.in. we Wspólnej konwencji Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej i w prawie Unii Europejskiej – zgodnie z którą każde państwo odpowiada za bezpieczne zagospodarowanie odpadów powstałych na własnym terytorium. Krótko mówiąc: będziemy odpowiadać za własne odpady – i tylko za własne.



Krajobraz cierni (koncepcja Sandia, 1993)

Jak ostrzec kogoś za dziesięć tysięcy lat?

Zapieczone i zakonserwowane składowisko ma pozostać szczelne przez sto tysięcy lat. Ale żaden język nie przetrwał tak długo – pismo linearne A liczy „zaledwie” trzy i pół tysiąca lat i wciąż pozostaje nieodczytane.

W 1993 r. amerykańskie laboratorium Sandia posadziło nad tym problemem nie inżynierów, lecz językoznawców i antropologów. Ich pomysłem nie był napis, lecz sam krajobraz: pole betonowych kołców sterczących pod

chaotycznymi kątami, zaprojektowane tak, by odstraszało, zanim ktokolwiek zacznie kopać. Towarzyszący im napis miał zaczynać się od zdania: „To miejsce nie jest miejscem czci”.

Finowie doszli do wniosku odwrotnego: każdy znak przyciąga uwagę skuteczniej, niż odstrasza – archeolodzy od zawsze otwierali grobowce mimo wypisanych na nich klątw. Po zamknięciu Onkalo na powierzchni ma więc nie zostać nic. Najlepszym zabezpieczeniem ma być zapomnienie.



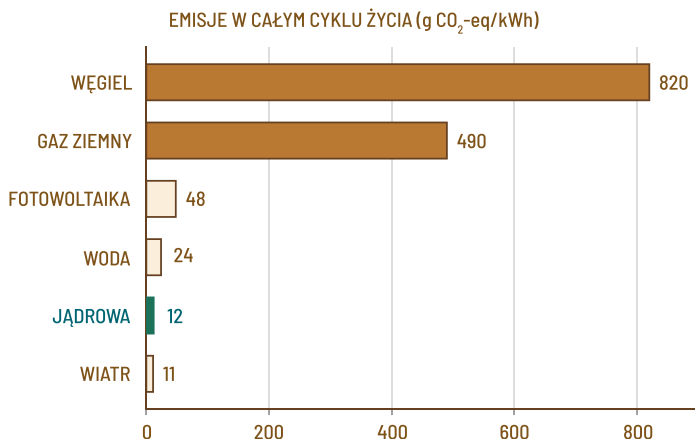
środowisko i klimat

JAKI JEST ŚLAD WĘGLOWY ENERGII JĄDROWEJ, LICZĄC CAŁE ŻYCIE ELEKTROWNI – OD BUDOWY PO LIKWIDACJĘ?

49

Żeby porównanie było rzetelne, nie można liczyć tylko tego, co wylatuje „z komina” podczas pracy – bo sam proces rozszczepienia i wytwarzania prądu w elektrowni jądrowej nie powoduje bezpośredniej emisji dwutlenku węgla. Trzeba policzyć cały cykl życia: emisje z budowy obiektu, z wydobycia i wzbogacenia uranu, z transportu, a na końcu z rozbiórki (zob. pyt. 61). Takie pełne rachunki (analizy cyklu życia) przeprowadzono wielokrotnie (rys. 9.1).

Wynik jest jednoznaczny. Według mediany wyznaczonej przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) energia jądrowa



RYŚ. 9.1 Emisje gazów cieplarnianych w całym cyklu życia – od budowy elektrowni, przez wydobycie i przygotowanie paliwa, po likwidację. Energia jądrowa emituje na kilowatogodzinę podobnie mało co wiatr, mniej niż fotowoltaika i kilkadziesiąt razy mniej niż węgiel. Podane wartości to mediany, a słupki narysowano w skali liniowej, bez przerywania osi. Fotowoltaika – instalacje wielkoskalowe, wiatr – lądowy. Źródło: IPCC AR5, WG III, aneks III (S. Schlömer i in., 2014); dla energii jądrowej UNECE (2021) podaje 5,1–6,4 g CO₂-eq/kWh.

CIEKAWOSTKA

Podczas samej pracy elektrownia jądrowa nie emituje CO₂ w ogóle – jej niewielki ślad bierze się głównie z etapu budowy (beton, stal) oraz produkcji paliwa.

wa emituje w całym cyklu życia ok. 12 gramów CO₂ na kilowatogodzinę, a według raportu Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ (UNECE) – jeszcze mniej, zaledwie 5–6 gramów, najmniej ze wszystkich badanych źródeł¹⁹. Mediana to wartość środkowa: połowa zebranych w literaturze oszacowań jest od niej niższa, a połowa wyższa. Podaje się ją zamiast zwykłej średniej, bo pojedynczy skrajny wynik jej nie zniekształca. Dla porównania: węgiel to ok. 820 gramów, gaz ok. 490, fotowoltaika ok. 40–50, a wiatr – podobnie jak atom – ok. 12. Innymi słowy, prąd z elektrowni jądrowej jest pod względem oddziaływania na klimat porównywalny z wiatrem, czystszy niż każdy rodzaj paneli słonecznych i kilkadziesiąt razy czystszy od węgla.

Skąd w ogóle bierze się te kilkanaście gramów? Głównie z budowy (dużo betonu i stali) oraz z wydobycia paliwa. To emisje jednorazowe lub rozłożone na dekady pracy, więc w przeliczeniu na każdą wyprodukowaną kilowatogodzinę wychodzą znikome. Warto dodać, że ten sam raport ONZ wskazał energię jądrową jako źródło o najmniejszym zapotrzebowaniu na teren i na metale – co również ma znaczenie dla środowiska (zob. pyt. 54).

Czy taki rachunek w ogóle da się przeprowadzić rzetelnie? Tak – analiza cyklu życia to dojrzała metoda o regułach opisanych normami (ISO 14040 i 14044), a przytoczone wartości nie pochodzą z pojedynczej pracy. Mediana IPCC powstała z przeglądu kilkudziesięciu publikacji, sprowadzonych wcześniej do wspólnych założeń w ramach tak zwanej harmonizacji, a raport UNECE policzył emisje jednym spójnym modelem dla różnych regionów świata. Rozbieżności między starszymi a nowszymi oszacowaniami

¹⁹ Emisje w całym cyklu życia (budowa, wydobycie i przygotowanie paliwa, praca, likwidacja): energia jądrowa – mediana 12 g CO₂-eq/kWh wg IPCC (AR5, WG III, aneks III: S. Schlömer i in., 2014, rozrzut literaturowy 3,7–110 g) oraz 5,1–6,4 g wg UNECE („Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options”, 2021, aktualizacja 2022). Dla porównania (mediany IPCC, w nawiasach zakresy UNECE): węgiel ok. 820 g (751–1095 g), gaz ok. 490 g (403–513 g), fotowoltaika ok. 41–48 g (8–83 g), wiatr ok. 11–12 g (7,8–23 g), woda ok. 24 g (6–147 g). Metodykę LCA opisują normy ISO 14040/14044, harmonizacja badań dla energii jądrowej: E.S. Warner, G.A. Heath, „Journal of Industrial Ecology”, 2012 (program NREL LCA Harmonization).

też mają proste wytłumaczenie: wynik zależy między innymi od zasobności rudy uranu, sposobu wzbogacania (dawne, energochłonne zakłady dyfuzyjne zastąpiły wielokrotnie oszczędniejsze wirówki) oraz od tego, jak długo elektrownia pracuje. Im dłużej służy, tym mniejsza porcja emisji z budowy przypada na każdą wyprodukowaną kilowatogodzinę – a nowoczesne bloki projektuje się na sześćdziesiąt i więcej lat pracy. Krótko: jeśli celem jest ograniczenie emisji, atom jest częścią rozwiązania, a nie problemu.

ILE WODY POTRZEBUJE ELEKTROWNIA JĄDROWA I JAK ODDZIAŁUJE NA MORZE, RZĘKĘ LUB JEZIORO, Z KTÓREGO KORZYSTA?

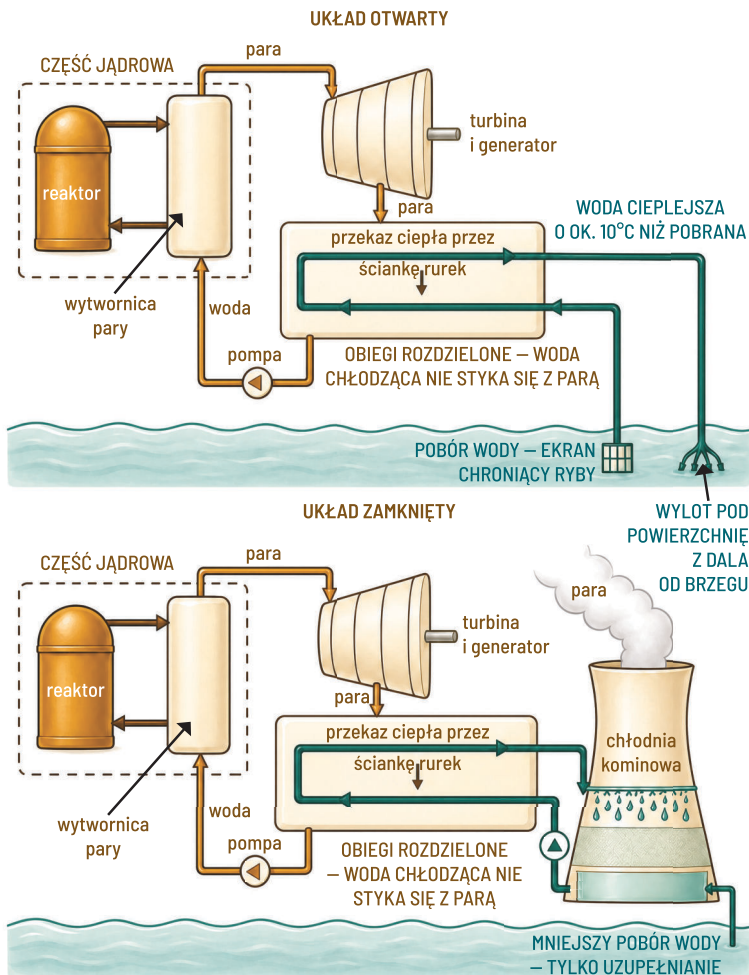
50

Zacznijmy od częstego nieporozumienia: woda pobierana z morza, rzeki lub jeziora potrzebna do chłodzenia elektrowni jądrowej nie chłodzi samego paliwa w rdzeniu, tylko odbiera tę część ciepła, którego – z samych praw fizyki – nie da się zamienić na prąd elektryczny (zob. pyt. 8). To ostatni, trzeci obieg wody, całkowicie oddzielony od części jądrowej. Może on odbierać to pozostałe ciepło na dwa sposoby (rys. 9.2).

Układ otwarty (przepływowy). Elektrownia pobiera wodę z morza, dużej rzeki lub jeziora, przepuszcza ją przez skraplacze i oddaje z powrotem – cieplejszą. Duży blok pobiera w ten sposób ok. 50 tysięcy litrów wody na sekundę. W skraplaczach woda ta ogrzewa się zwykle o około dziesięć stopni, po czym wraca do źródła i szybko miesza się z otaczającymi wodami – tak, aby poza wyznaczoną strefą mieszania temperatura rzeki czy morza wzrosła już tylko nieznacznie. Co ważne, przez cały ten czas pozostaje ona całkowicie oddzielona od części jądrowej: niczego z niej nie wypłukuje, jedynie odbiera ciepło.

Układ zamknięty (z chłodniami kominowymi). Tu ta sama woda krąży w kółko, a ciepło oddaje w wielkich chłodniach kominowych – częściowo odparowując. Pobór wody ze źródła jest wtedy znacznie mniejszy, bo trzeba uzupełnić tylko tę część, która odparowała – zwykle 2–3%. To

właśnie z tych chłodni unoszą się białe kłęby, które wielu bierze za dym – a to zwykła para wodna (rys. 9.3).



RYŚ. 9.2 Dwa sposoby odprowadzania ciepła: układ otwarty (woda wraca do źródła cieplejsza) i zamknięty (ciepło uchodzi jako para z chłodni kominowej).



RYS. 9.3 Para wodna nad chłodniami kominowymi elektrowni jądrowej.

Jaki jest realny wpływ na środowisko? Nie ma sensu go bagatelizować. Najważniejszy jest efekt termiczny: cieplejsza woda zawiera mniej tlenu i może zaburzać życie w rzece, dlatego prawo wyznacza ściśle limity, o ile stopni i do jakiej temperatury wolno podgrzać wodę – a przekroczenie limitu wymusza ograniczenie mocy elektrowni (o tym w pyt. 53). Drugi efekt to zasysanie drobnych organizmów i ryb przy ujęciu wody – ogranicza się go siatkami, ekranami i odpowiednim doбором prędkości poboru. Wszystko to jest stale badane w ramach monitoringu biologicznego (zob. pyt. 52).

A co dzieje się tuż przy samym wylocie? Trzeba powiedzieć wprost: woda jest tam realnie cieplejsza – o tyle, o ile ogrzała się w skraplaczach, czyli zwykle o około dziesięć stopni. Wokół zrzutu powstaje więc obszar wody cieplejszej niż otoczenie, nazywany plamą ciepła. Nikt nie udaje, że go nie ma. Dopuszczalna temperatura oddawanej wody i dopuszczalny przyrost temperatury w samym akwenu są określone przepisami i doprecyzowane w zgodach wydawanych dla konkretnej inwestycji – po zbadaniu, jak zachowuje się dane morze, jezioro czy rzeka. Ich dotrzymanie sprawdza się potem pomiarami przez cały okres pracy elektrowni (zob. pyt. 52), a w razie potrzeby elektrownia ogranicza moc (zob. pyt. 53).

Jak rozległa jest plama ciepła, zależy przede wszystkim od sposobu zrzutu. Starsze elektrownie oddawały wodę przy brzegu, otwartym kanałem – ciepła woda, lżejsza od chłodnej, rozlewała się wtedy po powierzchni i tworzyła

CZY WIESZ, ŻE...

Największym wrogiem ujęcia wody chłodzącej bywa nie awaria, lecz ława meduz. Gdy tysiące z nich naraz oblepiają obrotowe sita na wlocie, przepływ wody spada i blok trzeba wyłączyć. Tak stało się m.in. w szkockim Torness w 2011 r. i w szwedzkim Oskarshamn w 2013 r. W obu przypadkach oczyszczenie sit i powrót do pracy zajęły kilka dni. Tak działa ochrona ujęcia: sita zatrzymują organizmy, zanim trafią do instalacji.

WARTO WIEDZIEĆ

Blok o mocy około 1000 MW chłodzony w układzie otwartym przepuszcza przez skraplacze mniej więcej 50 000 litrów wody na sekundę. Woda ta ani razu nie styka się z częścią jądrową – jedynie odbiera ciepło i oddaje je z powrotem morzu lub rzece.

rozległą smugę, dobrze widoczną na zdjęciach w podświetleniu. Nowsze rozwiązania obracają tę samą fizykę na swoją korzyść: wodę wyprowadza się daleko od brzegu i głęboko pod powierzchnię, przez dyfuzory – zestawy dysz wyrzucających ją z dużą prędkością. Strumień od razu porwuje ze sobą chłodną wodę z otoczenia i oddaje jej ciepło, zanim zdąży wypłynąć na powierzchnię. Przy takim zrzuć różnica temperatury na powierzchni liczy się już w pojedynczych stopniach, a obszar, na którym w ogóle daje się ją zmierzyć, ma rozmiary rzędu pojedynczych kilometrów kwadratowych – i zmienia kształt wraz z wiatrem i prądami. Skutki są więc lokalne, ale nie zerowe: zimą woda przy wylocie bywa wolna od lodu i gromadzą się w niej ryby, a w najbliższym sąsiedztwie zmienia się skład gatunkowy organizmów dennych.

Warto na koniec dodać kontekst. Elektrownie nad morzem mają tu najłatwiej: morze jest niemal nieograniczonym odbiornikiem ciepła, a jego temperatura zmienia się o ułamki stopnia. Dlatego lokalizacje nadmorskie są pod względem chłodzenia najkorzystniejsze i najmniej wrażliwe na upały – i właśnie tak zaprojektowano pierwszą polską elektrownię jądrową w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino, która będzie chłodzona wodą Bałtyku, pobieraną i odprowadzaną tunelami wyprowadzonymi w głąb morza. To samo wyzwanie – pobór i podgrzewanie wody – dotyczy zresztą również elektrowni węglowych i gazowych chłodzonych wodą z rzeki. Nie jest to specyfika atomu.

51

CO ELEKTROWNIA UWALNIA DO OTOCZENIA PODCZAS NORMALNEJ PRACY I JAK KONTROLUJE SIĘ TE UWOLNIENIA?

S koro reaktor jest szczelnie zamknięty za wieloma barierami (zob. pyt. 19), skąd w ogóle jakiegokolwiek uwolnienia? Bierze się to stąd, że śladowe ilości substancji promieniotwórczych powstają w wodzie i gazach obiegu technologicznych elektrowni. W czasie normalnej pracy elektrowni substancji tych jest bardzo mało (rys. 9.4). Są

one najpierw oczyszczane i filtrowane, a następnie dokonuje się ściśle kontrolowanych niewielkich uwolnień, tak aby miały wielokrotnie niższy poziom promieniowania niż tło naturalne. Co konkretnie się uwalnia? Przede wszystkim tryt – promieniotwórczy izotop wodoru, powstający zresztą także naturalnie w górnych warstwach atmosfery. Emitowane przez niego cząstki beta mają tak małą energię, że przebywają w powietrzu zaledwie kilka milimetrów i nie przenikają nawet przez zewnętrzną, martwą warstwę naskórka. Drugą grupą są niewielkie ilości promieniotwórczych gazów szlachetnych (jak ksenon czy krypton), które szybko się rozpraszają i rozpadają. Do tego dochodzą śladowe ilości węgla-14. Kluczowe jest jednak nie „co”, lecz „ile”: uwolnienia są prawnie limitowane, a realne wartości utrzymuje się głęboko poniżej tych limitów, zgodnie z zasadą ALARA (od ang. *as low as reasonably achievable* – „tak nisko, jak to rozsądnie osiągalne”), w polskim prawie znaną jako zasada optymalizacji ochrony radiologicznej (zob. pyt. 40). W efekcie dawka, jaką te uwolnienia dają mieszkańcom okolicy, stanowi ułamek procenta naturalnego tła promieniowania jonizującego (zob. pyt. 35) – jest praktycznie nierozróżnialna od tła, którego i tak nie da się uniknąć.

Jak się tego pilnuje?²⁰ Elektrownia mierzy własne uwolnienia w sposób ciągły, w każdym miejscu, przez które cokolwiek może wydostać się na zewnątrz, i raportuje wyniki dozorowi jądrowemu – ten je weryfikuje, a pracę elektrowni kontroluje także na miejscu. Niezależnie od tego prowadzi się monitoring otoczenia obiektu: próbki

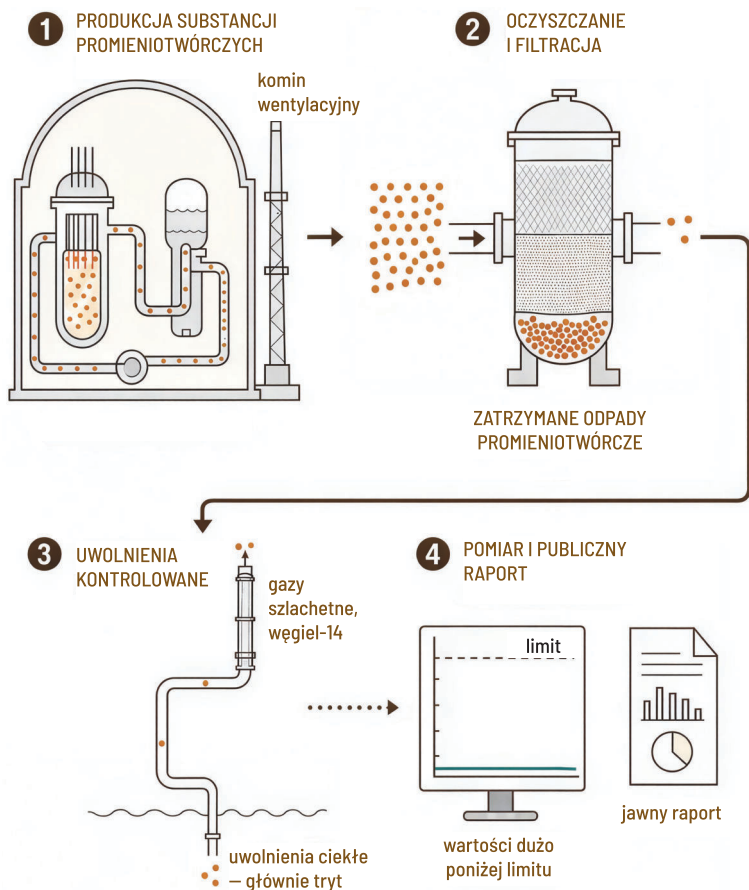
CZY WIESZ, ŻE...

Elektrownia węglowa uwalnia do otoczenia więcej naturalnych substancji promieniotwórczych (uran i tor z popiołu) niż elektrownia jądrowa podczas normalnej pracy.

ZAPAMIĘTAJ!

Wszystkie uwolnienia substancji promieniotwórczych z elektrowni jądrowych są prawnie limitowane, stale mierzone i publicznie raportowane – a realne wartości utrzymuje się głęboko poniżej dozwolonych granic.

²⁰Podział ról w monitoringu radiacyjnym opisuje ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (m.in. art. 72, dotyczący oceny sytuacji radiacyjnej kraju) oraz materiały Państwowej Agencji Atomistyki. W monitoringu lokalnym wokół obiektów jądrowych pomiary prowadzi służba jednostki eksploatującej oraz dozór jądrowy. W praktyce polskiej: w ośrodku jądrowym w Świerku mierzy Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych NCBJ, a w otoczeniu ośrodka dodatkowo Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej na zlecenie Prezesa PAA (badane są m.in. woda rzeczna i studzienna, gleba i trawa); analogicznie przy Krajowym Składowisku Odpadów Promieniotwórczych w Różanie. Sieć ogólnokrajową tworzy m.in. 65 automatycznych stacji PMS należących do PAA oraz stacje CLOR, IMGW-PIB i MON. Za: paa.gov.pl, „Ocena sytuacji radiacyjnej kraju”.



RYS. 9.4 Uwolnienia są śladowe, oczyszczane, limitowane i mierzone – a dawka, jaką dają mieszkańcom, to ułamek naturalnego tła.

powietrza, wody, gleby, roślin i żywności bada wyspecjalizowane laboratorium na zlecenie dozoru, a nie sam operator. Nad tym wszystkim działa jeszcze ogólnokrajowa sieć stacji pomiarowych, pracująca całą dobę (zob. pyt. 39). Wyniki trafiają do publicznych raportów, więc nie chodzi

tu o zaufanie do kogokolwiek, lecz o jawne liczby, które każdy może sprawdzić.

Dla właściwej skali warto przywołać zestawienie, które wielu zaskakuje: elektrownia węglowa uwalnia do otoczenia więcej naturalnych substancji promieniotwórczych niż jądrowa – bo węgiel zawiera śladowe ilości uranu i toru, które trafiają do popiołu i do powietrza. Do tego dochodzą dwutlenek węgla, tlenki siarki i azotu, pyły i rtęć – których elektrownia jądrowa nie emituje wcale. Paradoksalnie więc to sąsiedztwo elektrowni węglowej oznacza większe realne narażenie niż sąsiedztwo jądrowej.

JAK BADA SIĘ ŚRODOWISKO PRZED BUDOWĄ ELEKTROWNI I PRZEZ CAŁY OKRES JEJ PRACY?

52

Cała rzecz opiera się na prostym, ale potężnym pomysle: żeby wiedzieć, czy elektrownia coś zmienia, trzeba najpierw dokładnie znać stan „przed”. Dlatego na długo przed wbiciem pierwszej łopaty prowadzi się wieloletnie badania środowiska w ramach oceny oddziaływania na środowisko (rys. 9.5). Mierzy się naturalne tło promieniowania, jakość powietrza i wód, skład gleby, a także inwentaryzuje przyrodę (rośliny i zwierzęta) oraz bada zdrowie i warunki życia ludzi. Efektem jest tak zwany stan zerowy – szczegółowa „fotografia” okolicy sprzed inwestycji.

Ten stan zerowy to punkt odniesienia na całą przyszłość. Gdy elektrownia już pracuje, monitoruje się dokładnie te same wielkości – i porównuje z wartościami sprzed budowy (rys. 9.6). Dopiero takie porównanie pozwala rzetelnie odpowiedzieć, czy cokolwiek się zmieniło, a jeśli tak, to o ile. Monitoring jest przy tym szeroki: obejmuje nie tylko powietrze i wodę, ale i glebę, rośliny, ryby, a nawet mleko od okolicznych krów – bo to dobre „czujniki” ewentualnych zmian w łańcuchu pokarmowym.

Tak właśnie wyglądało to w Polsce. Dla lokalizacji Lubiatowo-Kopalino badania terenowe i pomiary prowadzono

ZAPAMIĘTAJ!

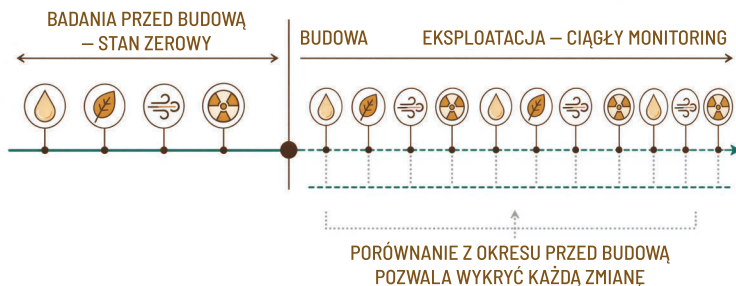
Monitoring środowiska wokół elektrowni obejmuje nie tylko powietrze i wodę, ale i glebę, rośliny, ryby, a nawet mleko od okolicznych krów – bo dobrze pokazuje ono zmiany w łańcuchu pokarmowym.

przez kilka lat, i to po obu stronach linii brzegowej: na lądzie inwentaryzowano ptaki, nietoperze i roślinność, a na morzu mierzono prądy, zasolenie, falowanie i temperaturę wody. Ich owocem był raport o oddziaływaniu na środowisko, liczący wraz z załącznikami około 19 tysięcy stron, a zwieńczeniem — wydana we wrześniu 2023 r. decyzja środowiskowa. Ponieważ elektrownia stanie nad Bałtykiem, dokumentację konsultowano również z państwami regionu w ramach tak zwanej procedury transgranicznej.

Kto to wszystko robi? Warto rozróżnić dwie sytuacje, bo bywają mylone. Badania przed budową zleca i opłaca inwestor — i nie ma w tym nic złego, taka jest zasada w całym prawie ochrony środowiska: kto planuje przedsięwzięcie, ten dowodzi, że jest ono dopuszczalne. Niezależność wchodzi na innym poziomie: raport ocenia urząd (w Polsce — Generalny Dyrektor Ochrony Środowiska), który może żądać uzupełnień albo odmówić zgody, a przed decyzją zasięga opinii kolejnych instytucji — sanitarnych, wodnych, a w sprawach jądrowych także dozoru. Inaczej jest, gdy elektrownia już pracuje: wtedy pomiary prowadzi się równolegle. Operator mierzy u siebie, otoczenie obiektu bada na zlecenie dozoru jądrowego wyspecjalizowane laboratorium, a ponad tym działa krajowa sieć stacji i placówek — należących do dozoru, inspekcji ochrony środowiska,



RYS. 9.5 Wieleletnie badania terenowe przed budową tworzą „stan zerowy” — obraz okolicy sprzed inwestycji. Na zdjęciu: badania jakości wody na jeziorze (pobieranie próbek wody i pomiary terenowe).



RYC. 9.6 Stan zerowy sprzed inwestycji jest odniesieniem, z którym przez cały czas pracy elektrowni porównuje się wyniki monitoringu.

służby sanitarnej i wojska (zob. pyt. 39). Wyniki są jawne. Dla mieszkańca płynie z tego konkretny wniosek: wpływ elektrowni na środowisko nie jest przedmiotem deklaracji, lecz wieloletniego, porównywalnego z „przedtem” i publicznie dostępnego pomiaru.

CZY ZMIANY KLIMATU – UPAŁY, SUSZE, SZTORMY – ZAGRAŻAJĄ PRACY ELEKTROWNII JĄDROWYCH?

53

To zasadne i ważne pytanie, bo bywa używane jako zarzut. Zacznijmy od mechanizmu. Elektrownia jądrowa potrzebuje wody do chłodzenia (zob. pyt. 50).

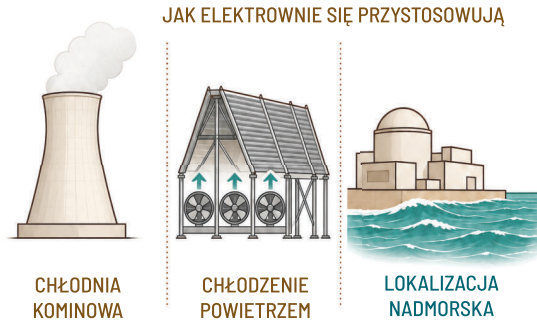
W czasie upałów woda w rzece lub jeziorze staje się cieplejsza, co wpływa na pogorszenie odbioru ciepła w skraplaczu turbiny, a to przekłada się na mniejszą sprawność elektrowni. Dodatkowo temperatura wody oddawanej do środowiska mogłaby przekroczyć ustalone limity – około 30–35°C (rys. 9.7). Susze mogą w ogóle spowodować, że wody do chłodzenia będzie zbyt mało. W tych przypadkach może być konieczne ograniczenie mocy elektrowni, a nawet całkowite jej wyłączenie. Nie jest to związane z żadnym zagrożeniem dla reaktora.

Jak duży jest to problem naprawdę? Znacznie mniejszy, niż sugerują nagłówki. Analizy obejmujące łącznie ponad



RYS. 9.7

W zestawieniu zdarzeń z lat 2003–2022 ograniczenia związane z upałami i suszą stanowiły łącznie około 0,6% produkcji dotkniętych nimi reaktorów. Zwykle wynikały z ochrony akwenu lub pogorszenia sprawności, nie z awarii reaktora.



pięćset lat pracy reaktorów pokazują, że fale upałów obniżały produkcję dotkniętych nimi bloków średnio o 0,6% – i nigdy o więcej niż 1,3% w skali floty któregośkolwiek kraju. We Francji, kraju o największym udziale atomu w produkcji prądu, straty z tego tytułu wynoszą od 2000 r. średnio ok. 0,3% rocznej produkcji. Nawet w rekordowym pod względem upałów 2022 r. połowa europejskich flot jądrowych wykorzystwała ponad 91% swojej mocy, a ich produkcja była o rząd wielkości mniej zmienna niż produkcja okolicznych farm wiatrowych i słonecznych²¹.

²¹M. Tadrous, D. Novog, G. Calic, „Cooling under fire: Can nuclear power remain thermodynamically resilient in a warming, water-constrained world?”, *Energy Policy*, 2026 (McMaster University). Autorzy zestawili dane o ograniczeniach produkcji wywołanych pogodą z lat 2003–2022 z miesięcznymi danymi produkcyjnymi sześciu europejskich flot jądrowych. Mediana współczynnika wykorzystania mocy tych flot w 2022 r. wyniosła 90,9%, a jego zmienność w czasie fal upałów była o rząd wielkości mniejsza niż dla zlokalizowanych w tych samych rejonach źródeł wiatrowych i słonecznych.

Czy da się temu zaradzić? Tak – i to na wiele sposobów. Elektrownie z chłodniami kominowymi i chłodzeniem powietrznym są znacznie mniej wrażliwe, a te nad morzem – praktycznie odporne, bo morze jest ogromnym, stabilnym odbiornikiem ciepła (dlatego nowe elektrownie chętnie lokuje się na wybrzeżu). Dzięki takim rozwiązaniom Francja ograniczyła „upałowe” straty o ponad 90%. Warto też dodać uczciwe porównanie: dokładnie te same ograniczenia dotyczą elektrowni węglowych i gazowych chłodzonych wodą z rzek – a susza dodatkowo utrudnia dowóz węgla barkami. To nie jest słabość wyłączanie atomu, lecz każdej wielkiej siłowni korzystającej z rzeki.

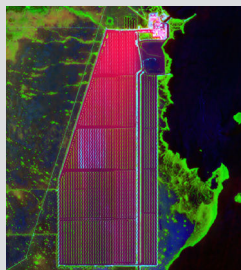
Zmiany klimatu stawiają przed energetyką – w tym jądrową – realne wyzwania związane z wodą i temperaturą. Są one jednak niewielkie w skali produkcji, dobrze rozpoznane i możliwe do złagodzenia przez projekt i lokalizację. A w szerszym rachunku atom wciąż zostaje po właściwej stronie: dostarcza ogromne ilości energii niemal bez emisji, pomagając ograniczać te zmiany u źródeła.

Krokodyle w kanałach chłodzących

W latach 70. XX wieku krokodyl amerykański był w Stanach Zjednoczonych o krok od zniknięcia: polowania i zabudowa wybrzeża zostały z całej populacji kilkaset osobników. Mniej więcej wtedy niecałe czterdzieści kilometrów od Miami ruszała elektrownia jądrowa Turkey Point. Zamiast chłodni kominowych wykopano dla niej sieć kanałów chłodzących o długości około 270 kilometrów – z lotu ptaka wygląda jak gigantyczny grzebień wtopiony w wybrzeże.

Gdy w 1978 r. pracownicy znaleźli na wale między kanałami krokodyle gniazdo, spółka zamiast wypłoszyć lokatorów zatrudniła biologów – i okazało się, że budowniczowie przypadkiem odtworzyli siedlisko znikające z florydzkiego wybrzeża: suche wały nadawały się na jaja, słone kanały odpowiadały dorosłym zwierzętom, słodkowodne oczka służyły za żłobek, a teren elektrowni był zamknięty dla ludzi.

Dziś w kanałach Turkey Point żyje mniej więcej co czwarty krokodyl amerykański w Stanach Zjednoczonych.



System kanałów chłodzących Elektrowni Jądrowej Turkey Point na zobrazeniu wykorzystującym pasmo termalne satelity Landsat 8



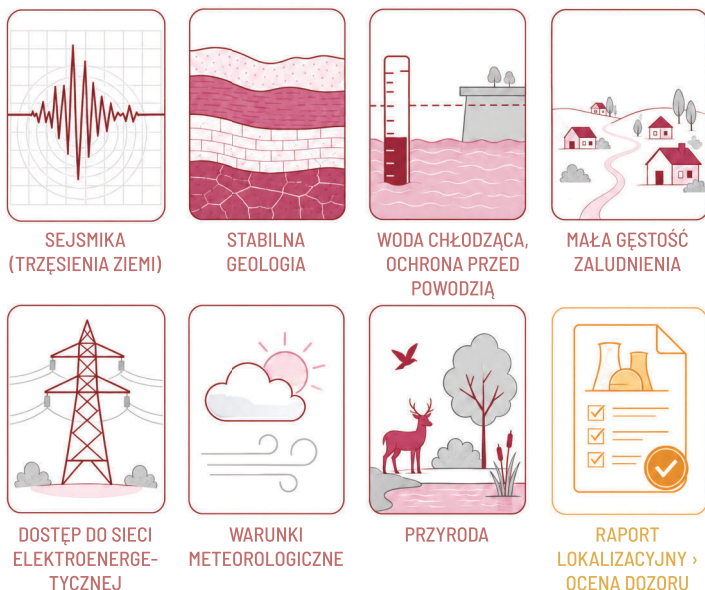
inwestycja, gospodarka, sąsiedztwo

JAK WYBIERA SIĘ LOKALIZACJĘ ELEKTROWNI JĄDROWEJ I CO BADA SIĘ LATAMI PRZED DECYZJĄ?

54

Wybór miejsca pod elektrownię to jeden z najdłuższych i najbardziej drobiazgowych etapów całego przedsięwzięcia – bo od niego zależy bezpieczeństwo na dziesięciolecia. Bada się jednocześnie wiele niezależnych kryteriów (rys. 10.1).

Najważniejsze jest podłoże. Sprawdza się sejsmikę, czyli historię i ryzyko trzęsień ziemi, oraz stabilność geologiczną gruntu – elektrownia musi stać na stabilnym, dobrze rozpoznanym podłożu, z dala od aktywnych uskoku. Drugi czynnik to woda: potrzebny jest dostęp do dużego, stabilnego źródła wody chłodzącej (morze, duża rzeka, jezioro).



RYŚ. 10.1 Lokalizację ocenia się według wielu niezależnych kryteriów naraz – od trzęsień ziemi i geologii po dostęp do wody i gęstość zaludnienia.

WARTO WIEDZIEĆ

Sprawdza się nie tylko natura. Ocena lokalizacji obejmuje też zagrożenia stworzone przez człowieka: pobliskie lotniska, rurociągi, zakłady chemiczne. W niektórych krajach przyjmuje się, że zdarzenia o prawdopodobieństwie mniejszym niż raz na dziesięć milionów lat pracy reaktora wolno w projektowaniu pominąć.

ro – pyt. 50), a jednocześnie teren musi być bezpieczny od powodzi i – nad morzem – od sztormów i fal. Trzeci czynnik to ludzie: preferuje się okolice o niższej gęstości zaludnienia i z możliwością podłączenia do sieci elektroenergetycznej. Do tego dochodzą warunki meteorologiczne, przyroda (zob. pyt. 52) i wiele innych czynników.

Kto o tym decyduje i na jakiej podstawie? Z pewnością nie sam inwestor we własnej sprawie. Wynikiem wieloletnich badań terenowych jest obszerny raport lokalizacyjny, który poddaje się ocenie niezależnego dozoru jądrowego (w Polsce – Państwowej Agencji Atomistyki). Dozór analizuje dane i może lokalizację odrzucić. To pierwszy z wielu punktów kontrolnych całego procesu (zob. pyt. 55), który pokazuje, że o miejscu decydują twarde kryteria techniczne, a nie wygoda czy pośpiech.

Tak wyglądało to również w Polsce. Zanim nadmorska lokalizacja Lubiatowo-Kopalino w gminie Choczewo została wskazana jako preferowana dla pierwszej polskiej elektrowni, przez lata prowadzono tam badania środowiskowe i lokalizacyjne – od geologii i sejsmiki, przez pomiary meteorologiczne, po szczegółowe inwentaryzacje przyrodnicze. Sam raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, złożony w 2022 r., liczył około 19 tysięcy stron (zob. pyt. 7 i 56).

55

JAKIE ZGODY I POZWOLENIA POPRZEDZAJĄ BUDOWĘ – I KTO KONTROLUJE KAŻDY ETAP?

Elektrownia jądrowa jest jedną z najściślej reglamentowanych inwestycji, jakie w ogóle istnieją. Droga od pomysłu do pierwszego prądu prowadzi przez łańcuch zgód, z których każda jest osobną bramką kontrolną (rys. 10.2). W Polsce jego główne ogniwa to:

decyzja zasadnicza – polityczno-formalna zgoda na to, by dana inwestycja w ogóle mogła być realizowana; decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach (środowiskowa) – wydawana po ocenie oddziaływania na środowisko i po



RYS. 10.2 Droga do pierwszego prądu prowadzi przez łańcuch niezależnych zgód – od decyzji zasadniczej po zezwolenie na eksploatację.

konsultacjach społecznych przez Generalnego Dyrektora Ochrony Środowiska (zob. pyt. 56); decyzja o ustaleniu lokalizacji – potwierdzająca konkretne miejsce; zezwolenie dozoru jądrowego na budowę – wydawane przez Prezesa PAA po ocenie bezpieczeństwa jądrowego; pozwolenie na budowę – wydawane przez wojewodę; a na końcu – po zbudowaniu i sprawdzeniu obiektu – zezwolenie na rozruch i eksploatację.

Kto tego pilnuje? Nie jeden urząd, lecz kilka niezależnych: rząd, organy środowiskowe, wojewoda, nadzór budowlany i – przede wszystkim – dozór jądrowy, który czuwa nad bezpieczeństwem na każdym etapie i może wstrzymać projekt, jeśli coś budzi wątpliwości. Ta wielość kontroli bywa krytykowana za przewlekłość, ale ma głęboki sens: sprawia, że żadna pojedyncza instytucja ani inwestor nie decyduje o wszystkim samodzielnie. Cały proces trwa zwykle wiele lat – i tak ma być.

Ta ścieżka nie jest zresztą teorią – pierwsza polska elektrownia właśnie ją pokonuje. Projekt w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino ma już za sobą decyzję zasadniczą, środowiskową i lokalizacyjną (wszystkie wydane w 2023 r.), a w 2026 r. inwestor złożył do Prezesa PAA wnioski o zezwolenie na budowę – dozór jądrowy analizuje obecnie obszerną dokumentację, w tym wstępny raport bezpieczeństwa (zob. pyt. 7).

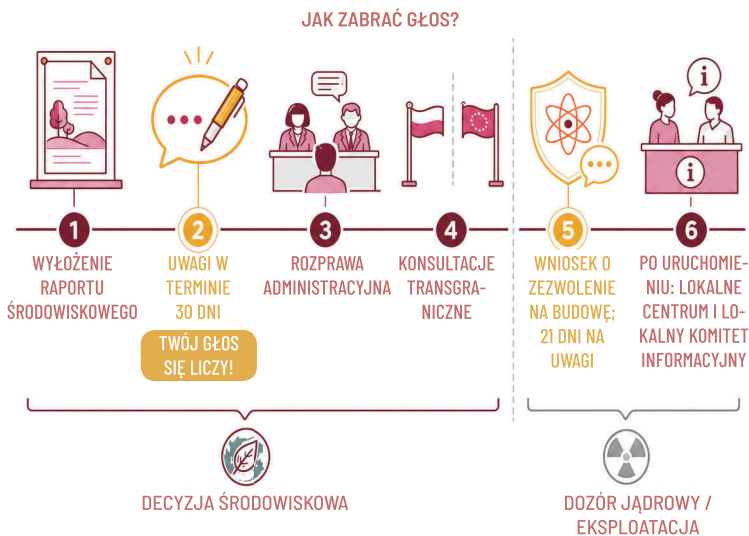
WARTO WIEDZIEĆ

Cała droga od decyzji zasadniczej do zezwolenia na eksploatację trwa zwykle wiele lat – ta „powolność” jest celowa i wynika z wielości badanych aspektów inwestycji i liczby niezależnych kontroli.

CZY MIESZKAŃCY MAJĄ WPŁYW NA INWESTYCJĘ? O KONSULTACJACH I UDZIALE SPOŁECZEŃSTWA

Wbrew obiegujowej opinii mieszkańcy nie są tu tylko „informowani po fakcie”. Prawo daje im konkretne, umocowane narzędzia wpływu – i to nie raz, lecz na kilku etapach. Trzeba tylko wiedzieć, kiedy i jak z nich skorzystać (rys. 10.3).

Najważniejszym momentem jest postępowanie w sprawie oceny oddziaływania na środowisko (zob. pyt. 52). Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko zostaje publicznie wyłożony do wglądu, a przez wyznaczony czas – w tym postępowaniu jest to 30 dni – każdy, nie tylko mieszkaniec najbliższej okolicy, może się z nim zapoznać i złożyć uwagi oraz wnioski. Organ prowadzący postępowanie ma obowiązek je rozpatrzyć i odnieść się do nich.



RYŚ. 10.3 Mieszkańcy mają konkretne momenty, w których mogą zabrać głos – najważniejszy to złożenie uwag w czasie wyłożenia raportu środowiskowego.

Bywają też otwarte rozprawy administracyjne, na których można wystąpić osobiście. To nie jest sonda opinii „do szuflady” – uwagi stają się częścią akt sprawy.

Wpływ elektrowni jądrowej sięga nawet poza granice kraju. Jeśli inwestycja może oddziaływać na środowisko państw sąsiednich, uruchamia się konsultacje transgraniczne (na podstawie konwencji z Espoo) – sąsiednie kraje i ich mieszkańcy również mogą zgłaszać uwagi. Tak było przy pierwszej polskiej elektrowni: stanowiska w konsultacjach transgranicznych zajęło aż 14 państw – od najbliższych sąsiadów po Austrię, Holandię i Węgry – a na wniosek czterech z nich zorganizowano dodatkowe spotkanie eksperckie i wszystkim udzielono wyjaśnień przed wydaniem decyzji środowiskowej.

Drugie okno konsultacji otwiera się później i bywa przeoczone, bo dotyczy postępowania z pozoru czysto technicznego. Gdy inwestor składa do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki wniosek o zezwolenie na budowę obiektu jądrowego, dozór ma obowiązek niezwłocznie ogłosić w Biuletynie Informacji Publicznej treść wniosku wraz ze skróconym raportem bezpieczeństwa oraz zawiadomić o wszczęciu postępowania i o możliwości składania uwag – tym razem w terminie 21 dni²². Obwieszczenie musi się przy tym ukazać także w prasie obejmującej gminę inwestycji i gminy sąsiednie, żeby nie umknęło tym, których dotyczy najbardziej. Uwagi można złożyć pisemnie, ustnie do protokołu albo pocztą elektroniczną – bez podpisu kwalifikowanego. Ewentualna rozprawa jest otwarta dla społeczeństwa, a w uzasadnieniu wydanej decyzji Prezes Agencji ma obowiązek napisać, w jaki sposób uwagi zostały uwzględnione.

Gdy zgody już zapadną, głos mieszkańców wcale nie milknie – przeciwnie, dopiero wtedy zyskuje stałe instytucje. Prawo atomowe posługuje się pojęciem *społeczności*

CZY WIESZ, ŻE...

Espoo to miasto pod Helsinkami. Tam 25 lutego 1991 r. podpisano konwencję o transgranicznych ocenach oddziaływania na środowisko – pierwszą wiążącą umowę międzynarodową poświęconą w całości ocenom środowiskowym. Polska ratyfikowała ją w 1997 r.

²² Art. 39d ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (t.j. Dz.U. 2026 poz. 1). Trzydziestodniowy termin na uwagi w postępowaniu środowiskowym – art. 33 ust. 1 pkt 7 ustawy z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko.

CIEKAWOSTKA

Francuzi mają lokalne komitety od 1981 r. Przy każdej francuskiej instalacji jądrowej działa lokalna komisja informacyjna (CLI). Zasiadają w niej radni, parlamentarzyści, związkowcy, lekarze i organizacje ekologiczne. Dziś jest ich 35.

lokalnej²³, obejmującym mieszkańców gminy, na której terenie stoi elektrownia, oraz wszystkich gmin leżących w promieniu 15 km od jej granic. Najpóźniej w dniu złożenia wniosku o zezwolenie na budowę inwestor ma obowiązek utworzyć Lokalne Centrum Informacyjne i prowadzić je aż do zakończenia likwidacji obiektu – a więc przez cały czas budowy, eksploatacji i rozbiórki, w praktyce ponad sto lat. Centrum na bieżąco gromadzi i udostępnia informacje o pracy elektrowni i o stanie bezpieczeństwa w jej otoczeniu, publikując je na swoich stronach oraz w lokalnym biuletynie. Sama gmina może dodatkowo powołać własny Gminny Punkt Informacyjny. Niezależnie od tego każdy – nie tylko sąsiad elektrowni – ma prawo zażądać od jej kierownictwa pisemnej informacji o stanie bezpieczeństwa oraz o wielkości i składzie uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska. Operator musi ją zresztą publikować co najmniej raz na dwanaście miesięcy (zob. pyt. 39).

Najciekawsze narzędzie ustawa oddaje jednak wprost w ręce mieszkańców. Społeczność lokalna może utworzyć Lokalny Komitet Informacyjny – ciało społecznego monitoringu, do którego wejść może każdy pełnoletni mieszkaniec korzystający z pełni praw publicznych. Wystarczy zgłoszenie w urzędzie gminy. Komitet reprezentuje społeczność wobec inwestora i operatora, może zapraszać własnych ekspertów, żądać dostępu do dokumentów dotyczących budowy i eksploatacji, a nawet wyznaczyć pięć osób uprawnionych do wejścia na teren i do pomieszczeń elektrowni – w towarzystwie wyznaczonego pracownika i z pominięciem miejsc niedostępnych ze względów bezpieczeństwa jądrowego lub ochrony fizycznej. Co istotne, obsługę i finansowanie komitetu zapewnia gmina, a nie inwestor: jego działanie nie zależy więc od niczyjej dobrej woli.

Trzeba jednak uczciwie dopowiedzieć, czym udział społeczeństwa nie jest. Nie jest referendum ani prawem weta:

²³ Rozdział 4a Prawa atomowego (art. 39I–39o): definicja społeczności lokalnej, Lokalne Centrum Informacyjne, Lokalny Komitet Informacyjny i Gminny Punkt Informacyjny. Prawo do pisemnej informacji o stanie bezpieczeństwa i o uwolnieniach – art. 35a tej ustawy.

organ ma obowiązek uwagi rozpatrzyć i wyjaśnić, jak je potraktował, ale rozstrzyga według kryteriów technicznych i prawnych, a nie większością głosów. To i tak znacznie więcej, niż się zwykle sądzi – rzeczowy argument trafia do akt sprawy i musi doczekać się odpowiedzi, a jeśli procedury nie dopełniono, sądy potrafią uchylić wydaną już zgodę po skardze obywateli lub organizacji. Dla mieszkańca płynie stąd konkretny wniosek: warto śledzić obwieszczenia – w urzędzie gminy, w prasie lokalnej i w Biuletynie Informacji Publicznej – i złożyć uwagi w wyznaczonym terminie. To moment, w którym opinia naprawdę się liczy. Później pozostają stały dostęp do informacji i aktywny społeczny monitoring prowadzony przez Lokalny Komitet.

DLACZEGO BUDOWA ELEKTROWNI JĄDROWEJ TYLE KOSZTUJE – I OD CZEGO NAPRAWDĘ ZALEŻY CENA PRĄDU, KTÓRY Z NIEJ POPŁYNIE?

57

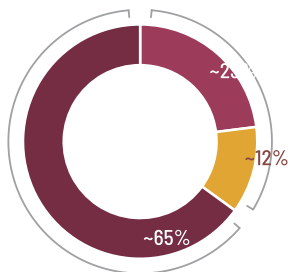
Zeby zrozumieć ekonomię atomu, trzeba spojrzeć na strukturę kosztów, a nie na samą cenę budowy (rys. 10.4). W nowej elektrowni jądrowej co najmniej 60% kosztu wyprodukowanej energii to koszt kapitałowy – czyli budowa i jej sfinansowanie. Składają się na to ogromne ilości betonu i stali, rozbudowane systemy bezpieczeństwa, lata pracy tysięcy ludzi (zob. pyt. 58) oraz odsetki od pożyczonego kapitału. To dlatego nagłówki o „miliardach” dotyczą właśnie budowy.

Ale teraz druga strona rachunku. Gdy elektrownia już stoi, jej bieżąca praca jest tania. Paliwo jądrowe – dzięki gigantycznej gęstości energii (zob. pyt. 1) – stanowi tylko kilkanaście procent kosztu, a eksploatacja i utrzymanie to kolejna niewielka część. W dodatku w cenę energii wliczone są już z góry środki na przyszłą likwidację i odpady (zob. pyt. 46). Efekt: koszt wytworzenia każdej kolejnej kilowatogodziny jest niski i stabilny, a skoki cen uranu w niewielkim tylko stopniu przekładają się na cenę prądu

Z CZEGO SKŁADA SIĘ KOSZT PRĄDU Z ELEKTROWNI JĄDROWEJ?

RYŚ. 10.4

W koszcie prądu z elektrowni jądrowej dominuje budowa (koszt kapitałowy). Paliwo to tylko kilkanaście procent — dlatego cena jest stabilna, a o jej poziomie decydują głównie koszty budowy i finansowania.



- BUDOWA I FINANSOWANIE (KOSZT KAPITAŁOWY) ~60-80%
- PALIWO — TYLKO KILKANAŚCIE %
- EKSPLOATACJA, UTRZYMANIE, FUNDUSZE NA ODPADY I LIKWIDACJĘ

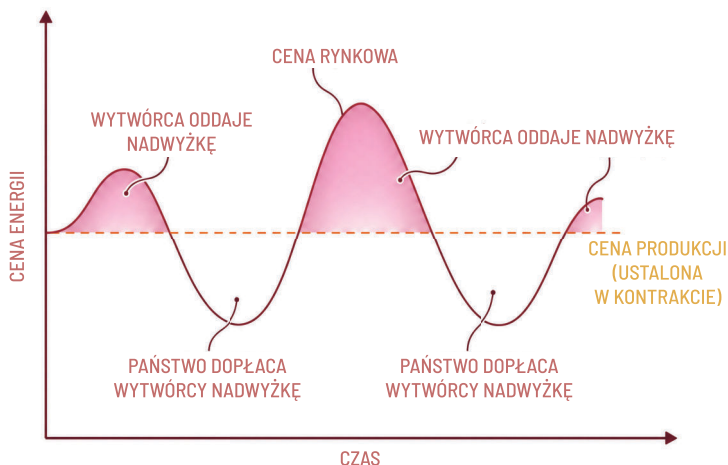
— inaczej niż przy gazie, którego cena potrafi zdominować cały rachunek (zob. pyt. 15).

CZY WIESZ, ŻE...

Ekonomiści posługują się pojęciem *overnight cost* — kosztu, jaki elektrownia pochłonięłaby, gdyby dało się ją postawić w jedną noc, bez naliczania odsetek. Różnica między nim a kosztem rzeczywistym to cena upływającego czasu.

Czy zatem prąd z nowej elektrowni na pewno będzie tani? Uczciwa odpowiedź brzmi: to zależy — i to od dwóch rzeczy, z których żadna nie jest ceną uranu. Pierwsza to dyscyplina budowy. Nowe bloki bywają oddawane z opóźnieniem i przekroczeniem budżetu — głośnym przykładem jest fińskie Olkiluoto 3, ukończone kilkanaście lat po terminie — podczas gdy projekty powtarzalne, budowane seryjnie według sprawdzonego wzoru, trzymały harmonogram znacznie lepiej. Druga rzecz to koszt pieniądza. Przy inwestycji, w której dominuje kapitał, a budowa trwa lata, o końcowej cenie energii bardziej niż technika decyduje oprocentowanie kredytów: ten sam blok sfinansowany tanim, cierpliwym kapitałem daje prąd konkurencyjny, a sfinansowany drogim kapitałem komercyjnym — może dać prąd rozczarowująco drogi.

I tu na scenę wchodzi rozwiązanie, o którym w Polsce będzie w najbliższych latach głośno: kontrakt różnicowy (ang. contract for difference, CfD). To wieloletnia umowa między wytwórcą energii a państwem, w której ustala się tzw. cenę wykonania (rys. 10.5). Gdy cena rynkowa energii spada poniżej tego poziomu, państwo dopłaca wytwórcy



RYŚ. 10.5 Kontrakt różnicowy: gdy cena rynkowa spada poniżej ceny wykonania, państwo dopłaca wytwórcy różnicę, gdy rośnie powyżej – wytwórca oddaje nadwyżkę. Stabilne przychody to tańszy kredyt, a więc i tańszy prąd.

różnicę, gdy rośnie powyżej – to wytwórca oddaje nadwyżkę. Elektrownia ma dzięki temu przewidywalne przychody niezależnie od wahań rynku, a banki, widząc pewny strumień spłat, pożyczają pieniądze znacznie taniej. Ponieważ to właśnie koszt kapitału jest największym składnikiem ceny, tańsze finansowanie oznacza wprost tańszy prąd dla odbiorców. Po ten mechanizm sięgają kolejne kraje rozwijające energetykę jądrową – od Wielkiej Brytanii po Czechy i Francję.

Kontrakt różnicowy obejmie także pierwszą polską elektrownię jądrową. W grudniu 2025 r. Komisja Europejska zatwierdziła pakiet wsparcia dla inwestycji w Lubiatowie-Kopalinie: dokapitalizowanie inwestora z budżetu państwa kwotą ok. 60 mld zł (ok. 30% kosztów), gwarancje Skarbu Państwa dla finansowania dłużnego oraz dwustronny kontrakt różnicowy na 40 lat eksploatacji. Warto podkreślić, że kontrakt działa w obie strony: jeśli ceny rynkowe okażą się wysokie, nadwyżki nie zostaną w kieszeni wytwórcy, lecz wrócą do budżetu państwa.

Na koniec perspektywa czasu, bez której tego rachunku nie sposób zrozumieć. Elektrownię buduje się kilka-kilka-nastę lat, ale pracuje ona potem 60, a nawet 80 lat (zob. pyt. 13), niemal bez przerwy (zob. pyt. 12). Wielkie nakłady rozkładają się więc na ogromną ilość energii wytwarzanej przez dziesięciolecia, a spalona elektrownia – takich na świecie przybywa – należy do najtańszych źródeł prądu w ogóle. Trzeba też pamiętać, że porównania z energetyką węglową muszą dziś uwzględniać koszty uprawnień do emisji dwutlenku węgla, które obciążają każdą węglową megawatogodzinę. Ekonomia atomu to rachunek pisany na pokolenia – i właśnie w tej skali czasu należy go czytać.

58

JAK WIELKA BUDOWA ZMIENIA OKOLICĘ – RUCH, HAŁAS, TYSIĄCE PRACOWNIKÓW?

CZY WIESZ, ŻE...

Największy dźwig świata nazywa się **Big Carl**. Pracuje na budowie Hinkley Point C: sięga 250 metrów, unosi 5000 ton i jeździ po sześciu kilometrach własnych torów. Wstawia na miejsce ponad 700 gotowych, prefabrykowanych elementów elektrowni.

Nie ma sensu udawać, że budowa wielkiego obiektu przemysłowego przechodzi niezauważona – bo nie przechodzi. W szczytowej fazie na placu pracuje zwykle 5–8 tysięcy osób (rys. 10.6) – a na największych placach budowy, jak brytyjski Hinkley Point C, bywało ich nawet ponad 10 tysięcy. To tyle, co ludność małego miasta. Wiąże się z tym wzmożony ruch ciężarówek i autobusów, hałas prac, transport wielkich elementów, a także presja na lokalne drogi, mieszkania i usługi. To są konkretne, odczuwalne niedogodności – i trzeba o nich mówić wprost.

Dobra wiadomość jest taka, że tymi uciążliwościami się zarządza – i to w sposób zaplanowany. Buduje się objazdy i modernizuje drogi, organizuje transport pracowników, wyznacza godziny najbardziej hałaśliwych prac, a często wznosi się całe tymczasowe osiedla i bazy noclegowe dla załogi, aby odciążyć lokalny rynek mieszkań. Kluczowa jest przy tym stała komunikacja z mieszkańcami: informowanie z wyprzedzeniem o utrudnieniach, punkty kontaktowe, kanały zgłaszania problemów. Dobrze poprowadzona budowa to taka, w której mieszkańiec wie, czego i kiedy się spodziewać.

Warto też zachować proporcje w czasie. Najbardziej uciążliwy okres – ciężkie roboty i szczyt zatrudnienia – trwa kilka lat. Potem następuje spokojna, cicha eksploatacja przez 60–80 lat, w której elektrownia niemal nie daje o sobie znać, a do okolicy wracają tylko okresowe „przytłęty” pracowników podczas postojów remontowych (zob. pyt. 12) – tym razem odbierane raczej jako korzyść dla lokalnych usług (zob. pyt. 59). Innymi słowy: cena w postaci kilku lat budowy kupuje dekady spokojnej pracy.



RYŚ. 10.6 Najczęstsze niedogodności podczas budowy elektrowni jądrowej są komunikowane z wyprzedzeniem m.in. przez punkty kontaktu z mieszkańcami.

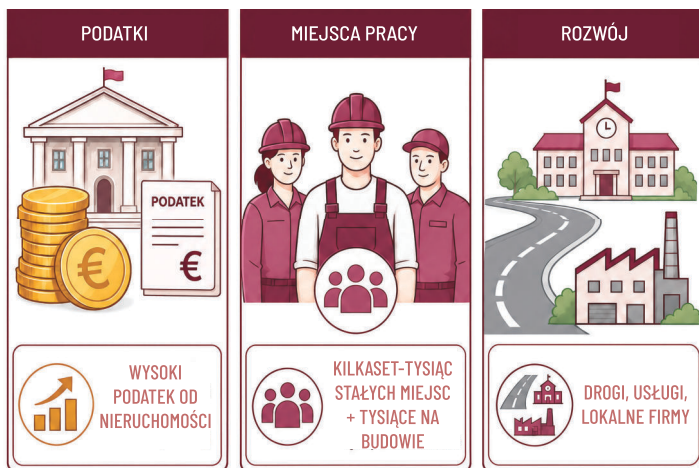
CO ELEKTROWNIA DAJE GMINIE I REGIONOWI – PODATKI, MIEJSCA PRACY, ROZWÓJ?

59

Zacznijmy od pieniędzy, które zostają na miejscu. Elektrownia jądrowa jest ogromnym obiektem o wysokiej wartości, więc płaci gminie odpowiednio wysoki podatek od nieruchomości – często stając się jej największym pojedynczym płatnikiem (rys. 10.7). Skalę pokazuje przykład fińskiej gminy Eurajoki, goszczącej elektrownię Olkiluoto: w 2022 r. sam operator – spółka TVO – zapłacił jej ok. 16 milionów euro podatku od nieruchomości, przy ok. 57 milionach euro wszystkich dochodów podatkowych gminy²⁴. Takie wpływy zmieniają lokalną rzeczywistość:

²⁴Za: 2022 Annual and Sustainability Report, TVO.

CO ELEKTROWNIA JĄDROWA DAJE GMINIE



RYS. 10.7 Trzy filary korzyści dla gminy: wysoki podatek od nieruchomości, stabilne miejsca pracy na dekady oraz rozwój infrastruktury i lokalnych firm.

pozwalają budować szkoły, drogi, obiekty sportowe, obniżyć inne podatki.

Drugi filar to praca. Sama elektrownia zatrudnia na stałe od kilkuset do ok. tysiąca osób – inżynierów, techników, obsługę – przez całe 60–80 lat eksploatacji. Są to miejsca pracy stabilne i dobrze płatne, a wokół nich powstają kolejne: u dostawców, w usługach, w firmach serwisowych. Do tego dochodzą tysiące pracowników w czasie budowy (zob. pyt. 58) oraz regularne „przyływy” podczas postojów remontowych (zob. pyt. 12), z których korzystają lokalne hotele i gastronomia.

Trzeci efekt jest mniej oczywisty: rozwój i prestiż. Wielka inwestycja przyciąga infrastrukturę (drogi, sieci, łącza), podnosi kwalifikacje lokalnych kadr, sprzyja powstawaniu firm współpracujących i często wiąże się z pakietami inwestycji towarzyszących dla gminy. Nieprzypadkowo europejskie gminy goszczące elektrownie jądrowe od dekad należą zwykle do zamożniejszych w swoich regionach – a ich mieszkańcy, początkowo nieufni, z czasem stają się

zwolennikami sąsiedztwa elektrowni (w Finlandii poparcie dla atomu wzrosło z ok. 25% w 1983 r. do trwale ponad 60% w ostatnich latach: w 2026 r. pozytywnie oceniało je 66% badanych, a negatywnie zaledwie 8%)²⁵.

CZY SĄSIEDZTWO ELEKTROWNI OBNIŻA WARTOŚĆ NIERUCHOMOŚCI ALBO SZKODZI ROLNICTWU I TURYSTYCE?

60

To jedna z najczęstszych i najbardziej zrozumiałych obaw – dotyczy przecież dorobku życia. Dlatego odpowiedź mamy na nią danymi, a nie zapewnieniami, i to uczciwie: także tam, gdzie wyniki są niewygodne.

Ceny nieruchomości badano wielokrotnie, metodami statystycznymi (analiza hedoniczna). Ogólny obraz jest uspokajający: przeglądy nie wykazują spójnego, trwałego spadku wartości domów w sąsiedztwie działających elektrowni. Szwedzkie badanie, oparte na danych o pojedynczych transakcjach mieszkaniami i domami, nie wykryło żadnego wpływu awarii w Fukushima na ceny nieruchomości położonych w pobliżu tamtejszych elektrowni – jego autorzy mówią wprost o „dokładnie oszacowanych zerach”²⁶. Co znamienne, w tym samym czasie sondaże

²⁵ Coroczne badanie opinii publicznej prowadzone od 1983 r. na zlecenie Energiategollisuus (Finnish Energy) przez instytut Verian (dawniej Kantar Public). W 1983 r. nastawienie pozytywne deklarowała mniej więcej jedna czwarta Finów, a negatywne blisko 40%. Wyniki z ostatnich lat: 68% w 2023 r. (rekord serii), 61% w 2024 r. (badanie z marca i kwietnia, n = 1008), 68% w 2025 r. (kwiecień, n = 1016) oraz 66% przy 8% opinii negatywnych w 2026 r. (badanie z 10–16 kwietnia, n = 1045). Wskaźnik podlega więc wahaniom i nie rośnie monotonicznie. Za: komunikaty Finnish Energy (energia.fi) oraz World Nuclear Association, *Nuclear Power in Finland i Nuclear Energy and Public Opinion*, world-nuclear.org (dostęp: lipiec 2026 r.).

²⁶ M. Ando, M. Dahlberg, G. Engström, *The risks of nuclear disaster and its impact on housing prices*, „Economics Letters” 2017, t. 154, s. 13–16, wersja robocza: Uppsala University, Department of Economics, Working Paper Series 2017:2 (dostęp otwarty). Autorzy wykorzystali dane o pojedynczych transakcjach na szwedzkim rynku mieszkaniowym, z dokładnymi cenami i datami sprzedaży. W oryginale mowa o „precisely estimated zeros”. Zaznaczają zarazem, że wcześniejsze prace na danych

CZY WIESZ, ŻE...

Skąd nazwa „anali-za hedoniczna”? Od greckiego *hēdonē* – przyjemność. Metoda rozkłada cenę nieruchomości na wartość poszczególnych cech. Tak samo bada się nią wpływ hałasu lotniska, widoku z okna czy odległości od szkoły.

notowały w Szwecji wzrost niepokoju i spadek poparcia dla atomu – deklarowane obawy nie przełożyły się jednak na realne decyzje kupujących i sprzedających. Bądźmy jednak rzetelni, także wobec tego wyniku: nie jest on regułą uniwersalną, a część prac notowała krótkotrwałe spadki cen po głośnych, odległych awariach. W Stanach Zjednoczonych po Fukushima efekt wystąpił, ale okazał się zaskakująco wąski i krótki: ograniczał się do promienia około czterech kilometrów od elektrowni, osiągnął maksimum pół roku po awarii i zaniknął po upływie roku²⁷. Co więcej, korzyści gospodarcze (miejsca pracy, niższe podatki lokalne, lepsza infrastruktura – zob. pyt. 59) często równoważą lub wręcz odwracają ewentualny efekt.

A rolnictwo i turystyka? Tu również praktyka jest wymowna. Wokół działających elektrowni w całej Europie normalnie prowadzi się gospodarstwa rolne, a płody rolne są dodatkowo objęte monitoringiem (zob. pyt. 39), co bywa atutem. Turystyka nie zamiera – w regionach takich jak francuskie czy fińskie wybrzeże elektrownie sąsiadują z plażami i kurortami, a niektóre same stały się atrakcjami, z centrami dla zwiedzających. Nie znaczy to, że obawy są bezpodstawne – znaczy, że wieloletnie doświadczenie wielu krajów po prostu ich nie potwierdza.

Uczciwe podsumowanie: obawa, że dom straci na wartości, a okolica zyska złą sławę, jest w pełni zrozumiała – ale nie znajduje potwierdzenia w danych. Na nastroje, a przez nie przejściowo i na ceny, działa nie tyle sama elektrownia, ile odległe awarie i wywołany nimi lęk. A ten, jak pokazuje historia, z czasem opada – gdy elektrownia po prostu spokojnie pracuje.

z innych krajów częściej wykrywały istotny statystycznie, negatywny wpływ bliskości elektrowni na ceny.

²⁷S. Tanaka, J. Zabel, *Valuing nuclear energy risk: Evidence from the impact of the Fukushima crisis on U.S. house prices*, „Journal of Environmental Economics and Management” 2018, t. 88, s. 411-426, DOI: 10.1016/j.jeem.2017.12.005.

CO DZIEJE SIĘ Z ELEKTROWNIĄ PO ZAKOŃCZENIU PRACY – JAK PRZEBIEGA LIKWIDACJA I CO ZOSTAJE NA TERENIE?

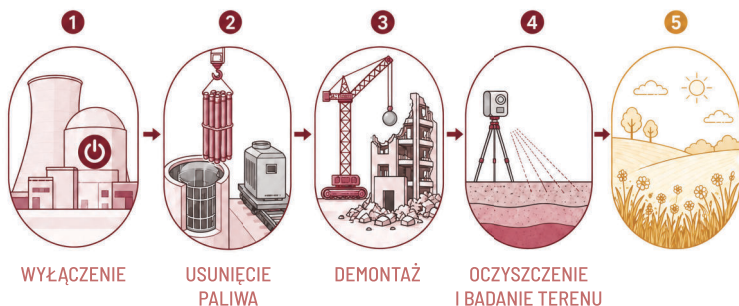
61

Zadna elektrownia – jądrowa, węglowa czy gazowa – nie pracuje wiecznie. Różnica polega na tym, że w energetyce jądrowej zakończenie pracy jest z góry zaplanowanym i opłaconym etapem, a nie kłopotem zostawionym następcom (zob. pyt. 46). Ten proces to likwidacja (ang. decommissioning), a przebiega w kilku fazach (rys. 10.8).

Najpierw, po ostatecznym wyłączeniu, usuwa się z reaktora paliwo – i to ono, a nie sam budynek, jest głównym źródłem promieniowania jonizującego (paliwo wędruje dalej swoją drogą, pyt. 43). Już samo to radykalnie obniża zagrożenie. Potem następuje demontaż: rozbiórka systemów i budynków, przy czym elementy skażone trafiają się i pakuje jako odpady (zob. pyt. 41–42), a zdecydowaną większość materiału – beton, stal – po sprawdzeniu można potraktować jak zwykły gruz. Na końcu przychodzi oczyszczenie i drobiazgowe przebadanie terenu, aż spełni surowe kryteria pozwalające zwolnić go do innego użytku. Polska ma tu zresztą własne, choć mniejszej skali, doświadczenie: badawczy reaktor EWA w Świerku po zakończeniu pracy w 1995 r. zdemontowano: usunięto

CIEKAWOSTKA

W chłodni kominowej stoi karuzela i urządzono ściankę wspinaczkową. Niemiecki reaktor SNR-300 w Kalkarze ukończono w 1985 r., lecz nigdy nie uruchomiono. Teren kupił holenderski przedsiębiorca i urządził park rozrywki Wunderland Kalkar – dziś odwiedza go około 600 tysięcy osób rocznie.



RYŚ. 10.8 Etapy likwidacji: od wyłączenia i usunięcia paliwa, przez demontaż i oczyszczenie, po zwolnienie terenu do ponownego użytku.

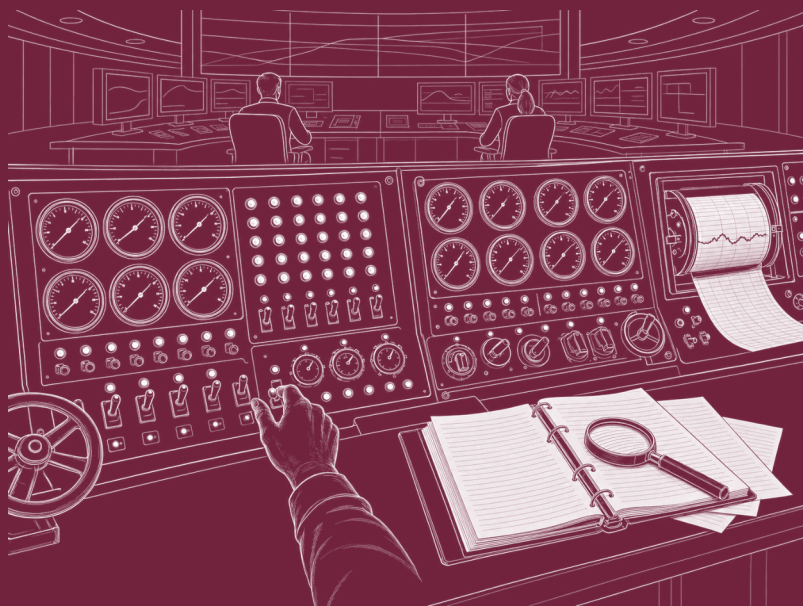
paliwo, rdzeń i zbiornik zgodnie z wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej.

Ile to trwa i co zostaje? Likwidację można prowadzić od razu po wyłączeniu albo z odroczeniem (dając części materiałów czas na naturalny spadek aktywności promieniotwórczej) – zależnie od przyjętej strategii proces trwa od kilku lat do wielu dziesięcioleci. A efekt końcowy potrafi zaskoczyć: teren daje się przywrócić do stanu pozwalającego na nowe zagospodarowanie. Amerykańska elektrownia Maine Yankee została rozebrana, a jej działkę doprowadzono do stanu „zielonej łąki” (rys. 10.9). Na wydzielonej części pozostał tylko suchy magazyn wypalonego paliwa. Kluczowe dla mieszkańca jest to, że na tę operację pieniądze odkładano przez cały czas pracy elektrowni – więc jej zamknięcie nie oznacza ani skażonego pustkowia, ani rachunku dla podatnika.



RYŚ. 10.9 Teren dawnej Elektrowni Jądrowej Maine Yankee w Wiscasset po zakończeniu likwidacji. Zabudowania elektrowni usunięto; na półwyspie pozostały stacja elektroenergetyczna i suchy magazyn wypalonego paliwa. Zobrazowanie lotnicze z 6 października 2021 r.

DZIAŁ XI

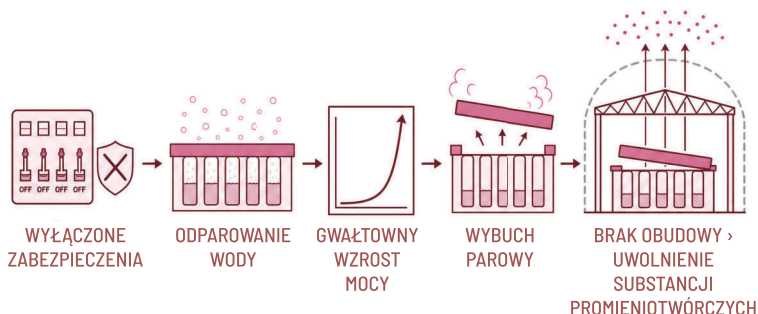


**trudne pytania
i lekcje
z przeszłości**

CO NAPRAWDĘ WYDARZYŁO SIĘ W CZARNOBYLU – I DLACZEGO TAKI PRZEBIEG AWARII NIE MOŻE SIĘ POWTÓRZYĆ WE WSPÓŁCZESNYCH REAKTORACH?

Zacznijmy od tego, co się stało – bez wygładzania, bo to prawdziwa tragedia. W nocy 26 kwietnia 1986 r. operatorzy prowadzili eksperyment, wyłączając po drodze zabezpieczenia. Reaktor znalazł się w stanie, w którym jego moc lawinowo wzrosła w ciągu kilku sekund. Nastąpił wybuch pary, rozerwanie reaktora i pożar grafitu, który przez wiele dni wynosił substancje promieniotwórcze wysoko w atmosferę, skąd rozprzestrzeniały się nad Europą (rys. 11.1).

Dlaczego to było możliwe? Odpowiadają za to dwie cechy reaktora RBMK, których nie mają reaktory, w których moderatorem neutronów jest woda – a więc zdecydowana większość reaktorów energetycznych na świecie. Po pierwsze – reaktor mógł się sam rozpędzać: w pewnych warunkach wzrost mocy jeszcze bardziej przyspieszał reakcję rozszczepienia, zamiast ją hamować. Wynikało to z samej konstrukcji reaktora: moderatorem w RBMK był grafit, który pozostaje na miejscu i nadal spowalnia neutrony, nawet wtedy, gdy woda odparuje. W reaktorze lek-



RYC. 11.1 Przebieg katastrofy w Czarnobylu. Wybuch pary uniósł wielotonową płytę przykrywającą reaktor, a ostatnie ogniwo jest tu tym, czego zabrakło: bez szczelnej obudowy substancje promieniotwórcze wydostały się wprost do atmosfery.

kowodnym – takim jak PWR czy WWER – woda pełni obie role naraz: chłodzi i spowalnia neutrony. Gdy się przegrzeje i zamieni w parę, reakcja sama słabnie, bo znika to, co ją podtrzymywało – spowalnianie neutronów (to właśnie samoregulacja, o której piszemy w pyt. 10). Po drugie – Czarnobyl nie miał szczelnej obudowy bezpieczeństwa, tego potężnego betonowego „płaszczka”, który zamyka materiał w środku nawet przy najgorszej awarii (zob. pyt. 19). Gdy rdzeń uległ zniszczeniu, nie było więc bariery, która zatrzymałaby uwolnienie. Do tego doszła trzecia, mniej techniczna przyczyna, na którą wskazało międzynarodowe śledztwo: kultura organizacyjna, w której operatorzy nie znali w pełni słabości własnego reaktora, a ryzykowny test prowadzono z wyłączonymi zabezpieczeniami. Właśnie dlatego od Czarnobyla zaczęła się w energetyce jądrowej kariera pojęcia „kultura bezpieczeństwa” (zob. pyt. 27).

Jakie były rzeczywiste skutki zdrowotne? Podajemy je wyłącznie za Komitetem Naukowym ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR)²⁸. W ciągu kilku tygodni zginęło 30 osób z obsługi elektrowni i ekip ratowniczych: dwie zginęły jeszcze tej nocy – w wybuchu i od poparzeń – a pozostałe zmarły wskutek ostrej choroby popromiennej, którą stwierdzono u 134 osób gaszących pożar i usuwających skutki katastrofy. Wśród osób, które jako dzieci lub nastolatki piły mleko skażone jodem-131, wykryto do 2005 r. ponad 6000 przypadków raka tarczycy – z których, dzięki wysokiej wyleczalności tej choroby, zgonem zakończyło się tylko 15. Wśród ogółu ludności nie stwierdzono natomiast mierzalnego wzrostu innych nowotworów. Pewne podwyższenie ryzyka białaczki i zaćmy

WARTO WIEDZIEĆ

Czarnobyl zmienił międzynarodowe zasady powiadamiania. Jeszcze w 1986 r. przyjęto konwencję zobowiązującą państwa do szybkiego informowania o awariach, których skutki mogą przekroczyć granice. Informacje mają trafiać do innych państw oraz do MAEA.

²⁸UNSCEAR, *Health Effects due to Radiation from the Chernobyl Accident*, UNSCEAR 2008 Report, vol. II, annex D, United Nations, Nowy Jork 2011 (liczby zgonów wczesnych, zachorowań na raka tarczycy do 2005 r. oraz obserwacje dotyczące likwidatorów). *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts*, The Chernobyl Forum 2003–2005 (IAEA, WHO, UNDP, UNEP i in.), wyd. 2, IAEA, Wiedeń 2006. Nowsze dane o raku tarczycy – obejmujące lata 1991–2015 i ocenę, jaką ich część można przypisać promieniowaniu, a jaką intensywnym badaniom przesiewowym: UNSCEAR, *Evaluation of Data on Thyroid Cancer in Regions Affected by the Chernobyl Accident* (White Paper), United Nations, Nowy Jork 2018.



RYŚ. 11.2 Nowa Bezpieczna Powłoka nad zniszczonym reaktorem w Czarnobylu – stalowa arka wzniesiona wspólnym wysiłkiem blisko pięćdziesięciu państw i zaprojektowana na sto lat. Pod jej osłoną trwa demontaż starego sarkofagu.

CZY WIESZ, ŻE...

Po awarii przebudowano pozostałe reaktory RBMK.

Zmieniono między innymi konstrukcję prętów sterujących, parametry rdzenia oraz zasady prowadzenia reaktora. Skrócono także czas działania układu awaryjnego wyłączenia.

zaobserwowano jedynie u części likwidatorów – osób usuwających skutki awarii, które otrzymały największe dawki. Wyższe, sięgające tysięcy liczby, które krążą w mediach, to modelowe prognozy oparte na ostrożnym założeniu (zob. pyt. 36), a nie policzone zgony. To wciąż ciężka tragedia – ale ma ona konkretną, znaną skalę i konkretne, usunięte już przyczyny.

Warto wiedzieć, co dzieje się z tym miejscem dzisiaj. Pozostałe bloki elektrowni czarnobylskiej pracowały jeszcze długo po awarii – ostatni wyłączono dopiero w 2000 r. – a wszystkie reaktory RBMK gruntownie przebudowano, usuwając wady, które umożliwiły katastrofę. Dziś są one stopniowo wycofywane z eksploatacji. Nad zniszczonym blokiem czwartym jeszcze w 1986 r. pośpiesznie wzniesiono betonowy „sarkofag”, a w latach 2016–2019 nasunięto na niego gigantyczną stalową arkę – Nową Bezpieczną Powłokę, sfinansowaną wspólnie przez kilkadziesiąt państw i zaprojektowaną na sto lat pracy (rys. 11.2). Pod jej osłoną trwała rozbiórka starego sarkofagu i porządkowanie pozostałości reaktora do 14 lutego 2025 r., kiedy powłokę uszkodziło uderzenie drona i późniejszy pożar. Poziom promieniowania na miejscu i w okolicy pozostał jednak w normie, co potwierdzili obecni w elektrowni eksperci MAEA, choć sama powłoka wymaga gruntownej naprawy.

Zacznijmy od kontekstu, który w relacjach medialnych może umykać. 11 marca 2011 r. Japonię nawiedziło jedno z najsilniejszych trzęsień ziemi w historii pomiarów i olbrzymie tsunami, które zabiło ok. 18–20 tysięcy ludzi. To ono zalało elektrownię Fukushima, niszcząc normalne i awaryjne zasilanie potrzebne do chłodzenia reaktorów (zob. pyt. 21). Reaktory bezpiecznie się wyłączyły, ale bez chłodzenia trzy z nich uległy stopieniu, doszło do wybuchów wodoru i uwolnienia substancji promieniotwórczych (rys. 11.3). Warto zwrócić uwagę na fakt, że reaktory w Fukushima – budowane w latach 70. – były reaktorami II generacji i nie były wyposażone w pasywne układy bezpieczeństwa. Awaria była więc skutkiem gigantycznej katastrofy naturalnej.

Czego się nauczono? Fukushima stała się dla całej branży bolesną, ale skuteczną lekcją. Na całym świecie przeprowadzono testy wytrzymałościowe (stress testy), sprawdzające, czy elektrownie wytrzymają skrajne, „niemożliwe” zdarzenia. Wdrożono mobilne i rezerwowe źródła zasilania oraz pompy, umieszczane w miejscach odpornych



RYŚ. 11.3 Łańcuch zdarzeń w Fukushima: to katastrofa naturalna odcięła elektrownię od chłodzenia. Stopione paliwo przetopilo dna zbiorników, ale zatrzymała je obudowa bezpieczeństwa; uwolnienie nastąpiło przez rozerwane wybuchami wodoru górne kondygnacje budynków.

CZY WIESZ, ŻE...

Bliżej epicentrum stała elektrownia, która zachowała funkcje bezpieczeństwa.

Onagawa leżała ok. 60 km bliżej epicentrum niż Fukushima Daiichi, a fala tsunami była tam nawet wyższa – 14,3 m wobec 13,1 m. Elektrownię zbudowano jednak na wyżej położonym terenie i bezpiecznie się wyłączyła. Zespół MAEA po inspekcji określił ją jako „zaskakująco nieuszkodzoną”, a w jej budynkach schroniły się setki mieszkańców, którzy stracili domy.

na zalanie, systemy pasywne działające bez prądu (zob. pyt. 20) oraz wzmocnione, filtrowane wentylacje zapobiegające wybuchom wodoru. Reaktory budowane dziś projektuje się tak, by przetrwały utratę zasilania o wiele dłużej i bez ingerencji człowieka.

A rzeczywiste skutki zdrowotne? Tu trzeba być bardzo precyzyjnym i trzymać się danych ONZ. Wg raportu UNSCEAR nie udokumentowano wśród mieszkańców żadnego skutku zdrowotnego, który można bezpośrednio przypisać promieniowaniu; wzrost wykrywanych raków tarczycy przypisano przede wszystkim ultraczułym badaniom przesiewowym (przebadano setki tysięcy dzieci), a nie napromienieniu. Najbardziej gorzki jest jednak inny wniosek: największe szkody wyrządziła sama ewakuacja²⁹. Japonia prowadzi osobną statystykę „zgonów związanych z katastrofą” – ludzi, którzy nie zginęli od obrażeń, lecz zmarli później, bo nie wytrzymali wysiedlenia: pospiesznego wywiezienia ze szpitala czy domu opieki, miesiące w prowizorycznych warunkach, oderwania od domu i bliskich. Powiedzmy od razu, czego ta liczba nie rozstrzyga: obejmuje ona cały kataklizm z marca 2011 r. – trzęsienie ziemi, tsunami i awarię razem – i nie rozdziela ich przyczyn. Zestawienie regionów mówi jednak samo za siebie. W prefekturze Fukushima uznano dotąd ok. 2350 takich zgonów, czyli więcej, niż zabiły tam bezpośrednio wstrząsy

²⁹ Kategoria *shinsai kanren shi*, definiowana przez Biuro Rządu Japonii jako zgony wskutek pogorszenia obrażeń odniesionych w katastrofie albo chorób wywołanych obciążeniem fizycznym życia w ewakuacji, orzekane na podstawie ustawy o zasiłkach dla ofiar klęsk żywiołowych (nr 82 z 1973 r.). Statystyka obejmuje łącznie trzęsienie ziemi, tsunami i awarię elektrowni. Definicja i przebieg orzekania w gminach objętych ewakuacją: M. Tsuboi i in., „Disaster-related deaths after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident – definition of the term and lessons learned”, *Environmental Advances* 8 (2022), 100248. Dane liczbowe: Agencja Odbudowy, Biuro Rządu i Agencja Straży Pożarnej, *Higashi Nihon daishinsai ni okeru shinsai kanrenshi no shishasū*, stan na 31 grudnia 2024 r. (publikacja z 14 lutego 2025 r.) – Fukushima 2348, Miyagi 932, Iwate 472; w Fukushima 2110 z 2348 zgonów dotyczyło osób powyżej 65. roku życia. Rozkład zgonów między gminami prefektury: M. Hayakawa, „Increase in disaster-related deaths: risks and social impacts of evacuation”, *Annals of the ICRP* 45(2_suppl), 2016, s. 123–128. Ocena skutków zdrowotnych promieniowania: UNSCEAR 2020/2021 Report, vol. II, annex B, United Nations, Nowy Jork 2021.

i fala (ok. 1830). W sąsiednich prefekturach Iwate i Miyagi, spustoszonych przez tsunami znacznie dotkliwiej, było ich odpowiednio ok. 470 i 930. Co więcej, w Fukushima skupiły się one w miejscowościach objętych nakazem ewakuacji – jak Tomioka, Okuma czy Iitate – gdzie ofiar samej fali było niewiele, i przybywało ich jeszcze przez lata, gdy w pozostałych prefekturach dawno przestało. Ślad prowadzi więc nie do fali, lecz do ewakuacji. Około 90% zmarłych miało ponad 65 lat. To ważna, pouczająca lekcja: czasem panika i pośpieszna, zbyt szeroko zakrojona reakcja potrafią zaszkodzić bardziej niż samo zagrożenie.

A co z elektrownią i jej okolicą dzisiaj? W samej Fukushima trwa rozpisana na dziesięciolecia likwidacja – najtrudniejszym zadaniem pozostaje usunięcie stopionego paliwa z wnętrza reaktorów. Od sierpnia 2023 r. do oceanu odprowadzana jest – partiami – woda, która zetknęła się ze stopionym paliwem: ta chłodząca reaktory oraz wody gruntowe i opadowe przenikające do uszkodzonych budynków³⁰. Przed każdym zrzutem przechodzi ona wieloetapowe oczyszczanie, a następnie rozcieńczenie wodą morską. Usunąć nie sposób jedynie trytu – promieniotwórczego izotopu wodoru, tworzącego cząsteczki wody, chemicznie nieodróżnialne od zwykłej wody. Jego aktywność utrzymuje się poniżej 1500 bekereli na litr, czyli około siedmiokrotnie poniżej progu, jaki dla wody pitnej zaleca Światowa Organizacja Zdrowia. Każdą partię sprawdza Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, która ma na terenie elektrowni własne biuro i laboratorium. Zniesiono też nakazy ewakuacji dla zdecydowanej większości terenów: mieszkańcy stopniowo wracają, choć odbudowa zaufania i lokalnych społeczności potrwa dłużej niż odbudowa infrastruktury.

WARTO WIEDZIEĆ

Po Fukushima elektrownie przeszły „testy odporności”. W Europie ponownie oceniono wszystkie elektrownie jądrowe pod kątem trzęsień ziemi, powodzi oraz długotrwałej utraty zasilania i chłodzenia. Wyniki wykorzystano do planowania dodatkowych zabezpieczeń.

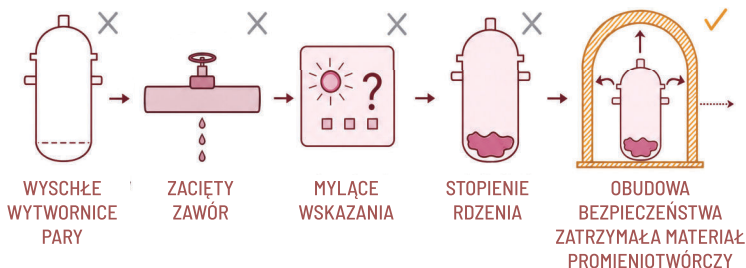
³⁰IAEA, *IAEA Comprehensive Report on the Safety Review of the ALPS-Treated Water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*, Wiedeń, 4 lipca 2023 r. Bieżące wyniki i kontrole kolejnych partii: raporty Grupy Zadaniowej MAEA oraz dane publikowane na stronie „Fukushima Daiichi ALPS Treated Water Discharge” (iaea.org). Parametry zrztu – stężenie trytu poniżej 1500 Bq/l, tj. 1/40 japońskiej normy (60 000 Bq/l) i ok. 1/7 zalecenia WHO dla wody pitnej (10 000 Bq/l): TEPCO, *The Handling of ALPS Treated Water*.

DLACZEGO W THREE MILE ISLAND DOSZŁO DO STOPIENIA RDZENIA, A MIMO TO NIKT NIE UCIERPIAŁ?

Ta awaria to ważna przeciwwaga dla Czarnobyla – ale nie dlatego, że reaktor był bez wad. Wręcz przeciwnie: zawiodły elementy urządzeń, projekt sterowni i rozpoznanie sytuacji przez operatorów, a i tak nikt nie ucierpiał. I właśnie to jest w tej historii najciekawsze.

Zaczęło się prozaicznie: 28 marca 1979 r. w elektrowni Three Mile Island ustał dopływ wody zasilającej do wytwornicy pary. W tej konstrukcji³¹ wytwornice pary miały mało wody po stronie wtórnej i bez wody zasilającej osuszyły

³¹TMI-2 był reaktorem wodnym ciśnieniowym firmy Babcock & Wilcox z wytwornicami przepływowymi (*once-through*), o małej pojemności wodnej strony wtórnej i gorszych warunkach cyrkulacji naturalnej niż w reaktorach z wytwornicami U-rurowymi. Amerykański Dozór Jądrowy, NRC, wymienia wśród wad projektowych, które przyczyniły się do awarii, niejednoznaczną sygnalizację położenia zaworu nadmiarowego (wskazywała stan cewki, a nie zaworu), brak pomiaru poziomu chłodziwa w zbiorniku reaktora oraz ergonomię sterowni. Za: U.S. NRC, *Backgrounder on the Three Mile Island Accident* (nrc.gov); U.S. NRC, *Westinghouse Technology Systems Manual*, rozdz. 7.4; U.S. NRC, *Pressurized Water Reactor B&W Technology Crosstraining Course Manual*; *Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island* (raport Kemeny'ego), Waszyngton 1979.



RYS. 11.4 W Three Mile Island zawiodła kolejno cała seria zabezpieczeń – co doprowadziło do stopienia rdzenia. Uwolnienia zatrzymała dopiero ostatnia bariera – obudowa bezpieczeństwa, przez którą na zewnątrz wydostała się tylko znikoma ilość substancji promieniotwórczych.

się w ciągu kilku minut — reaktor stracił odbiór ciepła i ciśnienie w obiegu pierwotnym poszło w górę. Zgodnie z projektem otworzył się zawór nadmiarowy, tyle że potem się zaciął i nie zamknął — i tu zaczyna się seria usterek projektowych. Lampka w sterowni pokazywała bowiem nie położenie zaworu, lecz jedynie to, że wysłano do niego polecenie zamknięcia. Operatorzy przez ponad dwie godziny byli więc przekonani, że obieg jest szczelny, podczas gdy woda chłodząca z niego uciekała. Nie mieli też żadnego przyrządu pokazującego jej poziom w zbiorniku reaktora — musieli wnioskować z poziomu w stabilizatorze ciśnienia, a ten akurat wskazywał odwrotnie, niż wyglądała rzeczywistość. Gdy wyłączono pompy obiegowe, samoczynny obieg wody nie ustalił się tak, jak zakładano. Rdzeń odsłonił się i częściowo stopił — była to najgorsza awaria w historii amerykańskiej energetyki jądrowej (rys. 11.4). Gorzka puenta: dwa lata wcześniej ten sam zawór zaciął się w bliźniaczej elektrowni Davis-Besse, ale wniosku nie rozesłano w branży.

A jednak skończyło się bez ofiar i praktycznie bez skutków dla okolicy. Dlaczego? Bo zadziałała ostatnia bariera: szczelna obudowa bezpieczeństwa (zob. pyt. 19). Choć rdzeń uległ zniszczeniu, obudowa zatrzymała materiał promieniotwórczy w środku. Uwolnienie na zewnątrz było znikome, średnia dawka okolicznych mieszkańców — mniejsza niż z jednego prześwietlenia klatki piersiowej, a wieloletnie badania nie wykazały skutków zdrowotnych. Na tym właśnie polega obrona w głąb: nie zakłada się w niej, że wcześniejsze warstwy są doskonałe, lecz przeciwnie — że zawiodą, i dlatego buduje się kolejną.

Najważniejsze jest jednak to, co stało się potem. Three Mile Island — awaria bez ofiar — przebudowała energetykę jądrową na całym świecie. Usunięto konkretne wady: zamontowano wskaźniki rzeczywistego położenia zaworów i przyrządy pokazujące poziom chłodziwa w zbiorniku. Zrozumiano też, że kluczowy jest nie tylko sprzęt, ale i człowiek: sposób, w jaki operatorzy odczytują wskazania i decydują pod presją. Gruntownie zmieniono szkolenia, przeprojektowano sterownię tak, aby nie myliły operatorów w sytuacji awaryjnej, i powołano instytucje wymienia-

WARTO WIEDZIEĆ

Od TMI w każdej amerykańskiej elektrowni urzęduje inspektor dozoru. Jednym z trwałych następstw awarii było wprowadzenie inspektorów rezydentów — pracowników dozoru jądrowego z biurem na terenie obiektu, mających prawo wstępu wszędzie i o każdej porze. Nie przyjeżdżają na kontrolę: są na miejscu stale, niezależni od operatora.

CIEKAWOSTKA

Three Mile Island zmieniła sposób projektowania sterowni. Po awarii większą uwagę zwrócono na czytelność wskazań, układ alarmów i ergonomię pracy operatorów. Informacje potrzebne do oceny stanu reaktora zaczęto prezentować w bardziej uporządkowany sposób.

jące doświadczenia między elektrowniami (m.in. Institute of Nuclear Power Operations, INPO) – żeby żadna lekcja nie przepadła już tak, jak ta z Davis-Besse. Paradoksalnie więc awaria, która nikomu nie zaszkodziła, uczyniła atom trwale bezpieczniejszym.

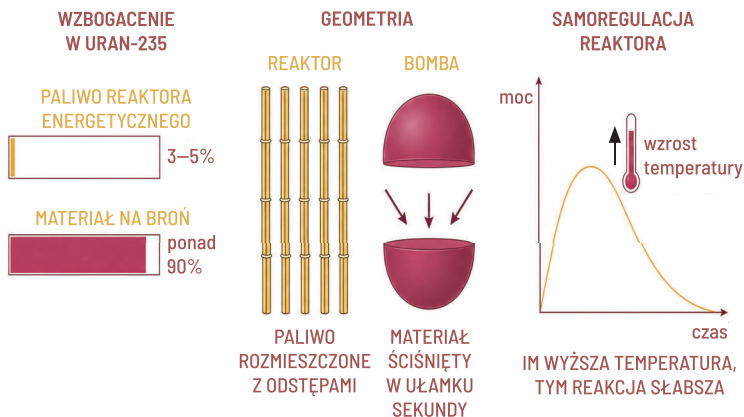
Historia tego miejsca ma zresztą zaskakujący ciąg dalszy. Uszkodzony blok nr 2 nigdy nie wrócił do pracy – po wieloletniej operacji usuwania paliwa jest przygotowywany do likwidacji (zob. pyt. 61). Ale sąsiedni, nietknięty awarią blok nr 1 pracował bezpiecznie aż do 2019 r., gdy zamknięto go z powodów czysto ekonomicznych. W 2024 r. ogłoszono decyzję o jego ponownym uruchomieniu – pod nową nazwą Crane Clean Energy Center – a wytwarzany prąd ma przez 20 lat zasilać centra danych. Powrót bloku do sieci planowany jest na 2027 r. Trudno o bardziej wymowny znak zmiany nastawienia do tej technologii: miejsce, które przez dekady symbolizowało kryzys energetyki jądrowej, staje się dziś symbolem jej powrotu.

65

CZY REAKTOR ENERGETYCZNY MOŻE WYBUCHNĄĆ JAK BOMBA ATOMOWA?

To jedna z najgłębiej zakorzenionych obaw – i akurat na nią fizyka daje odpowiedź jednoznaczną. Różnica między paliwem reaktorowym a materiałem na bombę jest fundamentalna i sprowadza się do wzbogacenia (rys. 11.5). Paliwo w reaktorze zawiera ok. 3–5% rozszczepialnego uranu-235 (zob. pyt. 16), reszta to uran-238, który nie podtrzymuje reakcji rozszczepienia. Bomba atomowa wymaga uranu wzbogaconego powyżej 90%. To różnica nie stopnia, lecz istoty – próba wywołania eksplozji jądrowej paliwem reaktorowym przypomina próbę podpalenia piwa: alkohol w nim jest, ale w stężeniu o wiele za małym, aby mógł płonąć. Fizyka po prostu na to nie pozwala.

Do tego dochodzi geometria i tempo. W bombie trzeba w ułamku sekundy, z ogromną precyzją, ścisnąć materiał w jedną nadkrytyczną bryłę, zanim zdąży się rozlecieć. Reaktor jest zaprojektowany dokładnie odwrotnie: paliwo



RYS. 11.5 Trzy fizyczne powody, dla których reaktor energetyczny nie może wybuchnąć jak bomba: zbyt niskie wzbogacenie, inna geometria i samoregulacja.

jest w nim rozłożone z rozmysłem „rzadko”, poprzątkowane innymi materiałami, a cała konstrukcja dąży do stabilnej, powolnej reakcji łańcuchowej, nie do błyskawicznej eksplozji (por. rys. 1.4 w pyt. 2 – reakcja kontrolowana i lawinowa). Co więcej, współczesny reaktor sam się reguluje – gdy zanadto się rozgrzewa, reakcja słabnie z samej fizyki, bez niczyjej interwencji (zob. pyt. 10). Nie trzeba go „powstrzymywać” przed wybuchem – on do wybuchu jądrowego po prostu nie dąży.

A co z Czarnobyliem – przecież tam „wybuchło”? To ważne rozróżnienie: w Czarnobyliu doszło do wybuchu pary i gazów (fizyczno-chemicznego), gdy gwałtownie przegrzana woda błyskawicznie odparowała i rozerwała reaktor – podobnie jak może eksplodować przegrzany kocioł. To nie była detonacja jądrowa. Reaktor energetyczny, choćby najbardziej uszkodzony, nie może wybuchnąć jak bomba atomowa. Może stanowić inne zagrożenia – o których mówimy uczciwie w tym dziale – ale akurat to jedno jest fizycznie wykluczone.

ZAPAMIĘTAJ!

„Krytyczny” reaktor pracuje normalnie i stabilnie. W fizyce reaktorowej krytyczność oznacza stan, w którym reakcja łańcuchowa podtrzymuje się na dowolnym poziomie mocy. Nie jest to określenie awarii ani niebezpiecznej sytuacji.

KTÓRE ŹRÓDŁA ENERGII SĄ NAJBEZPIECZNIEJSZE – I JAK NA ICH TLE WYPADA ENERGIA JĄDROWA?

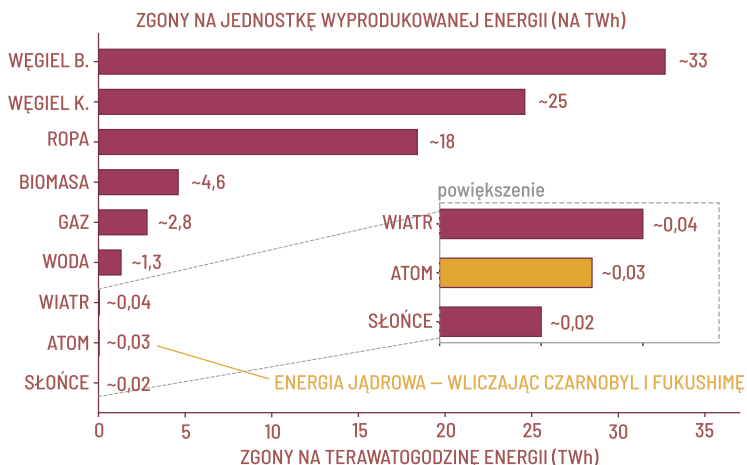
CZY WIESZ, ŻE...

Źródła energii trzeba porównywać według tej samej miary. Sama liczba wypadków nie wiele mówi, jeżeli technologie wytwarzają różne ilości energii. Dlatego wyniki przelicza się na przykład na terawatogodzinę wyprodukowanej energii elektrycznej.

Bezpieczeństwo najlepiej mierzyć wspólną miarą: ile zgonów przypada na jednostkę wyprodukowanej energii (na terawatogodzinę, TWh). Taki rachunek – uwzględniający zarówno awarie i wypadki przy pracy, jak i codzienne skutki zdrowotne, w tym zanieczyszczenie powietrza – prowadzony jest od lat przez niezależne zespoły badawcze, a jego wyniki wielu zaskakują (rys. 11.6)³².

Zestawienie otwierają paliwa kopalne: dla węgla brunatnego szacunki mówią w skali świata o ok. 34 zgonach na TWh, dla węgla kamiennego – o ok. 25, dla ropy – o ok. 18, dla gazu – o niecałych 3. Zdecydowana większość tych ofiar to nie wypadki w kopalniach czy elektrowniach, lecz rozproszone skutki zanieczyszczenia powietrza, które według WHO przyczynia się na świecie do milionów przedwczesnych zgonów rocznie – bez pojedynczej daty i miejsca, o których mogłyby pisać media. A gdzie jest atom? Na przeciwnym krańcu skali: ok. 0,03 zgonu na TWh, w jednej grupie z energią wiatrową i słoneczną. W przeliczeniu na jednostkę energii to kilkaset razy mniej niż w przypadku węgla. Co ważne, liczba dla energii jądrowej już obejmuje ofiary Czarnobyla i Fukushima – a mimo to pozostaje ona jednym z najbezpieczniejszych sposobów wytwarzania prądu, jakimi kiedykolwiek dysponowaliśmy. Energetyka jądrowa zanieczyszczeń powietrza nie emituje w ogóle (zob. pyt. 51).

³²Wszystkie wartości za: H. Ritchie, „What are the safest and cleanest sources of energy?”, *Our World in Data* (aktualizacja: lipiec 2022). Dane źródłowe: A. Markandya, P. Wilkinson, „Electricity generation and health”, *The Lancet* 370 (2007), s. 979–990 – paliwa kopalne i biomasę, na podstawie elektrowni europejskich; B. K. Sovacool i in., „Balancing safety with sustainability”, *Journal of Cleaner Production* 112 (2016), s. 3952–3965 – wiatr i słońce. Wartość dla energetyki jądrowej wyliczono przy założeniu 433 zgonów po Czarnobylu (obok zgonów udokumentowanych, podanych w pyt. 62, uwzględniono w niej szacunkowe zgony nowotworowe w populacji) oraz 2314 po Fukushima (całość zgonów związanych z ewakuacją, wg wcześniejszego stanu niż podany w pyt. 63).



RYŚ. 11.6 Zgony na jednostkę wyprodukowanej energii (szacunki globalne): paliwa kopalne najwyżej – głównie przez zanieczyszczenie powietrza – a energia jądrowa, obok wiatru i słońca, na samym dole, nawet po wliczeniu Czarnobyla i Fukushima. Źródło: Markandya & Wilkinson (2007), Sovacool et al. (2016), UNSCEAR (2008, 2018), OurWorldinData.org/energy.

Skąd rozbieżność między tymi liczbami a powszechną intuicją? Nasza uwaga skupia się na rzadkich, spektakularnych awariach – mają datę, miejsce i obrazy – a umykają jej skutki codzienne, rozłożone na miliony ludzi i dziesięciolecia. To nie zarzut wobec kogokolwiek, lecz cecha ludzkiej percepcji ryzyka, o której szerzej mówimy w następnym pytaniu (zob. pyt. 67).

Na koniec dwa zastrzeżenia, bez których ten obraz nie byłby uczciwy. Po pierwsze, to szacunki, a nie kronika: ofiar zanieczyszczenia powietrza nikt nie liczy pojedynczo – wylicza się je statystycznie, podobnie jak modelowe prognozy skutków Czarnobyla (zob. pyt. 62), a kolejne badania różnią się co do wielkości. Zgodnie potwierdzają jednak samą kolejność źródeł. Po drugie – i to warto powiedzieć wprost – rachunek nie jest ustawiony przeciw węgłowi. Liczby dla paliw kopalnych oparto na elektrowniach europejskich, wyposażonych w nowoczesne instalacje oczyszczania spalin, a więc na lepszym, a nie gorszym końcu skali. Liczba dla atomu jest za to policzona hojnie w drugą

ZAPAMIĘTAJ!

Elektrownia to tylko fragment energetycznego łańcucha. Przy ocenie bezpieczeństwa uwzględnia się także wydobycie surowców, produkcję urządzeń, budowę, transport i likwidację instalacji. Takie podejście nazywa się oceną całego cyklu życia.

stronę. Czarnobylowi przypisano w niej 433 zgony – blisko dziesięciokrotnie więcej niż ok. 45 zgonów udokumentowanych (zob. pyt. 62), bo doliczono szacowane zgony nowotworowe w populacji, a więc właśnie te modelowe prognozy, o których pisaliśmy, że nie są policzonymi ofiarami. Fukushima przypisano zaś wszystkie ok. 2300 zgonów związanych z ewakuacją – choć, jak wiemy z poprzedniego pytania, nie spowodowało ich promieniowanie. Wysoka wartość dla energetyki wodnej pochodzi z kolei niemal w całości z jednej katastrofy: bez pęknięcia zapory Baņqiao w Chinach w 1975 r. wynosiłaby 0,04 zamiast 1,3. Celem tego porównania nie jest więc wskazywanie winnych – każda energetyka, którą dysponujemy, ma swoje koszty. Chodzi o oddanie sprawiedliwości proporcjom: policzony rzetelnie, obok wszystkich innych źródeł, atom należy do najbezpieczniejszych z nich – i mówią to twarde dane, a nie zapewnienia.

67

SKĄD BIERZE SIĘ LĘK PRZED PROMIENIOWANIEM I JAK ODRÓŻNIĆ RZETELNĄ WIEDZĘ OD DEZINFORMACJI?

Zacznijmy od zrozumienia przyczyn: lęk przed promieniowaniem (niekiedy określany mianem radiofobii) nie jest głupi ani irracjonalny – ma głębokie, ludzkie przyczyny i nie zamierzamy go wyśmiewać. Psychologia od dawna wie, że pewnych zagrożeń boimy się bardziej niż innych, niezależnie od statystyk (rys. 11.7). Silniej reagujemy na zagrożenia, które są niewidzialne (promieniowania nie widać, nie czuć), narzucone (dotyczą nas bez naszej zgody, inaczej niż np. dobrowolne palenie czy jazda motocyklem), nowe i obce oraz kojarzone z katastrofą i bronią. Promieniowanie trafia w każdy z tych punktów naraz – dlatego budzi lęk większy, niż wynikałoby z realnej skali ryzyka (zob. pyt. 66). To nie wada charakteru, lecz sposób działania ludzkiej psychiki.

Problem w tym, że ten naturalny lęk bywa wykorzystywany – przez dezinformację, sensacyjne nagłówki i mylące obrazy z filmów. Jak się przed tym bronić? Kilkoma prostymi



RYS. 11.7 Cztery cechy, które sprawiają, że boimy się promieniowania jonizującego bardziej, niż wynika to z realnego zagrożenia – mechanizm ludzkiej percepcji ryzyka.

nawykami (rys. 11.8). Po pierwsze – sprawdzaj źródło: czy stoja za nim instytucje naukowe (jak UNSCEAR, WHO, MAEA) i krajowy dozór (PAA), czy anonimowy wpis. Po drugie – szukaj liczb i jednostek (zob. pyt. 4): „promieniowanie” bez podanej dawki nic nie znaczy. Po trzecie – uważaj na język: rzetelne źródło podaje skalę i niepewność, a dezinformacja straszy słowami („śmiercionośne”, „skażone”) bez rzetelnych danych. Po czwarte – sprawdzaj, czy coś porównano: pojedyncza liczba robi wrażenie, dopiero porównanie (np. z tłem naturalnym, z prześwietleniem promieniami X) nadaje jej sens.



SPRAWDŹ ŹRÓDŁO INFORMACJI



SZUKAJ LICZB I JEDNOSTEK
(JAKA DAWKA W JAKICH JEDNOSTKACH)



PYTAJ O PORÓWNANIE
(NP. Z TŁEM NATURALNYM)



ODRÓŻNIJ LĘK OD DANYCH
(UWAŻAJ NA JĘZYK, KTÓRY STRASZY)

RYS. 11.8 Cztery proste nawyki, które pomagają odróżnić rzetelną wiedzę od dezinformacji o promieniowaniu jonizującym.

Najważniejsze jest jednak nastawienie. Celem nie jest przestać się bać „na rozkaz”, lecz zamienić bezradny lęk na spokojną, opartą na wiedzy ocenę. Kiedy zrozumie-
my, skąd bierze się obawa, i nauczymy się sięgać do rzetelnych źródeł zamiast do straszących nagłówków, od-
zyskujemy sprawczość – sami potrafimy ocenić, co jest realnym zagrożeniem, a co tylko brzmi groźnie. A to, jak
pokazuje cała ta publikacja, jest w przypadku energii ją-
drowej różnicą fundamentalną.

Sto lat temu promieniotwór- czość sprzedawano jako kurację piękności

Dziś promieniowanie czę-
sto budzi lęk, ale w pierw-
szych dekadach po odkryciu
promieniotwórczości rad
uchodził za symbol nowo-
czesności, energii i zdrowia.
Sprzedawano wody i toni-
ki, sole do kąpieli, kremy,
a nawet pasty do zębów
reklamowane jako „radowe”.

Słynnym przykładem była
francuska linia kosmetyków
Tho-Radia, oferowana od
lat trzydziestych XX wieku
jako sposób na odmłodzenie
skóry i poprawę cery. Nazwa
nawiązywała do toru i radu,
a produkty firmował doktor
Alfred Curie – rzeczywisty
lekarz, który nie był spo-
krewniony z Marią ani Pier-
re’em Curie, lecz pozwolił
wykorzystać swoje nazwi-
sko w reklamie. Pierwsze
kosmetyki marki rzeczywi-

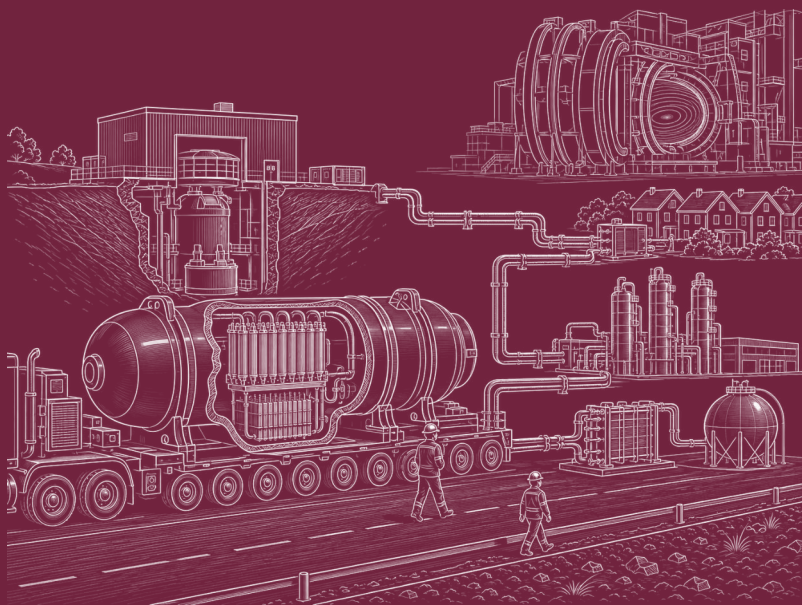
ście zawierały niewielkie
ilości substancji promie-
niotwórczych, choć w wielu
podobnych wyrobach ich
zawartość była śladowa albo
żadna.

Znacznie groźniejsze było
przedstawianie się radu
do organizmu. Robotnice
malujące świeące tarcze
zegarków, zwane później
Radowymi Dziewczętami,
formowały ustami końcówki
pędzelków i połykały drobiny
farby. Wiele z nich ciężko
zachorowało, a ich procesy
sądowe przyczyniły się do
rozwoju ochrony pracow-
ników przed promieniowa-
niem.

Te tragedie i kolejne dowody
naukowe zakończyły bez-
krytyczną modę na „radowe
zdrowie”. O ryzyku nie de-
cyduje jednak samo słowo
„promieniowanie”, lecz spo-
sób narażenia i konkretna
liczba – dawka.



*Kosmetyki Tho-Radia – opa-
kowanie pudru i reklama
z 1935 r.*



przyszłość energetyki jądrowej

MAŁE REAKTORY MODUŁOWE (SMR) – CZYM SĄ I JAKĄ ROLĘ MOGĄ ODEGRAĆ OBOK DUŻYCH ELEKTROWNI?

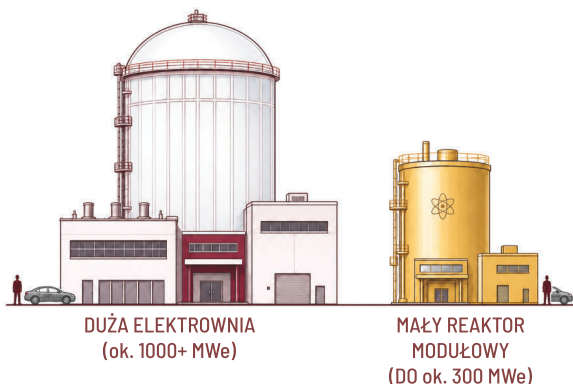
CZY WIESZ, ŻE...

Małe reaktory pływają po morzach od siedemdziesięciu lat. Od czasu pierwszego okrętu podwodnego z napędem jądrowym – amerykańskiego „Nautilusa” z 1955 r. – na morzu pracowało ok. 700 małych reaktorów. Dziś ponad 200 z nich napędza ponad 160 jednostek: okręty podwodne, lotniskowce i rosyjskie lodołamacze. Reaktor małej mocy to więc nie nowinka, lecz sprawdzona praktyka.

RYŚ. 12.1 Mały reaktor modułowy przy dużym bloku – mniejsza moc, ale moduły produkowane fabrycznie i dowożone na miejsce. Kolejne bloki SMR można stawiać etapami.

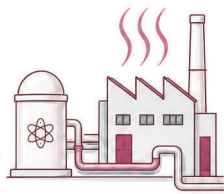
Nazwa mówi wiele. „Małe” – bo ich moc jest znacznie niższa niż dużego bloku (zwykle do ok. 300 MWe, a mikroreaktory jeszcze mniej), co widać na porównaniu skali (rys. 12.1). „Modułowe” – bo zbudowane są z powtarzalnych modułów. I to właśnie modułowość jest tu ideą przewodnią: zamiast budować każdą elektrownię przez wiele lat jako obiekt unikatowy (zob. pyt. 57–58), moduły i elementy SMR mają być seryjnie prefabrykowane w fabryce – w kontrolowanych warunkach – a na miejsce dowożone do montażu, co ma skrócić budowę i obniżyć jej koszt. Różnica przypomina tę między szcieniem garnituru na miarę a seryjną produkcją odzieży.

Po co nam mniejsze reaktory, skoro duże są wydajniejsze? Bo otwierają zastosowania, do których wielki blok się nie nadaje (rys. 12.2). Mniejszą moc łatwiej dopasować do lokalnej sieci lub do potrzeb pojedynczego odbiorcy. Kolejne bloki SMR można stawiać etapami (dokładając moduły w miarę potrzeb), co zmniejsza początkowe ryzyko finansowe (zob. pyt. 57). Mogą zasilać miejsca oddalone od dużej sieci – odległe rejony, wyspy, kopalnie – a także dostarczać nie tylko prąd, lecz i ciepło: dla przemysłu, dla





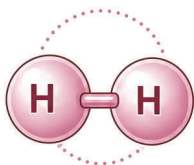
MIEJSCA BEZ ROZBUDOWANEJ
SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ



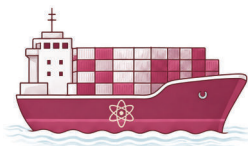
CIEPŁO DLA PRZEMYSŁU



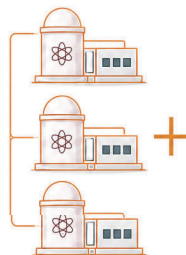
CIEPŁOWNICTWO



PRODUKCJA WODORU



NAPĘD STATKÓW



BUDOWA ETAPAMI

RYŚ. 12.2 Małe reaktory modułowe otwierają zastosowania, do których duży blok się nie nadaje – od zasilania odległych miejsc po ciepło dla przemysłu.

ciepłownictwa miejskiego, a nawet do produkcji wodoru (zob. pyt. 69). Rozważa się je również jako napęd dużych statków.

Czy to już działa, czy dopiero plany? I jedno, i drugie. Pierwsze małe reaktory nowego typu już pracują – m.in. wysokotemperaturowy HTR-PM w Chinach oraz pływająca elektrownia „Akademik Łomonosow” w Rosji – a od 2025 r. w kanadyjskim Darlington trwa budowa pierwszego komercyjnego SMR w państwach G7. Na deskach projektantów powstało przy tym ponad osiemdziesiąt koncepcji – tak różnych, że skrót SMR obejmuje dziś zarówno mikroreaktory, jak i bloki o mocy kilkuset MWe. Trzeba jednak zachować uczciwość: seryjna, tania produkcja, która jest głównym atutem SMR, dopiero musi się sprawdzić w praktyce na większą skalę – a bywały już bolesne lekcje, jak odwołany w 2023 r. po wzroście kosztów i nieuzyskaniu wystarczającej liczby odbiorców pionierski projekt

wdrożeniowy amerykańskiej firmy NuScale. Najrozsądniej patrzeć więc na SMR nie jako na zamiennik dużych elektrowni, lecz jako na ich uzupełnienie – narzędzie do zadań, w których wielki blok jest po prostu nieporęczny.

69

CZY LEPIEJ POCZekać NA REAKTORY IV GENERACJI, ZAMIAST BUDOWAĆ DZIŚ REAKTORY III/III+?

To jeden z najczęściej powtarzanych i pozornie najtrafniejszych argumentów sceptyków: „skoro nadchodzą lepsze reaktory, po co budować obecne?”. Brzmi rozsądnie, ale kryje pułapkę. Przyjrzyjmy się więc, czym naprawdę dziś dysponujemy (rys. 12.3).

Reaktory generacji III i III+ – te budowane obecnie – to technologia dojrzała: przebadana, licencjonowana przez dozór (zob. pyt. 55) i wielokrotnie sprawdzona w praktyce, odporna także na zdarzenia takie jak w Fukushima (systemy pasywne, zob. pyt. 20). Można je stawiać już teraz. Reaktory IV generacji to natomiast rodzina nowatorskich konstrukcji – m.in. wysokotemperaturowe reaktory gazowe, reaktory sodowe czy na stopione sole – kuszące obietnicami: jeszcze wyższego bezpieczeństwa, mniejszej ilości odpadów, lepszego wykorzystania paliwa. Problem w tym, że są one wciąż na etapie projektów, instalacji



RYS. 12.3 Reaktory III/III+ są gotowe do budowy dziś. IV generacja dojrzewa i ma dołączyć później – dlatego rozwija się ją równoległe, a nie zamiast.

cji demonstracyjnych lub, co najwyżej, prototypów, a ich komercjalizacja to realistycznie perspektywa lat 30. i 40. tego wieku – obarczona niepewnością, bo nowe technologie potrafią się opóźniać.

Na czym więc polega pułapka „poczekajmy”? Na tym, że czas nie stoi w miejscu. Każdy rok zwłoki to rok, w którym prąd i tak trzeba wyprodukować – a jeśli nie z atomu, to najczęściej ze spalania węgla i gazu, z całą ich emisją i zanieczyszczeniem (zob. pyt. 66). Czekając na „idealny” reaktor, płacilibyśmy realną cenę klimatyczną i zdrowotną tu i teraz – za technologię, która może przyjść później, niż się obiecuje. To trochę jak nie kupować sprawdzonego samochodu, bo za dekadę zapowiadają lepszy model.

Dlatego odpowiedź brzmi: to nie jest wybór „albo-albo”. Buduje się dziś sprawdzone reaktory III/III+, a IV generację i nowe zastosowania (ciepło dla przemysłu, ciepłownictwo, wodór) rozwija się równolegle, tak by weszły do gry, gdy dojrzeją. W tych pracach uczestniczy zresztą i Polska: w Narodowym Centrum Badań Jądrowych ukończono projekt podstawowy niewielkiego badawczego reaktora wysokotemperaturowego HTGR-POLA, pomyślanego jako pierwszy krok ku reaktorom dostarczającym polskiemu przemysłowi parę o wysokiej temperaturze (zob. pyt. 7). Warto też pamiętać, że doświadczenie i kadry zdobyte przy dzisiejszych budowach są dokładnie tym, co pozwoli sprawnie wdrożyć reaktory jutra. Budowanie teraz nie zamyka drogi do IV generacji – ono ją otwiera.

CIĘKAWOSTKA

Reaktor „przyszłości” pracował już sześćdziesiąt lat temu. W amerykańskim Oak Ridge w latach 1965–1969 działał Molten Salt Reactor Experiment – reaktor na stopione sole, dziś zaliczany do IV generacji. Przepracował ponad 13 tysięcy godzin. Programu zaniechano nie z powodu awarii, lecz dlatego, że pieniądze skierowano na inny typ reaktorów.

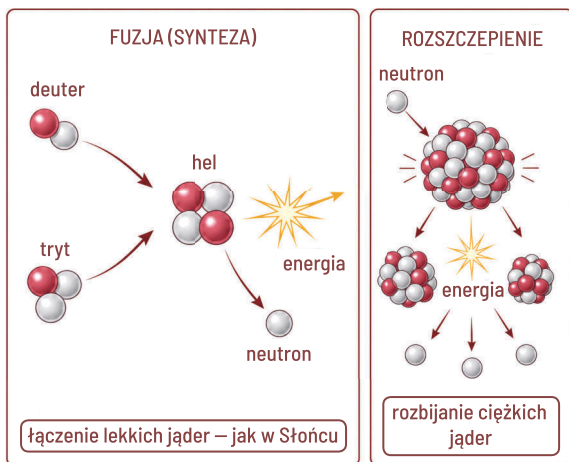
CZY FUZJA TERMOJĄDROWA ZASTĄPI KIEDYŚ ENERGETYKĘ JĄDROWĄ OPARTĄ NA ROZSZCZEPIENIU?

Zacznijmy od tego, czym fuzja w ogóle jest – bo to odwrotność procesu z dzisiejszych elektrowni. Rozszczepienie polega na rozbijaniu ciężkich jąder uranu na lżejsze (zob. pyt. 2). Fuzja (synteza) polega na czymś przeciwnym: na łączeniu lekkich jąder – najczęściej deuteru i trytu – w jądro helu i neutron, przy czym również uwalnia

70

RYS. 12.4

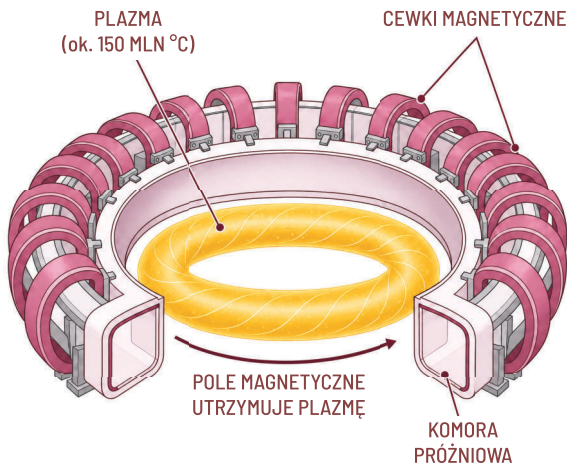
W reakcji fuzji lekkie jądra (deuter i tryt) łączą się w hel, uwalniając energię – to odwrotność reakcji rozszczepienia, czyli rozbijania ciężkich jąder.



się energia (rys. 12.4). Fuzja jądrowa (reakcja proton-proton) zasila Słońce i gwiazdy. Gdyby udało się ją opanować na Ziemi, dałaby ogromne ilości energii z niemal niewyczerpalnego paliwa, bez długożyciowych odpadów wysokoaktywnych i bez ryzyka niekontrolowanej reakcji łańcuchowej – plazma przy najmniejszym zakłóceniu po prostu gaśnie.

Dlaczego więc nie mamy jeszcze elektrowni fuzyjnych? Bo to jedno z najtrudniejszych wyzwań inżynierskich w historii. Aby jądra się połączyły, trzeba je rozgrzać do ok. 150 milionów stopni Celsjusza – dziesięć razy więcej, niż panuje w jądrze Słońca³³ – i utrzymać tak gorącą plazmę odpowiednio długo i gęsto. Najczęściej służy do tego urządzenie zwane tokamakiem, w którym plazmę „wiążą” potężne pola magnetyczne, aby nie dotknęła ścian komory (rys. 12.5). Postępy są realne i imponujące: w 2022 r. amerykański ośrodek National Ignition Facility (NIF) w Kalifornii po raz pierwszy uzyskał z fuzji więcej energii, niż

³³Wartość projektowa dla reaktora ITER: temperatura plazmy ok. 150 mln °C, czyli dziesięciokrotność temperatury jądra Słońca (ok. 15 mln °C). W samym centrum plazmy przewiduje się 150–300 mln °C. Za: ITER Organization, iter.org.



RYS. 12.5

W tokamaku potężne pola magnetyczne utrzymują rozgrzaną do milionów stopni plazmę z dala od ścian komory.

wynosiła energia światła laserowego dostarczona do tarczy – historyczny dowód, że to w ogóle możliwe³⁴. Ale uwaga na proporcje: ten bilans liczonego względem samej wiązki laserowej, a nie całego, ogromnego urządzenia – na wytworzenie owych 2 MJ światła instalacja pobrała z sieci kilkaset megadżuli, czyli około stu razy więcej, niż wyniósł uzysk³⁵. Do elektrowni oddającej prąd do sieci wciąż bardzo daleko.

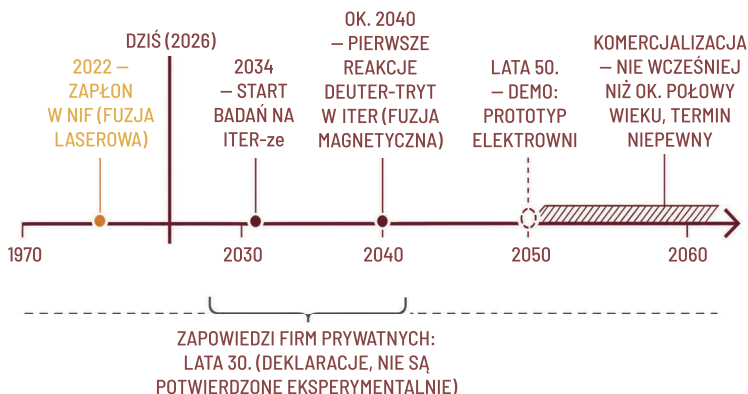
Jak daleko? Tu potrzebna jest uczciwość, bo temat obrósł obietnicami. Sztandarowy międzynarodowy projekt – reaktor ITER – z powodu trudności przesunął pierwsze reakcje deuter–tryt na okolice 2040 r., a jego łączny koszt, według niezależnych szacunków, sięga już kilkudziesięciu miliardów euro. Po nim miałyby dopiero powstać prototyp elektrowni, a komercyjne wykorzystanie to perspektywa

CZY WIESZ, ŻE...

Słowo „tokamak” to rosyjski skrótowiec. Powstało w 1957 r. od wyrażenia „toroidalna kamera z magnitnymi katuszkami”, czyli „komora toroidalna z cewkami magnetycznymi”. Początkowo miało to być „tokomag”, ale ostatnią głoskę zmieniono, bo tak po prostu lepiej brzmiało.

³⁴Eksperyment z 5 grudnia 2022 r.: 2,05 MJ energii lasera dostarczonej do tarczy dało 3,15 MJ energii fuzji. Wynik opublikowano w recenzowanym „Physical Review Letters” z 5 lutego 2024 r. Od tego czasu zapłon powtarzano wielokrotnie, a w kwietniu 2025 r. uzyskano 8,6 MJ przy 2,08 MJ energii lasera. Za: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), lasers.llnl.gov.

³⁵Wg NIF na potrzeby tego strzału pobrano z sieci 300–400 MJ. NIF nie jest urządzeniem energetycznym – powstał przede wszystkim na potrzeby badań fizyki broni jądowej. Za: LLNL.



RYŚ. 12.6 Uczciwy horyzont fuzji: mimo realnych przełomów komercyjna elektrownia to perspektywa co najmniej połowy wieku – i to niepewna.

CIKAWOSTKA

Cały światowy zapas trytu zmieściłby się w bagażu podręcznym. To około 25 kilogramów, pozyskiwanych ubocznie w kanadyjskich reaktorach CANDU. Gram kosztuje kilkadziesiąt tysięcy dolarów, a zapas topnieje sam z siebie o ponad 5% rocznie. Dlatego przyszłe elektrownie fuzyjne będą musiały wytwarzać tryt same – z litu, w ścianach własnej komory.

co najmniej połowy wieku – jeśli w ogóle. Do rozwiązania pozostają fundamentalne problemy: utrzymanie reakcji w sposób ciągły (dziś to wciąż krótkie impulsy), stworzenie materiałów, które przetrwają lata bombardowania neutronami, zapewnienie dostaw trytu oraz opłacalność całego przedsięwzięcia. Nie bez powodu w środowisku krąży żart, że „fuzja jest o trzydzieści lat przed nami – i zawsze będzie” (rys. 12.6).

Obraz byłby niepełny bez jeszcze jednego zjawiska. Obok wielkich programów publicznych wyrosła w ostatnich latach cała branża prywatnych firm zajmujących się fuzją jądrową. W 2026 r. było ich już kilkadziesiąt, zebrały łącznie ponad czternaście miliardów dolarów i zatrudniają ponad szesnaście tysięcy osób³⁶. Amerykańska Commonwealth Fusion Systems, wywodząca się z MIT, buduje pod Bostonem kompaktowy tokamak SPARC oparty na magnesach nadprzewodnikowych nowej generacji. Niemiecka Proxima Fusion stawia na stellarator, a inne firmy próbują fuzji laserowej. Najdalej idzie Helion Energy, która podpisała

³⁶Wg raportu „The Global Fusion Industry in 2026” (Fusion Industry Association, lipiec 2026): 56 firm, 14,24 mld USD pozyskane od 2021 r. (w tym rekordowe 4,48 mld w ciągu ostatnich dwunastu miesięcy), ponad 16 tys. zatrudnionych.

z Microsoftem pierwszą w dziejach umowę na sprzedaż energii z fuzji – z dostawą już od 2028 r.³⁷ Ta konkurencja pomysłów realnie przyspiesza rozwój całej dziedziny. Obowiązuje tu jednak zasada znana z całej tej publikacji: dopóki żadna z tych maszyn nie odda do sieci pierwszej kilowatogodziny energii, terminy z materiałów inwestorskich należy traktować jak obietnice, a nie fakty.

Co to znaczy dla pytania „czy nie lepiej poczekać na fuzję zamiast budować elektrownie jądrowe”? Że to argument chybiony – z prostego powodu: arytmetyki czasu. Nawet w optymistycznym scenariuszu fuzja nie zasili sieci przez najbliższe dziesięciolecia, a prąd elektryczny musimy zapewnić już teraz (zob. pyt. 66). Rozszczepienie jest sprawdzone i dostępne dziś. Fuzja jest obiecującą przyszłością, którą warto rozwijać – ale nie można na niej opierać planów na najbliższe pokolenie. To nie są konkurencji: to dzisiejsze rozwiązanie i (być może) rozwiązanie jutra. Rozsądnie jest budować to, co działa teraz, i jednocześnie cierpliwie pracować nad tym, co może przyjść później.

³⁷ Umowa z 2023 r. na co najmniej 50 MW. Budowę elektrowni rozpoczęto w 2025 r. Wielu ekspertów uważa ten termin za mało realny. Źródła: komunikaty Helion Energy i Microsoftu, Fusion Industry Association.

ITER

W listopadzie 1985 r. w Genewie po raz pierwszy spotkali się Ronald Reagan i Michaił Gorbaczow. Rozmawiali przede wszystkim o kontroli zbrojeń, ale na końcu wspólnego oświadczenia znalazł się niepozorny punkt: wezwanie do „możliwie najszerszej” międzynarodowej współpracy nad energią z fuzji. Rok później Europa, Japonia, ZSRR i Stany Zjednoczone uzgodniły roz-

poczęcie wspólnych prac nad projektem dużego eksperymentalnego urządzenia fuzyjnego.

Tak narodził się ITER – dziś budowany w Prowansji przez międzyrządową Organizację ITER, mającą 7 członków. Projekt przetrwał rozpad ZSRR i kolejne kryzysy, stając się jednym z nielicznych genewskich ustaleń, które przetrwały i stały się trwałe międzynarodowe przedsięwzięcie.



Plac budowy ITER w Cadarache we Francji, 2017 r.

Słowniczek

aktynowce — grupa ciężkich pierwiastków (m.in. uran, pluton, neptun, ameryk, kiur) powstających w paliwie; część z nich jest dłużejżyciowa.

aktywacja neutronowa — przemiana trwałych jąder w promieniotwórcze wskutek pochłonięcia neutronu, dlatego promieniotwórcze stają się także elementy konstrukcji reaktora.

aktywność promieniotwórcza — liczba rozpadów promieniotwórczych zachodzących w próbce w ciągu sekundy; mierzy się ją w bekerelach (Bq).

analiza cyklu życia (LCA) — metoda liczenia wpływu na środowisko „od kołyski po grób” — od budowy i wydobywania surowców po likwidację.

analiza hedoniczna — metoda statystyczna szacująca, jak poszczególne cechy (w tym bliskość elektrowni) wpływają na cenę nieruchomości.

awaria projektowa — awaria z góry przewidziana i uwzględniona w projekcie, na którą przygotowano konkretne układy bezpieczeństwa.

badanie epidemiologiczne — analiza występowania chorób w dużych grupach ludzi, szukająca związków między narażeniem a zachorowaniami.

bariera inżynierska / geologiczna — kolejne warstwy ochrony: wykonane przez człowieka (forma odpadu, pojemnik, glina) oraz naturalne (skała macierzysta).

basen przyreaktorowy — głęboki zbiornik z wodą przy reaktorze, w którym wy-

palone paliwo jest chłodzone i osłanianie przez pierwsze lata.

blackout (utrata zasilania) — utrata całego zasilania elektrycznego elektrowni; w reaktorach z pasywnymi układami bezpieczeństwa nie zagraża rdzeniowi.

blokada tarczycy — wysycenie tarczycy stabilnym jodem, dzięki czemu nie wchłania ona jodu promieniotwórczego.

ciepło powyłączeniowe — ciepło wytwarzane przez rozpad produktów rozszczepienia już po wyłączeniu reaktora; niewielkie, ale wymagające ciągłego odbioru.

ciężka woda — woda, w której cząsteczkach zwykły wodór zastąpiono jego cięższą odmianą, deuterem; pochłania znacznie mniej neutronów niż zwykła woda, co pozwala reaktorowi pracować na uranie naturalnym.

CO₂-eq (ekwiwalent CO₂) — wspólna miara różnych gazów cieplarnianych przeliczonych na równoważną ilość dwutlenku węgla.

cykl otwarty / zamknięty — dwa podejścia do wypalonego paliwa: w otwartym jest składowane w głębokich warstwach geologicznych, w zamkniętym jest przerabiane i częściowo wykorzystywane ponownie.

cząstka alfa / beta — drobne cząstki wyrzucane przez rozpadające się jądro: alfa to jądro helu, beta to elektron albo pozyton.

częstość dużego uwolnienia — szacowana częstość zdarzeń, w których znaczne ilości substancji promienio-

twórczych wydostają się do otoczenia; jeszcze niższa niż CDF.

częstość uszkodzenia rdzenia (CDF) — szacowana liczba zdarzeń uszkodzenia paliwa w rdzeniu przypadająca na rok pracy jednego reaktora; podstawowa miara ryzyka.

czynniki ludzkie — wpływ decyzji, szkolenia i projektu sterowni na bezpieczeństwo; kluczowa lekcja z Three Mile Island.

ćwiczenia awaryjne — planowe sprawdziany procedur i współdziałania służb, mające zapewnić sprawne działanie w razie realnego zdarzenia.

dawka pochłonięta — energia promieniowania pochłonięta przez kilogram materii; wielkość czysto fizyczna, wyrażana w grejach (Gy).

dawka równoważna — dawka pochłonięta pomnożona przez współczynnik zależny od rodzaju promieniowania (dla alfa większy niż dla gamma); odnosi się do pojedynczego narządu, wyrażana w siwertach (Sv).

dawka skuteczna (efektywna) — suma dawek równoważnych dla całego ciała, z wagami odpowiadającymi wrażliwości narządów; wyrażana w siwertach, służy do wyznaczania limitów i porównywania narażenia ludzi.

decyzja środowiskowa — rozstrzygnięcie wydawane po ocenie oddziaływania na środowisko, określające warunki realizacji inwestycji.

decyzja zasadnicza — wstępna, formalna zgoda państwa na realizację danej inwestycji jądrowej, otwierająca dalszy proces.

deficyt masy — niewielka różnica między masą jądra a sumą mas jego składników; zgodnie z $E = mc^2$ właśnie ona zamienia się w energię.

dekontaminacja — usunięcie skażenia promieniotwórczego z ludzi, sprzętu lub terenu (np. przez umycie).

demontaż — rozbiórka systemów i budynków elektrowni; elementy skażone trafiają do odpadów, reszta — po sprawdzeniu — jak zwykły materiał.

deuter — ciężka odmiana (izotop) wodoru, używana jako paliwo w reakcjach fuzji. Jądro deuteru składa się z protonu i neutronu.

dioda danych — urządzenie przepuszczające dane wyłącznie w jednym kierunku (na zewnątrz chronionej sieci); techniczny „zawór zwrotny” dla informacji.

dotądnie / ujemne sprzężenie zwrotne — reakcja nasilająca się (dotądnie) lub samoczynnie hamująca (ujemne) przy wzroście mocy; reaktory zachodnie mają ujemne.

„dokładnie oszacowane zero” — wynik badania wskazujący z dużą precyzją brak istotnego efektu — tu: brak wpływu bliskości elektrowni na ceny.

doświadczenie eksploatacyjne — wnioski z rzeczywistych zdarzeń w elektrowniach na całym świecie, zbierane i wdrażane, by unikać ich powtórek.

dozór jądrowy (regulator) — niezależny urząd państwowy nadzorujący bezpieczeństwo obiektów jądrowych; w Polsce — Państwowa Agencja Atomistyki (PAA).

dozymetr — przyrząd mierzący promieniowanie lub otrzymaną dawkę; wersje osobiste są tanie i dostępne dla każdego.

dozymetr osobisty — urządzenie noszone przez pracownika, rejestrujące otrzymaną przez niego dawkę.

dystans planowania spożycia i kontroli towarów — obszar poza strefami, na któ-

rym planuje się kontrolę żywności i płodów rolnych na wypadek skażenia.

dywersyfikacja dostaw — opieranie zaopatrzenia na wielu niezależnych źródłach i dostawcach, tak by kłopoty jednego z nich nie zagroziły całości.

działania interwencyjne — działania podejmowane w razie zdarzenia radiacyjnego w celu ochrony ludności (np. ukrycie się, ewakuacja, podanie jodu, ograniczenie żywności).

epidemiologia — nauka badająca występowanie chorób w dużych grupach ludzi; pozwala wychwycić związki przyczynowe, o ile efekt jest dość duży, by odróżnić go od tła.

filary bezpieczeństwa MAEA — zestaw siedmiu warunków sformułowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej, które muszą być zachowane, by obiekt jądrowy pozostał bezpieczny również w warunkach konfliktu.

fragment rozszczepienia — jądro powstałe z rozbitcia uranu; wiele z nich jest krótkożyciowych i szybko zanika.

fundusz likwidacyjny — wydzielony, chroniony fundusz, na który odkłada się środki z bieżącej produkcji, by sfinansować przyszłą rozbiórkę i gospodarkę odpadami.

fuzja (synteza) termojądrowa — łączenie lekkich jąder (np. deuteru i trytu) w cięższe, z uwolnieniem energii; proces zasilający Słońce — odwrotność rozszczepienia.

gazy szlachetne (promieniotwórcze) — np. ksenon, krypton — gazy, które szybko się rozpraszają i rozpadają; główny składnik uwolnień gazowych.

generacja III/III+ — obecnie budowane, dojrzałe reaktory z ulepszeniami bezpieczeństwa (m.in. systemami pasywnymi); dostępne od zaraz.

generacja IV — rodzina nowatorskich reaktorów przyszłości (gazowe, wysokotemperaturowe, sodowe, na stopione sole), wciąż na etapie prototypów.

glina bentonitowa (bentonit) — ił, który w kontakcie z wodą pęcznieje i uszczelnia otoczenie pojemnika, odcinając dopływ wody.

granica ciśnieniowa obiegu pierwotnego — szczelny układ obiegu chłodzenia wraz ze stalowym zbiornikiem reaktora, oddzielający wodę i paliwo od reszty elektrowni.

grej (Gy) — jednostka dawki pochłoniętej — energii promieniowania przypadającej na kilogram tkanki, 1 Gy = 1 J/kg.

INPO — instytut powołany po TMI, dbający o wspólne standardy szkolenia i eksploatacji elektrowni jądrowych.

instalacja demonstracyjna — prototyp sprawdzający technologię w praktyce, przed jej komercyjnym wdrożeniem.

inwentaryzacja przyrodnicza — spis i ocena występujących na danym terenie gatunków roślin i zwierząt oraz siedlisk.

inwestycje towarzyszące — dodatkowe przedsięwzięcia (drogi, sieci, obiekty publiczne) realizowane w regionie przy okazji budowy elektrowni.

IRRS — misja MAEA oceniająca krajowy system dozoru jądrowego — a więc kontrola samego kontrolera.

izolacja sejsmiczna — specjalne łożyska między fundamentem a konstrukcją, odcinające budynek od drgań gruntu podczas trzęsienia ziemi.

jod stabilny — zwykły, nieszkodliwy jod podawany w tabletkach, by wysycić tarczycę przed jodem promieniotwórczym.

jod-131 — promieniotwórczy izotop jodu, który może uwolnić się podczas awarii i który tarczyca wchłania jak zwykły jod.

jonizacja – wybicie elektronu z atomu; promieniowanie zdolne to robić nazywamy jonizującym.

kanal ciśnieniowy – rura wytrzymująca ciśnienie chłodziwa, wewnątrz której znajdują się wiązki paliwowe; w reaktorze CANDU kilkaset takich poziomych kanałów zastępuje jeden duży zbiornik ciśnieniowy.

kaseta (wiązka) paliwowa – zestaw rurzek z pastylkami paliwa wkładany do rdzenia jako całość; w PWR i BWR są to kasety o długości kilku metrów, w CANDU – krótkie, około półmetrowe wiązki umieszczane jedna za drugą w kanałach.

konstrukcja fail-safe (bezpieczna przy uszkodzeniu) – sposób projektowania urządzeń, przy którym utrata zasilania lub sterowania samoczynnie przeprowadza je w stan bezpieczny – np. zawór otwierany sprężyną.

konsultacje transgraniczne – postępowanie (na podstawie konwencji z Espoo), w którym uwagi mogą zgłaszać także kraje sąsiednie i ich mieszkańcy.

kontrakt różnicowy (CfD) – wieloletnia umowa między wytwórcą energii a państwem stabilizująca przychody: gdy cena rynkowa jest niższa od ustalonej ceny wykonania, państwo dopłaca różnicę, a gdy wyższa – wytwórca oddaje nadwyżkę.

konkret żywności – czasowe ograniczenie spożycia lokalnych produktów i wody na wypadek ich skażenia – proste, a bardzo skuteczne działanie.

konwencja bezpieczeństwa jądowego – międzynarodowa umowa (1994) zobowiązująca państwa do utrzymywania wysokiego poziomu bezpieczeństwa obiektów jądowych i poddawania się okresowym przeglądom.

koszt eksploatacji – bieżące koszty pracy elektrowni: paliwo, obsługa i utrzymanie oraz odkładane środki na likwidację i odpady.

koszt finansowania (kapitału) – odsetki i wymagany zwrot od pieniędzy pożyczonych na budowę; przy długiej budowie mocno wpływa na cenę energii.

koszt kapitałowy – koszt zbudowania i sfinansowania elektrowni (beton, stal, systemy, odsetki); w energetyce jądowej dominująca część ceny energii.

koszulka paliwowa – cienka, szczelna metalowa rurka zamykająca pastylki paliwa; stanowi pierwszą barierę zatrzymującą substancje promieniotwórcze.

kruchość radiacyjna – zmiana własności stali pod wpływem neutronów, prowadząca między innymi do wzrostu temperatury przejścia kruchego i zmniejszenia odporności materiału na pękanie; nie oznacza dostownego „kruszenia się” zbiornika.

kultura sprawiedliwa – zasada, wg której za zgłoszenie problemu lub nieumyślnego błędu się nie karze, ale świadome łamanie zasad pozostaje niedopuszczalne; dzięki niej problemy wychodzą na jaw wcześniej.

likwidacja elektrowni jądowej – proces bezpiecznej rozbiórki elektrowni po zakończeniu eksploatacji i przywrócenia terenu do użytku.

limit temperatury zrzutu – prawnie określona granica temperatury (i jej przyrostu) wody oddawanej do np. rzeki lub jeziora, chroniąca organizmy wodne.

ługowanie in situ (ISL) – metoda wydobycia uranu polegająca na wypłukiwaniu go wprost ze złoża przez otwory wiertnicze, bez kopania; tą metodą pozyskuje się dziś ponad połowę światowego uranu.

margines (zapas) bezpieczeństwa – różnica między warunkami, na jakie coś zaprojektowano, a warunkami, które mogą realnie wystąpić; im większy zapas, tym mniejsze ryzyko.

masa nadkrytyczna – ilość i układ materiału pozwalające na lawinową reakcję; w reaktorze celowo nieosiągalne.

MeV (megaelektronowolt) – jednostka energii wygodna w świecie atomów. Jeden elektronowolt (eV) to energia, jaką zyskuje elektron rozpędzony napięciem jednego wolta; megaelektronowolt (MeV) to milion elektronowoltów. Energie przemian jądrowych podaje się właśnie w MeV, bo dżul byłby tu jednostką miliardy razy za dużą.

milisiwert (mSv) / mikrosiwert (μSv) – praktyczne jednostki dawki – tysięczna i milionowa część siwerta; w nich podaje się narażenie ludzi.

moc dawki – natężenie promieniowania „tu i teraz” – ile dawki przybywa w jednostce czasu (np. μSv na godzinę); to ją pokazują stacje monitoringu i dozymetry.

model liniowy bezprogowy (LNT) – założenie, że ryzyko nowotworu rośnie wprost proporcjonalnie do dawki i nie ma progu „bezpiecznego”; przyjęte ostrożnościowo do ustalania limitów, nie jako udowodniony fakt.

moderator – substancja spowalniająca neutrony do prędkości, przy której wywołują rozszczepienie; w reaktorze wodnym rolę tę pełni zwykła woda.

molibden-99 / technet-99m – para izotopów kluczowa dla medycyny nuklearnej; z molibdenu-99 uzyskuje się w szpitalach technet-99m, używany w większości badań.

monitoring biologiczny – systematyczne badanie stanu organizmów wodnych (ryb, roślin) w otoczeniu elektrowni.

monitoring radiacyjny – stały pomiar promieniowania w środowisku (powietrze, woda, gleba, żywność) prowadzony przez sieć stacji i laboratoriów.

mutacja – trwała zmiana w DNA komórki; większość mutacji jest naprawiana lub nieszkodliwa, część może z czasem sprzyjać nowotworowi.

MWe – megawat (milion watów) mocy elektrycznej; moc cieplną reaktora oznacza się MWt i jest ona około trzykrotnie większa.

naturalna cyrkulacja – samoczynny obieg cieczy napędzany różnicą temperatur (ciepła woda unosi się, zimna opada) – bez pomp.

neutron – obojętna elektrycznie cząstka budująca jądro atomu; to pochłonięcie neutronu inicjuje rozszczepienie.

NPT (Układ o nierozprzestrzenianiu) – międzynarodowy traktat mający zapobiegać rozprzestrzenianiu broni jądrowej; Polska jest jego stroną.

obudowa bezpieczeństwa – wielka, szczelna powłoka stalowo-betonowa obejmująca reaktor; ostatnia bariera i zarazem osłona przed zagrożeniami zewnętrznymi.

ocena oddziaływania na środowisko – postępowanie badające wpływ planowanej inwestycji na środowisko, wymagane przed uzyskaniem zgód na budowę.

ochrona fizyczna – zabezpieczenie obiektu przed celowym, wrogim działaniem człowieka (sabotaż, atak, kradzież materiałów jądrowych); odróżniana od bezpieczeństwa jądrowego, które chroni przed awariami.

ochrona radiologiczna – zespół zasad i limitów ograniczających narażenie ludzi na promieniowanie, z dodatkowymi środkami dla grup wrażliwych.

oddziaływanie silne — najsilniejsze z czterech podstawowych oddziaływań; działa tylko na bardzo małych odległościach i spaja protony oraz neutrony w jądrze.

odpady nisko-, średnio- i wysokoaktywne — trzy klasy odpadów według poziomu promieniotwórczości: od lekko skażonych przedmiotów codziennego użytku po silnie promieniotwórcze wypalone paliwo.

ograniczenie mocy (curtailment) — czasowe zmniejszenie produkcji elektrowni — tu po to, by nie przekroczyć limitów termicznych, a nie z powodów bezpieczeństwa.

okresowy przegląd bezpieczeństwa — kompleksowa ocena bezpieczeństwa obiektu wykonywana w ustalonych odstępach, często około dziesięciu lat, z uwzględnieniem aktualnych norm, stanu technicznego i doświadczeń eksploatacyjnych.

OSART — misja Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej oceniająca bezpieczeństwo eksploatacji elektrowni, z naciskiem na czynnik ludzki.

paliwo MOX — paliwo z mieszaniny tlenków uranu i plutonu (ang. mixed oxide), wytwarzane z materiału odzyskanego z wypalonego paliwa.

percepcja ryzyka — sposób, w jaki oceniamy zagrożenia — zależny nie tylko od statystyk, ale i od tego, czy są niewidzialne, narzucone i nowe.

plazma — rozgrzany do milionów stopni, zjonizowany gaz; stan, w którym zachodzi fuzja.

pluton-240 — izotop plutonu gromadzący się w paliwie długo pracującym w reaktorze; jego obecność uniemożliwia budowę broni jądrowej.

płyn Lugola — roztwór jodu podawany w celu blokady tarczycy; zastosowany masowo w Polsce po Czarnobylu.

podatek od nieruchomości — lokalny podatek zależny od wartości i powierzchni obiektu; dla elektrowni bardzo wysoki — kluczowe źródło dochodów gminy.

pojemnik typu B — najmocniejsza klasa pojemników transportowych, przeznaczona dla materiałów silnie promieniotwórczych; musi przejść komplet ekstremalnych prób.

potas-40 — naturalny promieniotwórczy izotop potasu, obecny w glebie, skałach, żywności i w ciele człowieka.

praca w podstawie (baseload) — eksploatacja źródła przede wszystkim z wysoką, względnie stałą mocą w celu pokrywania stałej części zapotrzebowania; nie oznacza technicznej niemożności regulacji mocy.

probabilistyczna analiza bezpieczeństwa (PSA) — metoda szacowania ryzyka polegająca na rozłożeniu możliwej awarii na wiele scenariuszy i obliczeniu ich łącznego prawdopodobieństwa.

produkt rozszczepienia — fragment rozszczepienia lub jądro powstałe w wyniku rozpadu fragmentu rozszczepienia; wiele z nich jest krótkożytych i szybko zanika.

promieniowanie Czerenkowa — charakterystyczna niebieska poświata powstająca w wodzie wokół rdzenia pracującego reaktora.

promieniowanie rentgenowskie (X) — fale elektromagnetyczne o dużej energii, podobne do gamma, ale powstające poza jądrem (m.in. w lampie rentgenowskiej); wykorzystywane w medycynie.

promieniowrażliwość (wrażliwość radiacyjna) — podatność tkanki na uszko-

dzienia promieniowaniem; większa tam, gdzie komórki szybko się dzielą – u dzieci i u nienarodzonego dziecka.

próba wytrzymałości (test zderzeniowy) – seria prób (upadek, przebiecie, pożar, zanurzenie), które pojemnik musi przejść, zachowując szczelność.

próbki-świadki – kapsuły z próbkami materiału zbiornika umieszczone w polu neutronowym. Dzięki większemu napromieniowaniu neutronami mogą wcześniej ujawnić przewidywane zmiany własności stali.

przechowalnik wypalonego paliwa – obiekt na terenie elektrowni, w którym ostudzone wcześniej paliwo w basenie przyreaktorowym przechowuje się przez dziesięciolecia: basenowy („na mokro”) albo pojemnikowy lub komorowy („na sucho”), chłodzony samym przepływem powietrza.

przerób (recykling) paliwa – chemiczne oddzielenie z wypalonego paliwa użytecznego uranu i plutonu od właściwych odpadów.

przerwa powietrzna (air gap) – całkowite fizyczne odcięcie systemu od sieci zewnętrznych; brak jakiegokolwiek połączenia z internetem.

radiofarmaceutyk – preparat zawierający śladową ilość izotopu promieniotwórczego, podawany pacjentowi do badania lub leczenia.

radiofobia – nadmierny, nieproporcjonalny do realnego ryzyka lęk przed promieniowaniem.

radiografia przemysłowa – „prześwietlanie” elementów (spoin, odlewów) promieniowaniem w celu wykrycia ukrytych wad.

radon – naturalny, promieniotwórczy gaz szlachetny powstający w gruncie z rozpadu uranu; gromadzi się w sła-

bo wietrzonych pomieszczeniach i jest głównym naturalnym źródłem dawki.

raport lokalizacyjny – obszerne opracowanie z wynikami badań terenu, oceniane przez dozór jądrowy przed zgodą na daną lokalizację.

RBMK – typ radzieckiego reaktora użytego w Czarnobylu; miał cechy (dodatknie sprzężenie, brak obudowy) niespotykane w reaktorach zachodnich.

reaktor badawczy – reaktor służący nie do produkcji prądu, lecz do badań, testów materiałów i wytwarzania izotopów.

reaktywność – miara odchylenia reaktora od stanu równowagi: dodatnia oznacza tendencję do wzrostu mocy, ujemna – do jej spadku.

redundancja – zwielokrotnienie ważnych układów, dzięki któremu uszkodzenie jednego z nich nie pozbawia elektrowni danej funkcji bezpieczeństwa.

rezerwa strategiczna – zapas surowca gromadzony z wyprzedzeniem na wypadek przerw w dostawach.

ryzyko stochastyczne – prawdopodobieństwo wystąpienia skutku (nowotworu) rosnące z dawką – w odróżnieniu od pewnej szkody.

scyntygrafia / PET – metody obrazowania w medycynie nuklearnej, pokazujące nie tylko budowę, lecz i pracę narządów.

skala INES – Międzynarodowa Skala Zdarzeń Jądrowych i Radiologicznych (poziomy 0–7), służąca do jednolitego informowania o wadze zdarzeń.

składowisko powierzchniowe – składowisko na powierzchni lub płytko pod ziemią, przeznaczone dla odpadów nisko- i średnioaktywnych, których promieniotwórczość zanika w skali dziesięcioleci-setek lat.

skraplacz – wymiennik ciepła, w którym para za turbiną oddaje resztkowe ciepło i skrapla się z powrotem do wody.

skutki deterministyczne – uszkodzenia pojawiające się dopiero powyżej progu dawki i tym cięższe, im dawka większa (np. choroba popromienna, zaćma); przy małych dawkach nie występują.

skutki stochastyczne – skutki losowe (głównie nowotwory), w których dawka zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia choroby, a nie jej ciężkość; bez udowodnionego progu.

SMR (mały reaktor modułowy) – reaktor o mniejszej mocy (zwykle do ok. 300 MWe), budowany z powtarzalnych modułów produkowanych fabrycznie.

sprawność – stosunek uzyskanej energii elektrycznej do energii cieplnej dostarczonej w reaktorze; w typowym bloku PWR wynosi zwykle około 32–37%.

stężenie promieniotwórcze – aktywność substancji promieniotwórczej przypadająca na jednostkę masy lub objętości; wyrażana np. w bekerelach na kilogram (Bq/kg) albo na metr sześcienny (Bq/m³).

stop cyrkonu – materiał koszulek paliwowych: metal wytrzymały, odporny na korozję w gorącej wodzie i niemal „przezroczysty” dla neutronów.

stopień rdzenia – przegrzanie i uszkodzenie paliwa w reaktorze wskutek utraty chłodzenia; w TMI zatrzymane wewnątrz obudowy.

strefa mieszania – obszar wokół miejsca zrzutu, w którym oddawana woda dopiero miesza się z wodami odbiornika i w którym jej parametry jeszcze odbiegają od parametrów otoczenia.

strefa wewnętrzna – obszar najbliższej elektrowni, gdzie działania ochronne planuje się z góry i można je uruchomić już na podstawie stanu reaktora (planowanie wyprzedzających działań interwencyjnych).

strefa wykluczenia – obszar objęty realnymi zakazami osiedlania się i użytkowania (np. po poważnej awarii) – coś zupełnie innego niż strefa planowania awaryjnego, w której życie toczy się normalnie.

strefa zewnętrzna – obszar dalej od elektrowni, gdzie działania ochronne uruchamia się na podstawie pomiarów promieniowania (planowanie natychmiastowych działań interwencyjnych).

strefy kluczowe dla bezpieczeństwa – najlepiej chronione miejsca w elektrowni (reaktor, sterownia, baseny wypalnego paliwa), do których dostęp ma najwęższe grono pracowników; w dokumentach Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej określane jako vital areas, a w polskich przepisach objęte reżimem strefy ścisłej ochrony.

system pasywny / aktywny – pasywny układ bezpieczeństwa działa dzięki naturalnym zjawiskom, takim jak grawitacja, naturalna cyrkulacja, różnica ciśnień lub konwekcja, bez długotrwałego zasilania pomp i bez obsługi; aktywny wymaga pomp, zasilania i sterowania.

szereg (łańcuch) promieniotwórczy – ciąg kolejnych rozpadów, w którym jeden promieniotwórczy pierwiastek przechodzi w drugi, aż do osiągnięcia trwałego jądra.

sześciofluorek uranu (UF₆) – związek uranu, który łatwo przechodzi w gaz; postać, w jakiej uran poddaje się wzbogacaniu.

ślad węglowy – łączna ilość gazów cieplarnianych przypisana do danego pro-

duktu lub działania, wyrażona w gramach CO₂ na jednostkę (tu: na kWh).

test wytrzymałościowy (stress test) – sprawdzenie, czy elektrownia przetrwa skrajne zdarzenia (trzęsienia, powodzie, utratę zasilania) – wprowadzony globalnie po Fukushimaie.

tło naturalne – stale obecne promieniowanie pochodzące ze źródeł naturalnych – radonu, skał, kosmosu i izotopów w organizmie.

tokamak – urządzenie w kształcie obwarzanka, do realizacji fuzji jądrowej, w którym pola magnetyczne utrzymują gorącą plazmę z dala od ścian.

tryt – promieniotwórczy izotop wodoru; jądro trytu składa się z protonu i dwóch neutronów, emitowane przez nie cząstki beta mają tak małą energię, że nie przenikają przez naskórek. Powstaje także naturalnie w atmosferze; główny składnik uwolnień ciekłych z elektrowni.

turbozespół – połączona turbina i generator – w wirującym generatorze energia ruchu pary zamienia się w prąd.

układ otwarty chłodzenia (przepływowy) – chłodzenie polegające na pobraniu wody ze źródła, przepuszczeniu przez skraplacz i oddaniu jej z powrotem, cieplejszej.

układ zamknięty chłodzenia (chłodnie kominowe) – chłodzenie, w którym woda krąży w obiegu, a ciepło oddaje przez odparowanie w chłodni; mniejszy pobór, ale część wody wyparowuje.

ukrycie się (schronienie) – pozostanie w budynku z zamkniętymi oknami i wyłączoną wentylacją; jedno z najskuteczniejszych i najprostszych działań ochronnych.

uran wysoko wzbogacony (HEU) – uran o zawartości U-235 powyżej 20%

(a w broni zwykle ponad 90%); paliwo energetyczne go nie osiąga.

uran-235 – odmiana (izotop) uranu, której jądra łatwo ulegają rozszczepieniu; liczba 235 to łączna liczba protonów i neutronów w jądrze.

urządzenia zawierające niebezpieczne siły – kategoria obiektów (zapory, groble, elektrownie jądrowe) objętych szczególną ochroną prawa wojennego ze względu na skutki ich ewentualnego zniszczenia.

uwolnienia kontrolowane – śladowe, prawnie limitowane i mierzone ilości substancji uwalniane w sposób celowy i nadzorowany.

WANO – Światowe Stowarzyszenie Operatorów Jądrowych, założone w 1989 r. po Czarnobylu; prowadzi dobrowolne przeglądy branżowe.

wirówka gazowa – szybko wirujące urządzenie oddzielające cząsteczki z lżejszym U-235 od cięższych z U-238; podstawowe narzędzie wzbogacania.

współczynnik wykorzystania mocy – stosunek energii faktycznie wyprodukowanej do energii możliwej do wytworzenia przy nieprzerwanej pracy z mocą znamionową. W dobrze zarządzanych flotach jądrowych często osiąga wartości około 90%, ale różni się między blokami i latami.

wyłączenie awaryjne (SCRAM) – szybkie wprowadzenie do rdzenia prętów pochłaniających neutrony, które przerywa samopodtrzymującą się reakcję łańcuchową. Po wyłączeniu jest nadal generowane ciepło powyłączeniowe, wymagające odbioru.

wypalone paliwo – paliwo wyjęte z reaktora po zakończeniu pracy; główny składnik odpadów wysokoaktywnych.

wytwornica pary – urządzenie, w którym gorąca woda obiegu pierwotnego poprzez ścianki rurek oddaje ciepło wodzie obiegu wtórnego, zamieniając ją w parę; wody obu obiegu nigdy się nie mieszają.

wzbogacenie – zwiększenie udziału rozszczepialnego uranu-235; paliwo ~3-5%, broń >90%.

zagrożenie projektowe (Design Basis Threat) – z góry zdefiniowany, realistyczny scenariusz napaści, wobec którego projektuje się i sprawdza system ochrony obiektu.

zarządzanie starzeniem – systematyczne rozpoznawanie mechanizmów degradacji, monitorowanie stanu elementów, konserwacja, naprawy i wymiany, tak aby wymagane funkcje bezpieczeństwa były zachowane przez cały okres eksploatacji.

zasada ALARA – reguła utrzymywania ryzyka i dawek promieniowania na poziomie „tak niskim, jak rozsądnie osiągalny” (ang. As Low As Reasonably Achievable).

zbiornik ciśnieniowy reaktora – grubościenny stalowy zbiornik zamykający rdzeń reaktora PWR lub BWR i utrzymujący wysokie ciśnienie; jeden z nielicznych elementów praktycznie niewymienialnych.

zdarzenie projektowe (podstawa projektowa) – najostrzejsze zagrożenie

przyjęte do projektowania obiektu – dobrane z dużym zapasem ponad zdarzenia historyczne.

zdarzenie radiacyjne – sytuacja wymagająca podjęcia działań ze względu na możliwe zagrożenie promieniowaniem.

zestawienie – zatopienie odpadów w trwałym materiale (cemencie, bitumie), które unieruchamia substancje promieniotwórcze i uniemożliwia ich wypłukanie.

zestaw krytyczny (reaktor mocy zerowej) – reaktor badawczy pracujący na znikomej mocy i w temperaturze bliskiej pokojowej, służący wyłącznie do badań fizyki reaktorowej; zestaw podkrytyczny nie osiąga samodzielnie stanu krytycznego nawet z zewnętrznym źródłem neutronów.

zezwolenie dozoru jądrowego – zgoda organu nadzoru (w Polsce Prezesa PAA) wydawana po ocenie bezpieczeństwa – osobno na budowę i na eksploatację.

ZUOP – Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych – państwowy podmiot zajmujący się w Polsce odbiorem, przetwarzaniem i składowaniem odpadów.

żółte ciasto (yellowcake) – żółtawy koncentrat tlenków uranu (U_3O_8) – pierwszy produkt przerobu rudy, od którego zaczyna się droga paliwa.

Indeks

- Agencja Energii Jądrowej OECD, 88
Akademik Łomonosow, 187
aktywność mniejszościowe, 61
aktywność promieniotwórcza, 19, 23, 131
ALARA, 65, 119, 145
Alert RCB, 97
analiza cyklu życia, 139, 140
analiza hedoniczna, 165, 166
atom, 12–14, 16–18, 20, 21, 28, 29, 33, 38, 42, 45, 65, 66, 116, 140, 141, 144, 150, 151, 159, 162, 165, 166, 178, 180–182, 189
Australia, 56
awaria ciężka, 64
awaria projektowa, 45, 64
awaryjne chłodzenie rdzenia, 64
azot-16, 34, 38

badania przesiewowe, 174
badanie epidemiologiczne, 109, 113
Bałtyk, 144
bariery bezpieczeństwa, 43
basen przyreaktorowy, 126, 127
bekerel, 19, 21–24, 175
białaczką, 114, 116, 171
blackout, 69
blokada tarczycy, 100, 101
brachyterapia, 27

cena wykonania, 160, 161
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, 31
Centrum do Spraw Zdarzeń Radiacyjnych, 95
cez-137, 18

chłodnia kominowa, 34, 35, 141–143, 151, 167
Choczewo, 154
choroba popromienna, 104, 171
ciepło powyłączeniowe, 41, 42, 67, 68, 82, 126
ciężka woda, 37, 38
Crane Clean Energy Center, 178
cyberbezpieczeństwo, 80
cykl otwarty, 60, 61, 131
cykl zamknięty, 60, 61
cyrkulacja naturalna, 46, 68
Czarnobyl, 30, 31, 42, 43, 84, 86–88, 170–172, 176, 179–182
czas połowicznego rozpadu, 18, 19, 38
częstość uszkodzenia rdzenia, 73

Darlington, 187
datowanie radiowęglowe, 27
dawka
 pochłonięta, 22
 równoważna, 23
 skuteczna, 23
decyzja środowiskowa, 148, 157
decyzja zasadnicza, 154, 155
deficyt masy, 13
dekontaminacja, 98
demontaż, 167, 172
deuter, 38, 189, 190
dezinformacja, 182, 183
dioda danych, 80
DNA, 104
doświadczenie eksploatacyjne, 72
dozór jądrowy, 29, 31, 39, 74, 83, 92, 93, 95, 97, 107, 118, 155

dozometr, 23, 118, 120
 dyfuzor, 144
 dystans planowania, 92
 działania ochronne, 92, 93, 96, 97
 efekt Dopplera, 42
 elektron, 12, 20
 elektronowolt, 14
 elektrownia jądrowa, 14, 25, 28, 30, 31, 33–35, 45, 48, 50, 57, 58, 63, 71, 72, 76, 78–83, 85, 89, 91, 105–108, 112, 113, 115, 116, 122, 127, 132, 137, 139–141, 143–145, 147, 149, 151, 153, 157, 159–161, 163, 164, 168, 175, 193
 elektrownia węglowa, 33, 34, 123, 144, 145, 147, 151
 energia jądrowa, 12, 13, 16, 134, 139, 140, 180, 181, 184
 epidemiologia, 115
 Eurajoki, 163
 Euratom, 59, 134
 Europejska Komisja Gospodarcza ONZ, UNECE, 139, 140
 ewakuacja, 65, 91–93, 96–99, 101, 174, 175, 182
 fabrykacja paliwa, 55
 fale upałów, 150
 Finlandia, 38, 48, 107, 129, 130, 165
 Forsmark, 129
 fragment rozszczepienia, 13, 14, 16, 42, 59, 60, 66, 67, 126, 128
 Francja, 61, 110, 115, 116, 120, 150, 151, 161
 Fukushima, 68, 70, 71, 88, 99, 165, 166, 173–175, 180–182, 188
 fundusz likwidacyjny, 132
 gaz szlachetny, 20, 24, 145
 generacje reaktorów
 I, 45
 II, 45, 173
 III, 45–47, 188
 III+, 45, 46, 69, 72, 73
 IV, 45, 47, 61, 189
 generator, 21, 33–35, 39, 70
 generator awaryjny, 68–70
 gęstość energii, 14, 56, 159
 glina bentonitowa, 128
 grej, 21–23
 Guarapari, 25, 112
 hel, 20, 189, 190
 Hinkley Point C, 162
 Hiroszima, 105, 106
 instalacja demonstracyjna, 189
 inwentaryzacja przyrodnicza, 154
 izolacja sejsmiczna, 70
 izotop, 12, 17–19, 24, 26, 29, 38, 54, 55, 58, 125, 131, 136, 145, 175
 jod stabilny, 100, 102
 jod-131, 18, 19, 100
 jonizacja, 20
 kalandria, 38
 Kanada, 56
 kanał ciśnieniowy, 37, 38
 kaseta paliwowa, 36, 55
 Kazachstan, 56
 Kerala, 25, 112
 Komisja Europejska, 161
 konflikt zbrojny, 81
 konsultacje transgraniczne, 157
 kontrakt różnicowy, 160, 161
 kontrola żywności, 91, 98
 Konwencja bezpieczeństwa jądrowego, 85
 konwencja z Espoo, 157
 konwencje genewskie, 81
 konwersja, 55
 koszt kapitałowy, 159, 160
 koszulka paliwowa, 66
 Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, 29, 125

kruchość radiacyjna, 51
 krypton, 145
 ksenon, 16, 145
 kultura bezpieczeństwa, 31, 86, 87, 171
 kwas borowy, 41
 Lubiatowo-Kopalino, 31, 144, 147, 154, 155
 ługowanie in situ, 54
 Maine Yankee, 168
 margines bezpieczeństwa, 71, 112, 135
 materiały jądrowe, 59
 mediana, 139, 140
 medycyna nuklearna, 26, 28, 29
 mierniki izotopowe, 27
 Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, 36, 59, 63, 80–83, 86–88, 137, 171, 174, 175, 183
 międzynarodowe prawo humanitarne, 81
 moc dawki, 117
 model liniowy bezprogowy, 109, 110
 moderator, 17, 38, 170
 molibden-99, 29
 monitoring biologiczny, 143
 monitoring radiacyjny, 23, 29, 117
 mutacja, 104
 Nagasaki, 105, 106
 Namibia, 56
 Narodowe Centrum Badań Jądrowych, 31, 189
 National Ignition Facility (NIF), 190
 neutron, 12–18, 21, 22, 38, 40–44, 51, 59, 170, 171, 192
 Nowa Bezpieczna Powłoka, 172
 nowotwór, 105
 NPT, 59
 NuScale, 188
 obieg pierwotny, 34, 35, 41, 66, 177
 obieg wtórny, 34, 35, 38
 obrona w głąb, 63–65, 74, 177
 obudowa bezpieczeństwa, 51, 64, 66, 70, 71, 74, 78, 82, 85, 171, 173, 176, 177
 ocena oddziaływania na środowisko, 147, 154, 156, 157
 ochrona fizyczna, 76, 78, 158
 ochrona radiologiczna, 28, 106, 111, 112, 115, 120, 145, 168
 oddziaływanie silne, 12
 odpady promieniotwórcze, 122, 123, 125, 136
 ograniczenie mocy, 143, 149
 Oklo, 128
 okresowy przegląd bezpieczeństwa, 51
 Olkiluoto, 48, 108, 129, 134, 163
 Olkiluoto 3, 160
 Onkalo, 129, 130, 137
 Operational Safety Review Team, OSART, 83
 Ośrodek Radioizotopów POLATOM, 27
 paliwa kopalne, 180, 181
 paliwo jądrowe, 54, 56, 57, 159
 paliwo MOX, 61
 Państwowa Agencja Atomistyki, 24, 25, 29, 31, 47, 83, 85, 93, 95, 97, 117, 133, 154, 155, 157, 183
 pastylka paliwowa, 13, 55, 65, 123
 percepcja ryzyka, 181, 183
 PET, 26
 plama ciepła, 143
 plan postępowania awaryjnego, 95
 plazma, 190, 191
 pluton, 58, 60, 61, 127
 pluton militarny, 58
 pluton-240, 58
 podatek od nieruchomości, 163, 164
 pojemnik typu B, 134
 postawa pytająca, 86
 postój paliwowy, 48

potas-40, 22, 24
 pozwolenie na budowę, 155
 Prawo atomowe, 95, 112, 132, 136, 157
 prawo do przerwania pracy, 87
 pręt sterujący, 36, 38, 40, 44, 172
 pręty bezpieczeństwa, 44, 80
 probabilistyczna analiza bezpieczeństwa, 72
 produkty aktywacji, 34
 produkty rozszczepienia, 41, 42, 55, 61, 130
 promieniotwórczość, 17, 18, 123, 125, 127, 130, 131, 184
 promieniowanie
 alfa, 20
 beta, 20
 Czerenkowa, 29
 gamma, 17, 20, 21, 23, 24, 117
 jonizujące, 21, 25, 27, 97, 99, 104, 112, 116, 118, 119
 kosmiczne, 24, 25, 106, 108
 neutronowe, 21
 rentgenowskie, 26
 promieniowrażliwość, 111
 proton, 12, 13, 17, 18
 próbki-świadki, 51
 przechowalnik wypalonego paliwa, 127
 przerób paliwa, 128
 przerwa powietrzna, 80
 radiacyjne utrwalanie żywności, 27
 Radiation Effects Research Foundation, RERF, 105, 106
 radiofarmaceutyk, 27
 radiofobia, 182
 radiografia przemysłowa, 27
 radioizotop, 29
 radon, 18, 20, 24, 25
 radon-222, 18, 19
 Ramsar, 25, 112
 raport lokalizacyjny, 154
 reakcja chemiczna, 12, 18
 reakcja łańcuchowa, 14-17, 42, 67, 179, 190
 reaktor
 ABWR, 45-47
 AP1000, 46, 47, 72-74
 APR1400, 46
 badawczy, 28, 29
 BWR, 36-39, 41
 CANDU, 36-39, 46, 47, 54, 192
 EC6, 46, 47
 EPR, 46, 47
 ESBWR, 46, 47
 EWA, 28, 29, 167
 HTGR-POLA, 189
 HTR-PM, 187
 mikroreaktor, 186
 mocy zerowej, 28
 na stopione sole, 189
 PWR, 33, 35-43, 46-48, 171
 RBMK, 42, 170, 172
 SMR, 186-188
 sodowy, 188
 wodny, 36, 38, 45-47
 WWER-440, 30, 31
 wysokotemperaturowy, 47, 189
 reaktywność, 40, 41
 redundancja, 45, 65
 rozpad promieniotwórczy, 17, 19, 60, 66, 126
 rozszczepienie, 12-17, 33, 36, 39-42, 58, 65, 139, 170, 178, 189, 190, 193
 Różan, 29, 125
 różnorodność, 65, 80
 samoregulacja, 40-42, 171, 179
 sarkofag, 172
 scyntygrafia, 26
 separacja, 65
 separacja sieci, 79
 Shippingport, 38

siwert, 21, 23, 24
 mikrosiwert, 23, 107, 108
 milisiwert, 23, 25, 106
 skała macierzysta, 128
 skraplacz, 35, 141, 143, 144, 149
 skutki deterministyczne, 104
 skutki stochastyczne, 105
 sprawność, 35, 149
 sprzężenie zwrotne
 dodatnie, 43
 ujemne, 42
 stan krytyczny, 17
 stan nadkrytyczny, 17
 stan podkrytyczny, 17
 stan zerowy, 147-149
 sterownia, 47, 48, 77, 177, 178
 sterylizacja radiacyjna, 27
 stop cyrkonu, 66
 stopienie rdzenia, 176
 strefa chroniona, 77
 strefa mieszania, 141
 strefa planowania awaryjnego, 91,
 93-95
 strefa wewnętrzna, 77, 92, 94, 97
 strefa wykluczenia, 93
 strefa zewnętrzna, 92, 94
 strefy dostępu, 77
 strefy kluczowe dla bezpieczeństwa, 76,
 77
 stront-90, 130
 substancje promieniotwórcze, 64-66,
 73, 74, 81, 124, 128, 170
 symulator, 47, 48
 system pasywny / aktywny, 46, 67, 68,
 82, 173, 174, 188
 sześćiofluorek uranu, 55
 Świerk, 27-29, 167
 świeże paliwo, 55, 127
 tarczycza, 100, 101, 171, 174
 technet-99m, 26, 29
 technika sterylnych owadów, 27
 teoria mieszania populacji, 116
 test wytrzymałościowy, 71, 173
 The Committee on Medical Aspects
 of Radiation in the Environment,
 COMARE, 113
 tło naturalne, 25, 145
 tokamak, 191, 192
 tryt, 34, 145, 175, 189, 190, 192
 trzęsienie ziemi, 69, 82, 88, 174
 tsunami, 68-70, 173-175
 turbina, 33, 35, 38, 39, 149
 turbozespół, 35, 36
 Turkey Point, 52, 151
 uderzenie samolotu, 46, 66, 69, 82
 ukrycie się, 97
 UNSCEAR, 99, 106, 171, 174, 181, 183
 uprawnienia do emisji CO₂, 162
 uran, 12, 16-20, 24, 33, 54-61, 80, 123,
 127, 128, 131, 139, 141, 145, 147, 159,
 160, 178, 189
 -235, 12-14, 17, 41, 42, 54, 58, 178
 -238, 19, 41, 42, 54, 178
 uran naturalny, 38, 39, 54, 58
 uran wysoko wzbogacony, 58
 Uzbekistan, 56
 WANO, 84
 węgiel-12, 17
 węgiel-14, 17, 18
 WHO, 180, 183
 wiązka paliwowa, 38
 wirówka gazowa, 55
 wojewoda, 92, 93, 95-97, 155
 współczynnik wykorzystania mocy, 49
 wstępny raport bezpieczeństwa, 155
 wybuch pary, 170, 179
 wybuch wodoru, 173, 174
 wyłączenie awaryjne, 44

wypalone paliwo, 16, 55, 57, 59–61, 123, 125, 127–129, 131, 135, 136
 wytwornica pary, 31, 34, 35, 37–39, 51, 176
 wzbogacanie, 39, 54, 55, 58, 80, 139, 141, 178, 179
 zabezpieczenia (safeguards), 59
 zagrożenia zewnętrzne, 46, 70, 127
 zagrożenie projektowe, 77
 zanieczyszczenie powietrza, 180, 181
 zaporą Banqiao, 182
 Zaporoska Elektrownia Jądrowa, 83
 zarządzanie starzeniem, 51
 zasada dwóch osób, 77
 zbiornik ciśnieniowy reaktora, 51
 zbiornik reaktora, 31, 34, 38, 48, 51, 66, 177
 zestalanie, 124
 zestaw krytyczny, 28, 29
 AGATA, 28, 29
 ANNA, 28, 29
 MARYLA, 28, 29
 P-ANNA, 28
 zestaw podkrytyczny, 28
 HELENA, 28
 zezwolenie dozoru jądrowego, 155
 zezwolenie na eksploatację, 129, 155
 znaczniki promieniotwórcze, 27
 ZUOP, 125
 Żarnowiec, 30, 31
 żółte ciasto, 54

Lista źródeł

- Ackermann, G. (red.). (1987). *Eksplotacja elektrowni jądrowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information. (b.d.). *Les commissions locales d'information*.
- Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection. (b.d.). *Information and participation of the public*.
- Canadian Nuclear Safety Commission. (b.d.). *CANDU reactors*.
- Celiński, Z., & Strupczewski, A. (1984). *Podstawy energetyki jądrowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Constellation Energy. (2024, 20 września). *Constellation to launch Crane Clean Energy Center, restoring jobs and carbon-free power to the grid*.
- Dyrektywa Rady 2011/70/Euratom z dnia 19 lipca 2011 r. ustanawiająca ramy wspólnotowe w zakresie odpowiedzialnego i bezpiecznego gospodarowania wypalonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi. (2011). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 199, 48–56.
- Electric Power Research Institute. (2007). *Advanced nuclear technology: Advanced light water reactor utility requirements document* (Revision 10).
- Électricité de France. (2026). *Production losses due to high river temperatures and low water levels: Information on the French nuclear fleet*.
- EUROfusion. (2018). *European research roadmap to the realisation of fusion energy*.
- European Bank for Reconstruction and Development. (b.d.). *Chernobyl: New Safe Confinement*.
- European Nuclear Safety Regulators Group. (2012). *Peer review report: Stress tests performed on European nuclear power plants*.
- Fundacja FORUM ATOMOWE. (b.d.). *Nukleo.pl – portal wiedzy o energii jądrowej*.
- Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska. (2023). *Decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach dla budowy i eksploatacji pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce*.
- Generation IV International Forum. (b.d.). *Generation IV systems*.
- International Atomic Energy Agency. (1988). *The radiological accident in Goiânia*.
- International Atomic Energy Agency. (1991). *Safety culture* (Safety Series No. 75-INSAG-4).
- International Atomic Energy Agency. (1992). *The Chernobyl accident: Updating of INSAG-1* (Safety Series No. 75-INSAG-7).

- International Atomic Energy Agency. (1996). *Defence in depth in nuclear safety* (INSAG Series No. 10).
- International Atomic Energy Agency. (2011a). *Computer security at nuclear facilities* (IAEA Nuclear Security Series No. 17).
- International Atomic Energy Agency. (2011b). *Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities* (INFCIRC/225/Revision 5) (IAEA Nuclear Security Series No. 13).
- International Atomic Energy Agency. (2013). *INES: The international nuclear and radiological event scale user's manual, 2008 edition*.
- International Atomic Energy Agency. (2015a). *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency* (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7).
- International Atomic Energy Agency. (2015b). *The Fukushima Daiichi accident: Report by the Director General*.
- International Atomic Energy Agency. (2016). *Nuclear power plant outage optimization strategy* (IAEA-TECDOC-1806).
- International Atomic Energy Agency. (2019). *Site evaluation for nuclear installations* (IAEA Safety Standards Series No. SSR-1).
- International Atomic Energy Agency. (2020). *Reload design and core management in operating nuclear power plants: Experiences and lessons learned* (IAEA-TECDOC-1898).
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Regulations for the safe transport of radioactive material: 2018 edition* (Rev. 1) (IAEA Safety Standards Series No. SSR-6).
- International Atomic Energy Agency. (2022). *Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations* (Specific Safety Guide No. SSG-9, Rev. 1).
- International Atomic Energy Agency. (2024). *Advances in small modular reactor technology developments: A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-a). *Advanced Reactors Information System (ARIS)*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-b). *Live chart of nuclides*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-c). *Operational Safety Review Team (OSART)*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-d). *Integrated Regulatory Review Service (IRRS)*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-e). *Power Reactor Information System (PRIS)*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-f). *The nuclear fuel cycle*.
- International Atomic Energy Agency. (b.d.-g). *Seven indispensable pillars for ensuring nuclear safety and security during an armed conflict*.
- Klementowski, R. (2010). *W cieniu sudeckiego uranu: Kopalnictwo uranu w Polsce w latach 1948–1973*. Instytut Pamięci Narodowej.

- Komisja Europejska. (2025, 9 grudnia). *State aid: Commission approves support for Poland's first nuclear power plant.*
- Konwencja bezpieczeństwa jądrowego, sporządzona w Wiedniu dnia 20 września 1994 r. (1997). *Dziennik Ustaw*, nr 42, poz. 262.
- Konwencja o ocenach oddziaływania na środowisko w kontekście transgranicznym, sporządzona w Espoo dnia 25 lutego 1991 r. (1999). *Dziennik Ustaw*, nr 96, poz. 1110.
- Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych wraz z poprawką przyjętą 8 lipca 2005 r. (1989/2017). *Dziennik Ustaw*.
- Krajowy plan postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym. (2020). Załącznik do uchwały nr 154 Rady Ministrów z dnia 21 października 2020 r. *Monitor Polski*, poz. 1070.
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych. (2024, 5 grudnia). *Opis techniczny badawczego reaktora wysokotemperaturowego HTGR-POLA ukończony.*
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych. (b.d.). *Reaktor badawczy MARIA.*
- National Council on Radiation Protection and Measurements. (2018). *Implications of recent epidemiologic studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection* (NCRP Commentary No. 27).
- Nauman, J., & Wolff, J. (1993). Iodide prophylaxis in Poland after the Chernobyl reactor accident: Benefits and risks. *The American Journal of Medicine*, 94(5), 524–532.
- Nuclear Energy Institute. (b.d.). *Nuclear fuel.*
- Nuclear Waste Fund. (b.d.). *The Swedish Nuclear Waste Fund.*
- Ontario Power Generation. (b.d.). *Darlington new nuclear project.*
- Orano. (b.d.). *La Hague site: Recycling used nuclear fuel.*
- Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, & International Atomic Energy Agency. (2024). *Uranium 2024: Resources, production and demand.* OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, & International Energy Agency. (2020). *Projected costs of generating electricity 2020.* OECD Publishing.
- Orlen Synthos Green Energy. (b.d.). *BWRX-300 w Polsce.*
- Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Soda, M., Grant, E. J., Sakata, R., Sugiyama, H., & Kodama, K. (2012). Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: An overview of cancer and noncancer diseases. *Radiation Research*, 177(3), 229–243.
- Państwowa Agencja Atomistyki. (2025). *Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2024 roku.*
- Państwowa Agencja Atomistyki. (b.d.). *Nadawanie uprawnień.*

- Polskie Elektrownie Jądrowe. (2022). *Raport o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia polegającego na budowie i eksploatacji pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce*.
- Radiation Effects Research Foundation. (b.d.). *Life Span Study*.
- Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., Gillies, M., O'Hagan, J. A., Hamra, G. B., Haylock, R., Laurier, D., Leuraud, K., Moissonnier, M., Schubauer-Berigan, M. K., Thierry-Chef, I., & Kesminiene, A. (2023). Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): Cohort study. *BMJ*, 382, e074520.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2013 r. w sprawie systemów wykrywania skażeń i powiadamiania o ich wystąpieniu oraz właściwości organów w tych sprawach. (2013). *Dziennik Ustaw*, poz. 96.
- Sandia National Laboratories. (b.d.). *Nuclear transportation package tests and aircraft impact testing*.
- Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236(4799), 280–285.
- Strupczewski, A. (2010). *Nie bójmy się energetyki jądrowej!* Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej.
- Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. (b.d.). *The final repository for short-lived radioactive waste—SFR*.
- Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. (1968). *United Nations Treaty Series*, 729, 161.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2012). *Biological mechanisms of radiation actions at low doses: A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work*. United Nations.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2017). *Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly, with scientific annexes*. United Nations.
- United States Department of Energy. (1993). *DOE fundamentals handbook: Nuclear physics and reactor theory* (DOE-HDBK-1019/1-93 i DOE-HDBK-1019/2-93).
- United States Department of Energy. (b.d.). *Waste Isolation Pilot Plant*.
- United States Department of Energy, Office of Nuclear Energy. (2020, 30 marca). *5 fast facts about spent nuclear fuel*.
- United States Energy Information Administration. (2026). *Nuclear explained: U.S. nuclear industry*.
- United States Nuclear Regulatory Commission. (b.d.-a). *Backgrounder on reactor license renewal*.
- United States Nuclear Regulatory Commission. (b.d.-b). *Boiling water reactors*.
- United States Nuclear Regulatory Commission. (b.d.-c). *Emergency preparedness in response to nuclear power plant incidents*.
- United States Nuclear Regulatory Commission. (b.d.-d). *Reactor concepts manual: Pressurized water reactor systems and boiling water reactor systems*.

United States Nuclear Regulatory Commission. (b.d.-e). *Status of subsequent license renewal applications*.

Ustawa z dnia 29 czerwca 2011 r. o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądowej oraz inwestycji towarzyszących. (2011). *Dziennik Ustaw*, nr 135, poz. 789 z późn. zm.

World Association of Nuclear Operators. (b.d.). *Performance and peer reviews*.

World Health Organization. (2017). *Iodine thyroid blocking: Guidelines for use in planning for and responding to radiological and nuclear emergencies*.

World Nuclear Association. (b.d.). *Information Library*.

Wspólna konwencja bezpieczeństwa w postępowaniu z wypalonym paliwem jądrowym i bezpieczeństwa w postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi, sporządzona w Wiedniu dnia 5 września 1997 r. (2002). *Dziennik Ustaw*, nr 202, poz. 1704.

Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych. (b.d.). *Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie*.

Źródła ilustracji i zdjęć

Opracowanie własne: s. 12 rys. 1.1 · s. 13 rys. 1.2 · s. 14 rys. 1.3 · s. 15 rys. 1.4 · s. 18 rys. 1.5 · s. 19 rys. 1.6 · s. 19 rys. 1.7 · s. 21 rys. 1.8 · s. 22 rys. 1.9 · s. 23 rys. 1.10 · s. 25 rys. 1.11 · s. 26 rys. 1.12 · s. 30 rys. 1.15 · s. 33 rys. 2.1 · s. 34 rys. 2.2 · s. 36 rys. 2.4 · s. 37 rys. 2.5 · s. 39 wstawka o zbiorniku reaktora · s. 40 rys. 2.6 · s. 41 rys. 2.7 · s. 43 rys. 2.8 · s. 44 wstawka o stosie Fermiego · s. 45 rys. 2.9 · s. 46 rys. 2.10 · s. 49 rys. 2.12 · s. 50 rys. 2.13 · s. 51 rys. 2.14 · s. 52 rys. 2.15 · s. 54 rys. 3.1 · s. 56 rys. 3.3 · s. 57 rys. 3.4 · s. 58 rys. 3.5 · s. 59 rys. 3.6 · s. 60 rys. 3.7 · s. 61 rys. 3.8 · s. 63 rys. 4.1 · s. 64 rys. 4.2 · s. 66 rys. 4.3 · s. 67 rys. 4.4 · s. 68 rys. 4.5 · s. 70 rys. 4.6 · s. 71 rys. 4.7 · s. 72 rys. 4.8 · s. 73 rys. 4.9 · s. 76 rys. 5.1 · s. 77 rys. 5.2 · s. 79 rys. 5.4 · s. 81 rys. 5.5 · s. 82 rys. 5.6 · s. 84 rys. 5.7 · s. 86 rys. 5.9 · s. 89 rys. 5.11 · s. 91 rys. 6.1 · s. 92 rys. 6.2 · s. 94 rys. 6.3 · s. 96 rys. 6.4 · s. 98 rys. 6.5 · s. 99 rys. 6.6 · s. 100 rys. 6.7 · s. 102 rys. 6.8 · s. 104 rys. 7.1 · s. 105 rys. 7.2 · s. 107 rys. 7.3 · s. 110 rys. 7.4 · s. 111 rys. 7.5 · s. 114 rys. 7.6 · s. 117 rys. 7.7 · s. 122 rys. 8.1 · s. 124 rys. 8.2 · s. 126 rys. 8.4 · s. 129 rys. 8.7 · s. 131 rys. 8.9 · s. 133 rys. 8.10 · s. 135 rys. 8.12 · s. 136 rys. 8.13 · s. 139 rys. 9.1 · s. 142 rys. 9.2 · s. 146 rys. 9.4 · s. 149 rys. 9.6 · s. 150 rys. 9.7 · s. 153 rys. 10.1 · s. 155 rys. 10.2 · s. 156 rys. 10.3 · s. 160 rys. 10.4 · s. 161 rys. 10.5 · s. 163 rys. 10.6 · s. 164 rys. 10.7 · s. 167 rys. 10.8 · s. 170 rys. 11.1 · s. 173 rys. 11.3 · s. 176 rys. 11.4 · s. 179 rys. 11.5 · s. 181 rys. 11.6 · s. 183 rys. 11.7 · s. 183 rys. 11.8 · s. 186 rys. 12.1 · s. 187 rys. 12.2 · s. 188 rys. 12.3 · s. 190 rys. 12.4 · s. 191 rys. 12.5 · s. 192 rys. 12.6

Melvin A. Miller / U.S. Department of Energy, Chicago Pile-1, 1946; domena publiczna; za Wikimedia Commons: s. 16 Chicago Pile-1

Henri Manuel, Maria Skłodowska-Curie, ok. 1920; domena publiczna; za Wikimedia Commons; kadr i retusz własny: s. 18 portret Marii Skłodowskiej-Curie

Any Lane / Pexels, zdjęcie 5945848; usunięcie tła i kadrowanie własne: s. 24 banan — ilustracja w ciekawostce

Wikimedia Commons: s. 27 symbol Radura

Adobe Stock: s. 28 rys. 1.13 · s. 35 rys. 2.3 · s. 55 rys. 3.2 · s. 120 rys. 7.9 · s. 143 rys. 9.3 · s. 172 rys. 11.2

© **Narodowe Centrum Badań Jądrowych:** s. 29 rys. 1.14

Mzywiał, Elektrownia Jądrowa Żarnowiec, 2020, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons; kadr własny: s. 31 wstawka o Żarnowcu

TV0/Hannu Huovila (lewa), TV0/Tapani Karjanlahti (prawa); montaż i kadrowanie własne: s. 48 rys. 2.11

Tom Ja, Kopalnia Podgórze w Kowarach, 2019, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons; kadr własny: s. 57 wstawka o kopalni uranu w Kowarach

Norman Carl Rasmussen, 1980, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons: s. 74 wstawka o raporcie Rasmussena

Wikimirati, Elektrownia jądrowa Barakah w budowie, 2017, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons; kadr własny: s. 78 rys. 5.3

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRCgov), Staffers Perform Inspection at the St. Lucie Nuclear Power Plant, Flickr, CC BY 2.0: s. 85 rys. 5.8

TV0, pobieranie próbek chemicznych, 7.12.2018: s. 87 rys. 5.10

Ministerstwo Klimatu i Środowiska: s. 119 rys. 7.8

Pixabay / Pexels, zdjęcie 46801; kadr własny: s. 123 wstawka o popiele z elektrowni węglowej

Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych / gov.pl, Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie, CC BY-NC-ND 4.0: s. 125 rys. 8.3

U.S. Nuclear Regulatory Commission, basen wypalonego paliwa w San Onofre, 2014, CC BY 2.0, za Wikimedia Commons; kadr własny: s. 127 rys. 8.5

U.S. Nuclear Regulatory Commission, Nicole Fields przy suchym pojemniku w Big Rock Point, 2018, CC BY 2.0, za Wikimedia Commons; kadr własny: s. 127 rys. 8.6

Posiva, obiekt składowania i tunel demonstracyjny Onkalo; montaż i kadrowanie własne: s. 130 rys. 8.8

Posiva, testowy pojemnik transferowy podczas próby procesu składowania, Olkiluoto, 2.09.2024: s. 134 rys. 8.11

Opracowanie własne na podstawie: K.M. Trauth, S.C. Hora, R.V. Guzowski, „Expert Judgment on Markers...”, Sandia National Laboratories, SAND92-1382, 1993, DOI 10.2172/10117359: s. 137 wstawka o ostrzeganiu przyszłych pokoleń

Hilary Snook / U.S. Environmental Protection Agency, pobór próbek wody na jeziorze w Nowej Anglii: s. 148 rys. 9.5

U.S. Geological Survey, EROS Center, Landsat 8, Turkey Point, 22.10.2016, path/row 15/42; domena publiczna: s. 151 wstawka o krokodylach z Turkey Point

USDA Farm Service Agency, National Agriculture Imagery Program, zobrazowanie z 6.10.2021; dystrybucja USGS EarthExplorer; domena publiczna; kadr własny: s. 168 rys. 10.9

Reklama Tho-Radia: „Cinémagazine”, 14.02.1935, Gallica/BnF, CC BY-SA 4.0; pudełko pudru: Rama, 2006, Musée Curie, CC BY-SA 2.0 France; za Wikimedia Commons; montaż i kadrowanie własne: s. 184 wstawka o kosmetykach Tho-Radia

© ITER Organization, widok budowy ITER w Cadarache, wrzesień 2017; wykorzystanie edukacyjne: s. 193 wstawka o projekcie ITER



**POLSKIE
ELEKTROWNIE
JĄDROWE**

Więcej informacji:
www.pej.pl

Polskie Elektrownie Jądrowe sp. z o.o. to spółka odpowiadająca m.in. za przygotowanie procesu inwestycyjnego i pełnienie roli inwestora w projekcie budowy elektrowni jądrowych o łącznej mocy zainstalowanej od ok. 6 do ok. 9 GWe w oparciu o bezpieczne, sprawdzone, wielkoskalowe, wodne ciśnieniowe reaktory jądrowe generacji III(+) oraz ich ewentualną przyszłą eksploatację.

Spółka wspiera też administrację rządową w działaniach na rzecz realizacji Programu polskiej energetyki jądrowej oraz wykonaniu umowy między rządem RP, a rządem USA ws. współpracy w celu rozwoju programu energetyki jądrowej wykorzystywanej do celów cywilnych oraz cywilnego przemysłu jądrowego w RP.



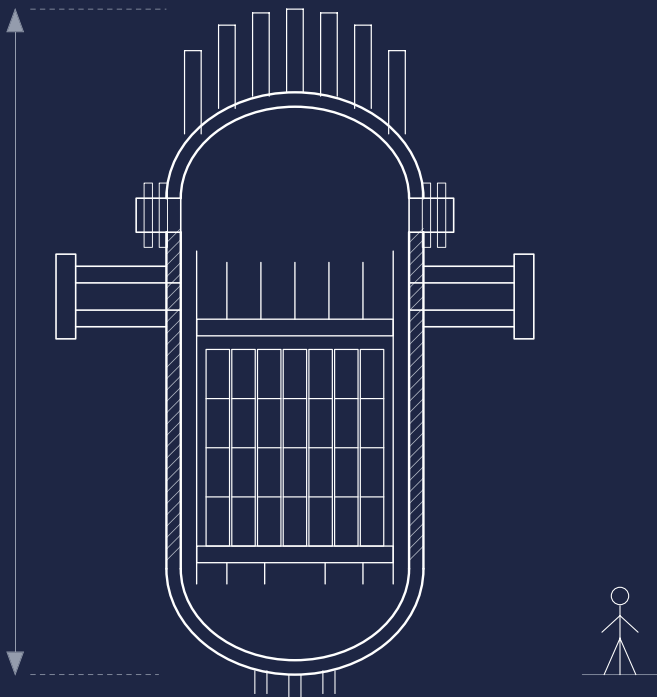
Więcej informacji:
www.forumatomowe.org

Fundacja FORUM ATOMOWE powstała z myślą o szeroko pojętej działalności informacyjnej i edukacyjnej w dziedzinie pokojowego wykorzystania energii jądrowej, promocji fizyki i nauk pokrewnych, a także idei rozwoju energetyki jądrowej w Polsce.

Fundację FORUM ATOMOWE stanowi zespół aktywnych i ambitnych osób, specjalistów w swoich dziedzinach, m.in. w fizyce jądrowej, ochronie radiologicznej, energetyce.

Fundacja realizuje kilka ciekawych i wartościowych projektów: „Atomowy Autobus - Mobilne Laboratorium”, „Spotkania z Energią Atomową”, „Szkolna Radonowa Mapa Polski”, konkursy wiedzy dla uczniów szkół podstawowych i średnich, portal popularnonaukowy *energijadrowa.pl* oraz portal wiedzy o energii jądrowej *nukleo.pl*.

Zespół Fundacji trwa w przekonaniu, że tylko poprzez rzetelną, wszechstronną informację i edukację oraz bezpośredni udział społeczeństwa w debatach publicznych można uzyskać pełne poparcie dla budowy elektrowni jądrowej w Polsce oraz w innych krajach, które podejmują podobne wyzwanie.



**Energia jądrowa budzi pytania m.in.
o bezpieczeństwo, odpady, koszty
i sąsiedztwo. Odpowiadamy na nie
po kolei, rzetelnie i zrozumiale.**



**PÓLSKIE
ELEKTROWNIE
JĄDROWE**

**FUNDACJA
FORUM ATOMÓWE**

