

# ROZDZIAŁ XV. DAWKI WOKÓŁ ELEKTROWNI JĄDROWYCH <sup>1</sup>

## 15.1 Wstęp

Jak już wspominaliśmy, elektrownie jądrowe wytwarzają obecnie około 17% energii elektrycznej zużywanej na świecie, a liczba bloków z reaktorami energetycznymi przekroczyła 440 w 32 krajach świata. W najbliższym dwudziestoleciu zaplanowano wzrost mocy globalnej elektrowni jądrowych na świecie o 60%, z 320 GWe w chwili obecnej do 440 GWe w 2025 roku. Mimo to wkład elektrowni jądrowych w ogólny poziom promieniowania jest, jak mówiliśmy w rozdziale XIII, pomijalnie mały – 0,001 mSv/rok wobec średniej dawki ok. 3,3 mSv/rok otrzymywanych przez człowieka wskutek promieniowania tła naturalnego i zabiegów medycznych (por. Rozdz. XIII). Jak niewielki był i jest wkład elektrowni jądrowych do ogólnego bilansu dawki otrzymywanej z różnych źródeł przez człowieka został pokazany na rys. 13.6. Oczywiście rysunek ten pokazuje wartości uśrednione, a więc nie reprezentatywne dla danego otoczenia elektrowni jądrowej. W szczególności nie reprezentują one sytuacji otoczenia elektrowni jądrowej, w której wydarzyła się awaria, jak np. w Czarnobylu. Zauważmy, że to skądinąd bardzo dramatyczne wydarzenie nie wpłynęło w zasadniczy sposób na średnią dawkę przypadającą na człowieka. Niewątpliwie skutki awarii w Czarnobylu, chociaż była ona tylko jednym odosobnionym wypadkiem, bynajmniej nie reprezentatywnym dla energetyki jądrowej, rzucają cień wątpliwości na dobre wyniki wszystkich innych elektrowni, choć z uwagi na całkowicie odmienną konstrukcję nie mogą one spowodować podobnego skażenia otoczenia. Dziś, kiedy minęło dobrze ponad 20 lat od awarii, nawet lekko podwyższone dawki w okolicach Czarnobyla nie przeszkadzają rozwijaniu się bujnej roślinności i rozwojowi w okolicznych lasach nawet chronionych gatunków zwierząt i ptaków. Nic też nie stoi na przeszkodzie, aby w tej okolicy żyli ludzie. Przeciwnicy energetyki jądrowej podnoszą istotny skądinąd argument o odpadach promieniotwórczych, ignorując często przy tym kwestię odpadów produkowanych przez konwencjonalne elektrownie. Co gorsza, donoszą wciąż o zachorowaniach na białaczkę, rzekomo powodowanych przez instalacje jądrowe. Ostatnio takie doniesienie, mówiące o wzroście białaczek wśród małych dzieci żyjących w promieniu do kilku kilometrów od elektrowni jądrowej, przyszło z Niemiec. Podobne, wcześniejsze tego typu doniesienia z Francji, Anglii i USA były systematycznie dezawuowane, a zawarte w nich wnioski nie znajdowały pokrycia w rzetelnie prowadzonej analizie danych.

Wielokrotnie w tym wykładzie podnosiliśmy sprawę wielkiej ostrożności konstruktorów elektrowni i wielkiej dbałości o zapewnienie ludziom i środowisku najbezpieczniejszych warunków pracy i egzystencji. Poziom promieniowania wewnątrz budynków jest kontrolowany w sposób ciągły i w taki sam sposób są kontrolowane uwolnienia radioaktywne z elektrowni jądrowych i z zakładów przerobu wypalonego paliwa. Wyniki pomiarów podlegają kontroli urzędów dozoru jądrowego w krajach prowadzących eksploatację takich obiektów, a w skali globalnej są zbierane i publikowane przez Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR). UNSCEAR publikuje także inne dane dotyczące promieniowania, między innymi wielkości uwolnień substancji radioaktywnych z elektrowni opalanych paliwem organicznym – które, wbrew oczekiwaniom, porównywalne są z uwolnieniami z elektrowni jądrowych.

---

<sup>1</sup> Tekst wykładu w znaczącej mierze jest fragmentem publikacji A.Strupczewskiego, *Dawki promieniowania przy normalnej pracy elektrowni jądrowych*, Biuletyn miesięczny PSE, sierpień 2005, 9-21.

Systematyczne wysiłki, zmierzające do redukcji uwolnień substancji radioaktywnych z elektrowni jądrowych i utrzymania narażenia radiacyjnego na możliwie najniższym poziomie w rozsądnych granicach (*As Low As Reasonably Achievable - ALARA*), doprowadziły do znaczących sukcesów<sup>2</sup>. Nikt ani z personelu, ani z ludności wokoło elektrowni nie otrzymał dawek, które spowodowałyby utratę zdrowia lub życia, nikt - poza 28 ofiarami promieniowania jonizującego powstałego w wyniku awarii reaktora w Czarnobylu, o którym już wiemy, że nie jest typowy dla reaktorów energetycznych. Do sprawy tej i innych awarii jeszcze będziemy wracać.

Energetyka jądrowa z natury rzeczy nie wydziela gazów powodujących efekt cieplarniany, ani - w przeciwieństwie do energetyki konwencjonalnej - nie powoduje zanieczyszczeń atmosfery związkami siarki, azotu i pyłami. Dzięki temu zaś, że od pierwszych lat jej rozwoju przywiązywano ogromną wagę do redukcji emisji substancji radioaktywnych i narażenia radiacyjnego personelu, dzisiejsze zagrożenia społeczeństwa i personelu ze strony energetyki jądrowej są tak niewielkie, że mogą być wzorem dla innych gałęzi przemysłu.

## 15.2 Narażenie radiacyjne pracowników elektrowni

Ludźmi najbardziej narażonymi na promieniowanie z elektrowni jądrowej są jej pracownicy. Dlatego jednym z podstawowych zadań kierownictwa elektrowni jest dbałość o zminimalizowanie dawek, jakie pracownicy otrzymują w czasie normalnej pracy i remontów urządzeń. Dotyczy to nie tylko pracowników najbardziej narażonych na promieniowanie. Celem działań jest zmniejszenie *dawki kolektywnej*<sup>3</sup>, czyli sumy wszystkich dawek otrzymywanych przez wszystkich pracowników elektrowni i personel czasowo zatrudniony przy pracach naprawczych<sup>4</sup>.

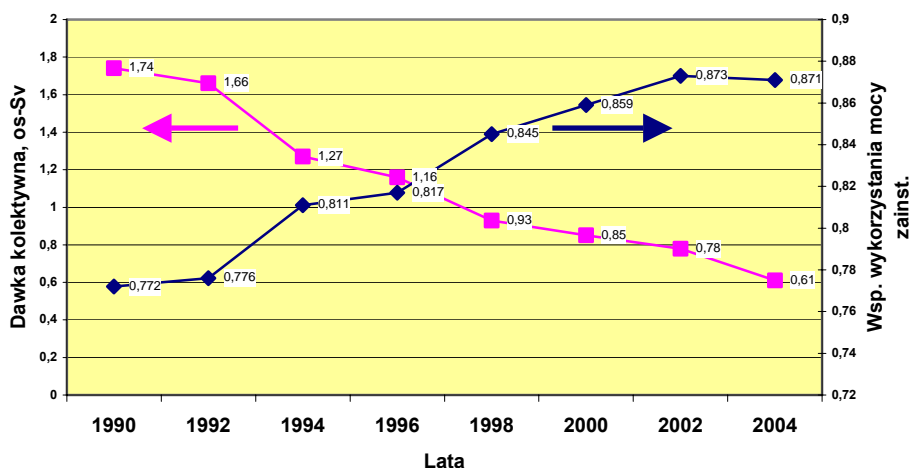
Dane zbierane przez urzędy dozoru jądrowego w różnych krajach i przez Światowe Stowarzyszenie Operatorów Elektrowni Jądrowych – WANO (*World Association of Nuclear Operators*) wykazują, że w elektrowniach o najwyższych współczynnikach wykorzystania mocy zainstalowanej dawki kolektywne są najniższe. Na rys. 15.1 widać krzywe oparte na danych WANO przedstawiające wzrost średniego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej we wszystkich elektrowniach jądrowych na świecie, oraz dawki kolektywne w elektrowniach z reaktorami PWR, a więc takimi, jakie prawdopodobnie będą budowane w Polsce. Dawki te, otrzymywane łącznie przez wszystkich pracowników elektrowni jądrowych, włączając w to i zespoły remontowe spoza elektrowni, systematycznie maleją. Jak wynika z wykresu 15.1, zmniejszenie dawki kolektywnej nie odbywało się kosztem obniżenia efektywności pracy elektrowni. Wręcz przeciwnie, wykorzystanie mocy elektrowni jądrowych wykazywało w tym samym czasie systematyczny wzrost.

---

<sup>2</sup> Z czego nie wynika, że zasada ALARA jest optymalna. Jej stosowanie prowadzi bowiem do nadmiernych kosztów ochrony w stosunku do rzeczywistej ochrony zdrowia ludności.

<sup>3</sup> Dawka kolektywna (mierzona w osobo-siwertach) to suma dawek indywidualnych otrzymanych przez wszystkich pracowników wykonujących daną pracę (np. wymianę urządzeń w EJ) lub narażonych na promieniowanie z danego źródła (np. mieszkających w pobliżu elektrowni jądrowej). Daje ona więc ocenę globalną i w żadnej mierze nie mówi o narażeniu konkretnego pracownika.

<sup>4</sup> Pojęcie dawki kolektywnej ma niewątpliwie sens jedynie w odniesieniu do grupy osób wykonujących tą samą pracę. Często jednak używa się dawki kolektywnej do oceny możliwych skutków zdrowotnych promieniowania ludności zamieszkującej znaczne obszary i żyjącej w bardzo różnych warunkach, co jest ewidentnym błędem metodologicznym, wynikającym z przyjęcia błędnej zasady, że każda dawka promieniowania niesie ryzyko utraty zdrowia proporcjonalne do wielkości dawki (hipoteza liniowa bezprogowa - LNT)



**Rys. 15.1** Wzrost współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej w EJ na świecie i obniżanie średniej dawki kolektywnej w ciągu roku pracy bloku z reaktorem PWR<sup>5</sup>.

Obniżanie dawek pracowników nie jest bynajmniej sprawą prostą. Przede wszystkim należy zapewnić maksymalną czystość obiegów wodnych i parowych reaktora w czasie normalnej pracy elektrowni jądrowej, tak by w obiegach tych nie gromadziły się materiały promieniotwórcze, co wymusza ulepszenie konstrukcji i materiałów elektrowni. Usuwanie z konstrukcji materiałów ulegających aktywacji (jak np. kadm) pod wpływem promieniowania neutronowego w rdzeniu prowadzi do zmniejszenia ilości zanieczyszczeń, które mogą rozpuszczać się w wodzie obiegu pierwotnego i krążyć wraz z nią w reaktorze. W konsekwencji podczas remontu urządzeń narażenie personelu na promieniowanie jest mniejsze. Nie mniejszą uwagę poświęca się podnoszeniu szczelności obiegu pierwotnego oraz paliwa, tak by nie wyciekały z niego do wody produkty rozszczepienia.

Pracownicy elektrowni otrzymują dawki promieniowania przede wszystkim podczas prac remontowych, gdy otwierają zbiorniki ze skażoną wodą lub zawory, na których osadziły się zaaktywowane produkty korozji, gdy otwierają zbiornik reaktora i dokonują przeładunków paliwa, słowem, gdy znika szczelność jednej z barier powstrzymujących uwolnienia produktów radioaktywnych. Aby zmniejszyć zagrożenie pracowników trzeba dążyć do sprawnego wykonywania prac remontowych, tak by czas narażenia na promieniowanie był krótki. Istotnie, okresy przestojów remontowych w elektrowniach są skracane, a dawki systematycznie maleją. Przygotowania do wykonania większych prac remontowych, takich jak wymiana wytwornic pary, trwają wiele lat. Wszystkie czynności są starannie zaplanowane, możliwe zmiany technologii wykonywania prac ocenia się z punktu widzenia ich wpływu na dawki otrzymywane przez pracowników, a wyniki tych ocen wpływają na podejmowane decyzje. Jak ważną sprawą jest zdobywanie doświadczeń można zauważyć na przykładzie konsekwencji wymiany wytwornic pary w elektrowniach belgijskich iszawajcarskich. O ile w 1993 r. przy wymianie wytwornicy pary w Doel 3 (Belgia) pracownicy otrzymali dawkę kolektywną 1,9 os-Sv, to przy powtórzeniu tej operacji w elektrowni Tihange 1 w 1995 r. dawka wyniosła 1,6 os-Sv, a przy podobnych operacjach w trzech następnych blokach jądrowych w Belgii w latach 1996-2001 dawki kolektywne

<sup>5</sup> [http://www.wano.org.uk/PerformanceIndicators/PI\\_Trifold/PI\\_2004\\_TriFold.pdf](http://www.wano.org.uk/PerformanceIndicators/PI_Trifold/PI_2004_TriFold.pdf)

wynosiły już około 0,64 os-Sv<sup>6</sup>. Podobnie w 1993 r. przy wymianie wytwornic pary w Beznau 1 w Szwajcarii dawka wyniosła 1,2 os-Sv, a w 1999 tę samą pracę wykonano w bloku Beznau 2 przy dawce kolektywnej 0,64 os-Sv<sup>7</sup>.

W elektrowni jądrowej Borssele w Holandii dawki kolektywne zmalały z 4 os-Sv w latach 80-tych do 0,3 os-Sv w 2003 r, a średnie dawki indywidualne spadły do 0,5 mSv rocznie<sup>8</sup>. Z każdym rokiem do reaktorów wprowadza się kolejne ulepszenia, a dawki promieniowania otrzymywane przez pracowników maleją. W Niemczech, gdzie pracują reaktory czterech typów (generacji), budowane w kolejnych fazach rozwoju energetyki jądrowej, dawki kolektywne w elektrowni jądrowej z reaktorami trzeciej generacji obniżono w 2000 r. do 0,7 os-Sv na blok rocznie, a w elektrowni jądrowej z reaktorami czwartego, najnowszego typu nawet do 0,18 os-Sv na blok rocznie<sup>9</sup>. W elektrowniach amerykańskich dawki kolektywne były najwyższe w roku 1980, gdy wykonywano szereg przeróbek wynikających z doświadczeń wyniesionych z awarii elektrowni TMI-2 w Harrisburgu w 1978 roku (patrz rozdział XVI). Od tamtej pory dawki stale malały, osiągając w 2001 r. poziom 1 os-Sv średnio dla wszystkich reaktorów w USA, przy czym dla reaktorów PWR dawki te były znacznie niższe. Dawki indywidualne dla pracowników elektrowni amerykańskich zmalały z 9,5 mSv rocznie w 1973 roku do 1,7 mSv rocznie w 2002 r.<sup>10</sup>. W przemyśle jądrowym przyjęto zasadę „*Bezpieczeństwo jest sprawą wspólną*” i elektrownie jądrowe prowadzą stale wymianę doświadczeń, tak że metody pracy opracowane w jednej elektrowni są udostępniane innym elektrowniom. Pomaga to bardzo w podnoszeniu niezawodności i obniżaniu dawek radiacyjnych.

Wielkości dawek kolektywnych przedstawione na rys. 15.1 i dawek indywidualnych cytowane powyżej można porównać z dawkami granicznymi ustalonymi przez urzędy dozoru jądrowego. Według przepisów w wielu krajach UE, indywidualne dawki graniczne ustalone są zgodnie z zaleceniami ICRP na 20 mSv/rok, a dawki kolektywne na 4 os-Sv/blok/rok. Jak podkreśla rząd francuski w swym raporcie na Konwencję o Bezpieczeństwie Jądrowym, powyższe dawki indywidualne ustalono z dużym marginesem bezpieczeństwa w stosunku do dawek, przy których obserwuje się ujemne skutki zdrowotne promieniowania tj. 100-200 mSv<sup>11</sup>. Jednocześnie we wszystkich krajach kładzie się nacisk na maksymalną redukcję dawek zgodnie z zasadą ALARA. Np. w Słowenii w celu zastosowanie tej zasady do wszystkich prac przyjęto, że maksymalna dawka indywidualna nie może przekraczać 5 mSv, a dawka kolektywna 0,01 os-Sv. Stosowanie zasady ALARA kontrolowane jest przez komitet ALARA, powoływany na najwyższym szczeblu zarządzania elektrownią<sup>12</sup>.

Biorąc pod uwagę, że proponowany przez konsorcjum francusko-niemieckie nowy reaktor EPR ma wszystkie zalety najnowszych reaktorów w Niemczech i we Francji, a ponadto

---

<sup>6</sup> KINGDOM OF BELGIUM, Third Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, National Report, Sept. 2004

<sup>7</sup> SWITZERLAND Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety, the Third Swiss Report in accordance with article 5, July 2004

<sup>8</sup> NETHERLANDS Convention on Nuclear Safety, National Report of the Kingdom of Netherlands, The Hague, Sept. 2004

<sup>9</sup> GERMANY Environmental Policy, Convention on Nuclear Safety, Report by the Government of the Federal Republic of Germany. BMU Sept. 2004

<sup>10</sup> THE UNITED STATES OF AMERICA Third National Report for the Convention on Nuclear Safety US NRC Sept. 2004, NUREG-1650

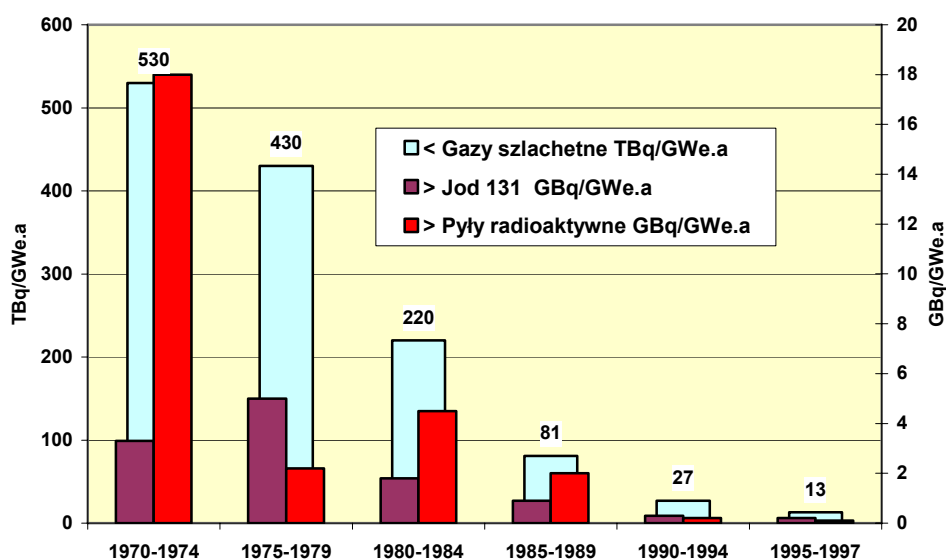
<sup>11</sup> FRANCE 3<sup>rd</sup> French National Report on Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety issued for the 2005 Peer Review Meeting, July 2004

<sup>12</sup> SLOVAK REPUBLIC National report compiled in terms of the Convention on Nuclear Safety, Sept. 2004

szereg dodatkowych ulepszeń opracowanych przez najlepsze zespoły projektowe w UE, można oczekiwać, że dawki dla pracowników przyszłych polskich elektrowni jądrowych będą naprawdę bardzo małe. Analizy radiologiczne przeprowadzone dla budowanej obecnie elektrowni w Olkiluoto (Finlandia) z reaktorem EPR potwierdzają te oczekiwania.

### 15.3 Uwolnienia radioaktywne poza obszar elektrowni jądrowej

Według zasad przyjętych przez Komisję Energii Atomowej USA w połowie XX wieku, a więc na samym początku rozwoju energetyki jądrowej, żadna osoba nie może być narażona na znaczące dodatkowe zagrożenie wskutek pracy elektrowni jądrowej, a społeczne ryzyko wynikające z pracy elektrowni jądrowej powinno być porównywalne z ryzykiem powodowanym przez inne formy wytwarzania energii i nie może powodować znaczącego zwiększenia całkowitego zagrożenia społecznego. Dla osiągnięcia tego celu ustalono, że dawki wokoło elektrowni jądrowej należy ograniczyć tak, by powodowane przez nie średnie ryzyko zachorowania na raka wśród populacji mieszkającej w promieniu 16 km nie przekraczało 0,1% sumy zachorowań na raka wynikających ze wszystkich innych przyczyn<sup>13</sup>. W owym czasie średnia umieralność na raka wynosiła w USA około 0,002 na rok, tak że określona liczbowo wartość zagrożenia dopuszczalnego ze strony elektrowni jądrowych dla krytycznej grupy ludności<sup>14</sup> wynosiła średnio  $2 \cdot 10^{-6}$  na osobę na rok. Tego typu założenia spowodowały systematyczny spadek wydzieleń produktów rozszczepienia z reaktorów jądrowych do otoczenia elektrowni. Na rys. 15.2 pokazano spadek wydzieleń jodu, gazów szlachetnych i pyłów radioaktywnych do atmosfery z elektrowni jądrowych z reaktorami PWR<sup>15</sup>.



Rys. 15.2 Redukcja emisji z reaktorów PWR<sup>16</sup>.

<sup>13</sup> US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, US NRC Policy Statement on Nuclear Power Plant Safety Goals, Atomic Energy Clearing House, 32(26); (23 June 1986).

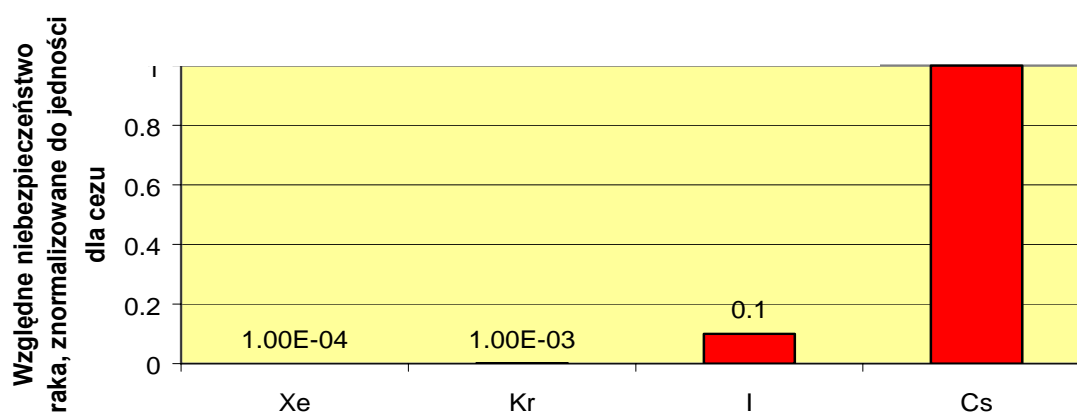
<sup>14</sup> Krytyczna grupa ludności – grupa najbardziej zagrożona, np. w przypadku ludności wokoło elektrowni jądrowej jest to zwykle grupa niemowląt, lub dzieci w wieku 2-7 lat, zamieszkałych nieopodal elektrowni.

<sup>15</sup> Dla porównania: naturalna emisja alfa-promieniotwórczego <sup>222</sup>Rn do atmosfery wynosi  $33 \cdot 10^6$  TBq/rok, a więc ok.  $10^5$  TBq dziennie!

<sup>16</sup> UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation.

Warto tu dodać, że nie wszystkie produkty rozszczepienia są groźne w jednakowym stopniu. Do najgroźniejszych należą pyły radioaktywne (takie jak cez czy stront), które dostają się do organizmu człowieka i pozostają w nim długo, bo ich efektywny okres zaniku jest długi. Mniej groźny jest jod, który wprawdzie osadza się w tarczycy, ale stosunkowo szybko zanika (okres połowicznego zaniku izotopu  $^{131}\text{I}$  to 8 dni, a dla innych izotopów jodu jest jeszcze krótszy). Badania wielu osób, które napromieniowywano jodem w celach diagnostycznych lub leczniczych, nie wykazały żadnego wzrostu zachorowań na raka<sup>17</sup>. Tym niemniej jod jako pierwiastek o znacznej lotności jest typowym zagrożeniem, z którym walczy się przy obniżaniu dawek w elektrowniach jądrowych.

Najmniej groźne są wydzielenia gazów szlachetnych, które wprawdzie emitują promieniowanie gamma i beta, ale ulatniają się do otoczenia i nie pozostają w organizmie człowieka. Porównanie zagrożenia chorobą nowotworową powodowane przez wydzielenie równych wielkości aktywności (w Bq) gazów szlachetnych: kryptonu (Kr), ksenonu (Xe), jodu (I) i cezu (Cs) pokazano na rys. 15.3. Zagrożenie ze strony cezu jest największe, bo ma on okres połowicznego zaniku 30 lat, a więc pozostaje w otoczeniu człowieka długo po kompletnym zniknięciu jodu i gazów szlachetnych. Jak widać jod jest mniej groźny, a gazy szlachetne powodują znikomo małe zagrożenie. Oczywiście nie należy wysnuwać z rys. 15.3 wniosku, że zagrożenie rakiem ze strony cezu jest 100%-owe. Rysunek pokazuje tylko zagrożenia rakiem względem niebezpieczeństwa związanego z cezem.



**Rys. 15.3** Względne zagrożenie zachorowaniem na raka powodowane wydzieleniem pewnej aktywności produktów rozszczepienia, znormalizowane do jedności dla cezu<sup>18</sup>

Teraz, gdy zdajemy sobie sprawę z wielkości względnych zagrożeń, popatrzmy jeszcze raz na rys. 15.2. Jak widać, wysiłki energetyki jądrowej szły głównie w kierunku redukcji emisji cezu, jodu i innych pyłów radioaktywnych, i przyniosły dobre rezultaty. Średnie uwolnienia z EJ z reaktorami PWR w krajach UE w 2003 roku mierzone na wyprodukowanej jednostkę energii

<sup>17</sup> A. Strupczewski, *Oddziaływanie małych dawek promieniowania na zdrowie człowieka*, Biuletyn Miesięczny PSE, czerwiec 2005, 10-25

<sup>18</sup> *Insights into the control of the release of iodine, strontium and other fission products in the containment by severe accident management*, NEA/CSNI/R(2000)9

elektrycznej wyniosły<sup>19</sup> dla gazów szlachetnych 4,9 GBq/GWh, a dla jodu i aerozoli odpowiednio 0,000025 i 0,000042 GBq/GWh, a więc były ponad sto tysięcy razy mniejsze. Najgroźniejsze izotopy są najskuteczniej zatrzymywane.

Najbardziej reprezentatywne dla rozwoju energetyki jądrowej w Europie są elektrownie francuskie<sup>20</sup>. Ich łączna moc wynosi 62,8 GWe, a więc jest około dwukrotnie większa od całej mocy wszystkich elektrowni w Polsce. Średnie uwolnienia jodu i aerozoli z elektrowni francuskich wynosiły w 2000 r. około 0,4% dopuszczalnych uwolnień w skali rocznej. Wydzielenia ciekłych odpadów radioaktywnych wynosiły około 0,5% wielkości dopuszczalnych. Im nowsze reaktory, tym wydzielenia są mniejsze. I tak np. elektrownie w Chooz i Civaux wyposażone w reaktory najnowszej generacji o łącznej mocy 4 x 1450 MWe emitują w sumie poniżej 4 TBq gazów szlachetnych i trytu, a poniżej 0,4 GBq izotopów jodu i pyłów radioaktywnych razem. Z rysunku 15.2 widać, że na przełomie stulecia średnie na świecie uwolnienia gazów szlachetnych wynosiły 13 TBq/GWe-rok. Wymienione powyżej elektrownie francuskie osiągnęły wskaźnik niższy od 1 TBq/GWe-rok dla gazów szlachetnych i trytu razem, a poniżej 0,1 GBq/GWe-rok dla jodu i pyłów radioaktywnych razem! Wielkości tych nie można jednak pokazać na rys. 15.2, gdyż pokrywają się z osią poziomą.

Biorąc pod uwagę ulepszone możliwości techniczne elektrowni jądrowych, urząd dozoru jądrowego Francji ustalił dla ostatnio zbudowanych elektrowni jądrowych z reaktorami 1450 MWe limity 10 razy niższe niż dla poprzednich bloków 1300 MWe. Podczas gdy dawne limity dla elektrowni z dwoma reaktorami o mocy 1300 MWe wynosiły 110 GBq dla jodu i aerozoli łącznie, a 3300 TBq dla gazów szlachetnych łącznie z trytem i C-14, dla nowych elektrowni jądrowych w Chooz i Civaux limity te wynoszą odpowiednio 11 GBq i 330 TBq, chociaż moc tych elektrowni jest zwiększona. Co więcej, wobec tego że EJ emitowały tylko ułamki procenta wielkości granicznych, Francja podjęła akcję ogólnej redukcji dozwolonych limitów emisji. Bloki uzyskujące przedłużenie licencji po 1995 roku mają narzucone limity niższe niż obowiązujące poprzednio. Przykładowe wielkości emisji dozwolonych dla dwóch elektrowni jądrowych 2 x 1300 MWe wg starych i obecnych przepisów pokazane są w Tabeli 15.1.

**Tab. 15.1 Emisje dozwolone i rzeczywiste w elektrowniach jądrowych we Francji, pracujących na podstawie zezwoleń pierwotnych (stare limity) i obecnych, odnowionych na bazie nowych przepisów (nowe limity)**

Elektrownia jądrowa	Golfech, 2x1300 MWe (stare limity)		Flamanville, 2x1300 MWe (nowe limity)	
	Limit	Rzeczywiste emisje	Limit	Rzeczywiste emisje
Gazy szlachetne, TBq/rok	1650	2,74	45	0,90
Tryt, TBq/rok	1)	1)	5	2,03
Węgiel C-14, TBq/rok	1)	1)	1,4	0,416
Jod, GBq/rok	55	0,083	0,8	0,108
Aerosole, GBq/rok	2)	2)	0,8	0,0049

1) Wielkości te były włączone w pozycję „Gazy szlachetne”

2) Wielkości te były włączone w pozycję „Jod i aerosole”

<sup>19</sup> SPAIN, Convention on Nuclear Safety, Third National Report, September 2004

<sup>20</sup> FRANCE 3<sup>rd</sup> French National Report on Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety issued for the 2005 Peer Review Meeting, July 2004

Jak widać, nowe limity są około 30 razy niższe od obowiązujących dawniej. Dawne limity były zupełnie wystarczające z punktu widzenia zdrowia ludzi, lecz rząd francuski podkreśla, że wskutek rozwoju technicznych możliwości elektrowni dawne ograniczenia przestały mieć sens, bo w rzeczywistości uwolnienia były nieporównywalnie mniejsze. Dlatego wprowadzono nowe limity, od 2 do 40 razy mniejsze w zależności od izotopu i elektrowni. W innych krajach emisje są również systematycznie redukowane. W świetle stanu wiedzy na temat wpływu małych dawek promieniowania na organizmy można jednak zapytać o sens tych nadzwyczaj wyśrubowanych norm: każde usprawnienie kosztuje, a jak pokazywaliśmy w rozdziale XIV na przykładzie oczyszczania wody pitnej – powyżej pewnego progu cena staje się nieproporcjonalnie wysoka w stosunku do potencjalnych pozytywnych efektów zdrowotnych.

#### 15.4 Dawki wokół elektrowni jądrowych – dopuszczalne i rzeczywiste.

Wielkość rekomendowanej dawki dopuszczalnej dla ludności, powodowanej przez instalacje jądrowe, wynosi - zgodnie z zaleceniem Międzynarodowej Komisji Ochrony Przed Promieniowaniem (ICRP) - 1 mSv/rok. Wielkość tę przyjęto jako obowiązującą w krajach Unii Europejskiej. Dodatkowo w niektórych krajach urzędy dozoru jądrowego wprowadzają ograniczenia mające zapewnić, że w stosunku do zaleceń ICRP będzie zachowany margines bezpieczeństwa w przypadku jednoczesnej pracy kilku elektrowni jądrowych lub innych dużych źródeł promieniowania (poza napromieniowaniem związanym z medycyną).

**Tab. 15.2 Efektywne dawki graniczne do określenia dopuszczalnych uwolnień z EJ**

Kraj	Dawka od uwolnień gazowych [μSv/rok]		Dawka od uwolnień ciekłych [μSv/rok]	
	Na całe ciało	Na dowolny narząd	Na całe ciało	Na dowolny narząd
Belgia	50	150	30	100
Czechy	200		50	
Finlandia	100 od promieniowania zewnętrznego i wchłaniania substancji promieniotwórczych łącznie			
Francja	1000 od promieniowania zewnętrznego i wchłaniania substancji promieniotwórczych łącznie			
Niemcy	300	1800	300	1800
Słowenia	50 od wszystkich uwolnień radioaktywnych + 200 od promieniowania zewnętrznego z urządzeń elektrowni jądrowej			
Hiszpania	100 łącznie od wszystkich emisji z elektrowni jądrowych			
Szwajcaria	300 od elektrowni jądrowych, w tym 100 z promieniowania bezpośredniego i 200 od emisji			
W. Brytania	300 od jednego bloku, 500 od elektrowni jądrowej z wieloma blokami i 1000 od wszystkich źródeł łącznie z promieniowaniem dawnych emisji, ale poza medycyną.			
USA	50	150	30	100

\* Ponadto w USA obowiązuje zasada, że należy zmniejszać dawki dla ludności, gdy koszt potrzebnych do tego środków jest mniejszy niż 100 000 \$/os-Sv<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> THE UNITED STATES OF AMERICA Third National Report for the Convention on Nuclear Safety US NRC Sept. 2004, NUREG-1650



W Niemczech dla promieniowania z EJ ustalono limit równy 0,3 mSv/rok. W Finlandii urząd dozoru jądrowego określił emisje dopuszczalne z elektrowni tak, by dodatkowa dawka roczna powodowana przez EJ nie przekraczała 0,1 mSv. We Francji natomiast obowiązuje dawka 1 mSv/rok, chociaż limity uwolnień odpowiadają dawkom o wiele mniejszym.

W metodyce określania dopuszczalnych emisji urzędy dozoru jądrowego przyjmują założenia niekorzystne, tak by w rzeczywistości dawki były mniejsze od dozwolonych. Granice ustalanych uwolnień w wiodących krajach UE są takie, by dawki roczne od uwolnień gazowych i ciekłych nie przekraczały wielkości podanych w Tabeli 15.2. Ponadto elektrownie starają się utrzymać emisje na poziomie jak najmniejszym zgodnie z zasadą ALARA. W efekcie rzeczywiste dawki wokoło elektrowni jądrowych są znacznie mniejsze od dozwolonych.

We francuskiej elektrowni jądrowej Flammanville z dwoma reaktorami typu PWR o mocy 900 MWe moc dawki powodowanej przez wszystkie emisje z EJ wynosi typowo 0,0003 mSv/rok. Powołany przez rząd francuski Komitet Souleau stwierdził, że maksymalne dawki odpowiadające dozwolonym limitom wyniosłyby 0,3 mSv/rok, podczas gdy rzeczywiste dawki poza terenem elektrowni wyniosły średnio 0,01 mSv, a więc 30 razy mniej niż dawki graniczne, a 200 razy mniej niż tło promieniowania naturalnego<sup>22</sup>.

W USA uwolnienia średnie ze wszystkich elektrowni jądrowych są także dużo niższe niż wartości dopuszczalne. Nigdy nie wykryto żadnych ujemnych skutków zdrowotnych powodowanych przez te niskie uwolnienia, i nie oczekuje się by kiedykolwiek takie skutki wystąpiły. Wbrew twierdzeniom publicystów antynuklearnych, przeprowadzone na ogromną skalę (obejmującą 500 000 osób) studium amerykańskiego Instytutu Chorób Nowotworowych potwierdziło, że nie ma żadnych oznak wzrostu zachorowań na raka w sąsiedztwie instalacji jądrowych w USA<sup>23</sup>.

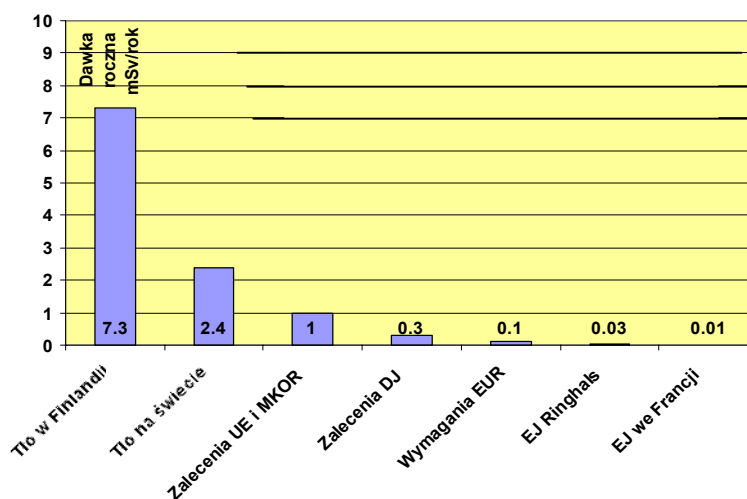
W Szwajcarii dawki wokoło elektrowni jądrowych wahają się od 0,01 do 0,001 mSv rocznie. Elektrownia jądrowa w Gosgen przez 14 lat powodowała dawki dla najbardziej narażonej grupy ludności leżące poniżej 0,001 mSv/rok. Dla pokazania pełnego obrazu warto dodać, że w jednej z elektrowni szwajcarskich, mianowicie w Muehlebergu, zdarzyła się jednak awaria w systemie przerobu suchych żywic zatrzymujących materiały radioaktywne i doszło do znaczącego wydzielenia długożyciowych produktów radioaktywnych poza elektrownię. Było to w 1987 r., a od tej pory elektrownia pracuje dobrze i poziom promieniowania stale maleje. Ale, żeby dopowiedzieć sprawę do końca –w sąsiedztwie elektrowni w chwili owej awarii natężenie awaryjne w szczycie wyniosło 0,1 mSv/rok, a więc było 20 razy mniejsze (!) od normalnego poziomu tła promieniowania. A przy tym chodzi tu o elektrownię bardzo starą. W nowszych elektrowniach stałe dążenie do redukcji emisji substancji radioaktywnych doprowadziło do stanu, gdzie dawki od elektrowni jądrowych są mniejsze nie tylko od tła naturalnego, które waha się od 2 do 10 mSv/rok, ale i od zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (1 mSv/rok), Unii Europejskiej i od wymagań urzędów dozoru jądrowego. Jak bardzo te wymagania są różne, ilustruje rys. 15.4.

---

<sup>22</sup> GROUPE RADIOECOLOGIE NORD CONTENTIN, *Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques de leucemies associes de populations du Nord-Contentin, Synthèse*, July (1999)

<sup>23</sup> S. Jablon, et al., *Cancer in populations living near nuclear facilities*, National Cancer Institute, NIH Publication No 90-874, US Dept. of Health and Human Services, (July 1990).

Dawka rzeczywista dla krytycznej grupy ludności wokoło elektrowni jądrowej Ringhals (Szwecja) wynosi 0,03 mSv/rok. Dawki wokoło innych elektrowni jądrowych w Szwecji są jeszcze mniejsze. We Francji dawki dla krytycznej grupy ludności wokoło elektrowni wynoszą około 0,01 mSv/rok. Średnia moc dawki dla ludności Francji, gdzie przecież energia jądrowa dostarcza 80% potrzebnej krajowi energii elektrycznej, wynosi 0,001 mSv/rok, a więc jest pomijalnie mała według wszelkich ocen, czy to formułowanych przez Francuską Akademię Medyczną, czy przez ICRP lub UNSCEAR.



**Rys. 15.4 Porównanie dawek promieniowania od EJ z tłem naturalnym i dawkami dozwolonymi<sup>24</sup>**

W Finlandii<sup>25</sup> dawki dopuszczalne dla ludności powodowane pracą elektrowni jądrowej ustalono na 0,1 mSv/rok. Przy przyjęciu niekorzystnych założeń, dawka efektywna, którą mogła spowodować praca elektrowni jądrowej Olkiluoto z blokami 1 i 2 oceniana była na 0,044 mSv/rok. W ciągu ostatnich kilku lat dawka obliczona na podstawie rzeczywistych danych dla najbardziej narażonej osoby w okolicy elektrowni jądrowej Olkiluoto była dużo niższa, poniżej 0,0002 mSv/rok. Po oddaniu do eksploatacji nowego bloku nr 3 (reaktorem PWR o mocy 1600 MWe) dawki dopuszczalne dla ludności nie zmieniają się i pozostaną na poziomie 0,1 mSv/rok. Przy przyjęciu niekorzystnych założeń, teoretycznie możliwa dawka roczna dla najbardziej narażonej osoby w sąsiedztwie elektrowni jądrowej, powodowana pracą Olkiluoto 3, została oceniona na 0,014 mSv/rok. W oparciu o niemieckie i francuskie doświadczenia eksploatacyjne można przyjąć z dużym marginesem bezpieczeństwa, że rzeczywiste uwolnienia będą dużo niższe od wielkości przyjętych w raporcie bezpieczeństwa. Gdy blok Olkiluoto 3 zostanie oddany do eksploatacji, roczne dawki efektywne dla wszystkich trzech bloków elektrowni jądrowej Olkiluoto pozostaną dużo niższe niż 0,058 mSv (0,014 mSv od bloku nr 3 i 0,044 mSv od dwóch istniejących bloków) – tj. będą niższe od określonej przepisami dawki granicznej 0,1 mSv rocznie.

<sup>24</sup> MKOR – Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej; DJ – dozór jądrowy

<sup>25</sup> STUK Finnish Report On Nuclear Safety Convention On Nuclear Safety September 2004 STUK-B-YTO 234

Z polskiego punktu widzenia, wyniki Szwajcarów, Niemców czy Amerykanów nie są bynajmniej dla nas nieosiągalne. W sąsiadującej z nami Słowacji w końcu lat 80-tych budowano elektrownię jądrową z dwoma reaktorami typu WWER 400, podobnymi do budowanych w Polsce reaktorów w EJ Żarnowiec. Po zmianie ustroju na Słowacji zatrzymano budowę elektrowni jądrowej Mochovce na kilka lat, ale nie porzucono jej i po wprowadzeniu szeregu ulepszeń uruchomiono jednak oba te reaktory. Reaktory te dostarczają obecnie energię elektryczną dwukrotnie taniej niż elektrownie konwencjonalne i spełniają wszystkie wymagania bezpieczeństwa obowiązujące w UE. Pomiary radiologiczne wykazały, że moce dawek w ich otoczeniu są niemierzalnie małe. Gdy dokonano obliczeń, okazało się, że w ciągu 6 lat od chwili uruchomienia tej elektrowni roczne dawki dodatkowe powodowane przez tę elektrownię nigdy nie przekroczyły jednej milionowej siwerta (wahały się od 0,1 do 0,7  $\mu\text{Sv}$ )<sup>26</sup>. Podobnie na Węgrzech roczne dawki efektywne w odległości 3 km od elektrowni jądrowej Paks z czterema reaktorami WWER 440 wynoszą<sup>27</sup> od 0,1 do 0,5  $\mu\text{Sv}$ . Jeśli takie wyniki mogą osiągać rok po roku Słowacy czy Węgrzy w elektrowniach z reaktorami zaprojektowanymi przed 30 laty, które odrzuciliśmy jako niedostatecznie dobre dla Polski, to chyba będziemy potrafili dorównać im mając elektrownie jądrowe z najnowszymi reaktorami, dostarczonymi przez najlepsze firmy reaktorowe w XXI wieku!

W tej chwili możemy już stwierdzić, że w praktyce redukcje uwolnień radioaktywnych dyktowane przez zasadę ALARA wykraczają daleko poza wymagania urzędów dozoru jądrowego. Dzięki temu wpływ elektrowni jądrowych na poziom promieniowania i dawki w okolicy elektrowni jest tak mały, że najczęściej nie daje się go wykryć bezpośrednio i wyniki szacuje się na podstawie stosunkowo pesymistycznych założeń.

### 15.5 Ryzyko powodowane bliskością elektrowni jądrowej

Zgodnie z Encyklopedią Energii<sup>28</sup> z 2004 roku, następujące czynności powodują wzrost ryzyka równy prawdopodobieństwu zgonu 1 na milion w ciągu 1 roku (jednego mikrorzyzyka):

- Wypalenie 1,4 papierosa
- Jazda 16 km na rowerze
- Zjedzenie 40 łyżek stołowych masła z orzeszków ziemnych
- Wypicie 30 puszek dietetycznego napoju gazowanego zawierającego sacharynę
- Mieszkanie przez 50 lat w odległości 8 km od reaktora jądrowego.

Porównania te, podobne do prowadzonych w rozdz. XIV, mogą budzić sprzeciwy, bo masło z orzeszków ziemnych nie ma nic wspólnego z energetyką (a zagrożenie powoduje zawarta w orzeszkach ziemnych aflatoksyna). Właściwsze zapewne będą porównania z innymi gałęziami energetyki. Porównania te przedstawimy w innym miejscu, po omówieniu problemu ciężkich awarii w elektrowni jądrowej, który budzi żywe emocje, szczególnie od czasu awarii w Czarnobylu. W porównaniu z poziomem promieniowania naturalnego, włączając średnie narażenie z procedur medycznych (rozd. XIII oraz tab. 14.13), dodatkowa moc dawki poniżej 0,001 mSv/rok pochodząca z energetyki jądrowej, jest niezauważalnie małym przyrostem na tle wahań promieniowania tła naturalnego. Osiągnięcie tak niskich

---

<sup>26</sup> SLOVAK REPUBLIC National report compiled in terms of the Convention on Nuclear Safety, Sept. 2004

<sup>27</sup> REPUBLIC OF HUNGARY, National Report, Convention on Nuclear Safety, Third Report, 2004

<sup>28</sup> INHABER H.: Risk Analysis Applied to Energy Systems, Encyclopedia of Energy, Volume 5. Elsevier, 2004.

uwolnień zawdzięczamy barierom bezpieczeństwa omówionym szczegółowo w rozdziałach VII i VIII.

Dzięki czterem barierom bezpieczeństwa (patrz rozdz. VIII) produkty rozszczepienia są niemal całkowicie zatrzymane w granicach elektrowni. Tabela 15.3 pokazuje przykład skuteczności systemu barier ochronnych elektrowni jądrowej w odniesieniu do dwóch ważnych z punktu widzenia bezpieczeństwa izotopów promieniotwórczych - jodu i strontu. Aktywność tych izotopów w paliwie przyjęto umownie jako jedność, i podano frakcje, jakie wydostają się poza obręb kolejnych barier. Jak widać, dzienne wydzielania do atmosfery to aktywności setki miliardów razy mniejsze od aktywności w rdzeniu reaktora. Tak więc, mówiąc o redukcji wydzielen, „praktycznie biorąc do zera” nie popełniamy błędu.

Wydzielania gazów szlachetnych powstających wskutek rozszczepienia, takich jak ksenon i krypton, są większe, ale ich wpływ na zdrowie człowieka jest niewielki, bo nie zatrzymują się w organizmie człowieka tak jak jod czy stront. Tym niemniej, system barier zatrzymuje skutecznie także i te gazy, a fakt, że system składa się z czterech kolejnych barier zabezpiecza przed nadmiernymi uwolnieniami nawet wtedy, gdy jedna z barier ulegnie uszkodzeniu.

**Tab. 15.3 Rozkład względny izotopów promieniotwórczych w elektrowni jądrowej z reaktorem WWER 440/213 np. w EJ Mochovce.**

Izotop	W paliwie	W szczelinie pod koszulką	W obiegu pierwotnym	We wnętrzu obudowy bezpieczeństwa	W atmosferze, uwolnienia dzienne
J-131	1	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^{-8}$	$10^{-11}$
Sr-89	1	$10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^{-10}$	$10^{-15}$

Warto dodać, że bariery te są konstrukcjami trwałymi, i ani materiał pastylek paliwowych, ani koszulki cyrkonowe, ani rurociągi obiegu pierwotnego, ani tym bardziej ponad metrowej grubości żelazo-betonowa obudowa bezpieczeństwa, nie mogą być „wyłączone” z systemu barier, o co podejrzewają przeciwnicy elektrowni jądrowych, przekonani że inżynierowie jądrowi w dążeniu do brudnych zysków gotowi są do wyłączania zabezpieczeń i skażania środowiska. Wokoło elektrowni jądrowej utrzymywana jest sieć placówek pomiarowych, rejestrujących w sposób ciągły wydzielania i poziomy aktywności powietrza i wody i wykrywających wszelkie odchylenia. Wyniki tych pomiarów są kontrolowane i dostępne dla wszystkich zainteresowanych.



**Rys. 15.5 Elektrownia jądrowa Loviisa w zimie. Czystość otoczenia tej elektrowni mówi sama za siebie.**

Pomimo twardych danych nie wskazujących na to, aby elektrownie jądrowe podczas normalnej pracy mogły przynosić skutki ujemne dla zdrowia okolicznej ludności, niejednokrotnie w historii energetyki jądrowej pojawiały się doniesienia dotyczące szczególnie wzrostu liczby białaczek u dzieci mieszkających niedaleko elektrowni. I tak w roku 1990 amerykański Instytut Chorób Nowotworowych<sup>29</sup>, następnie w r. 1999 grupa radioekologiczna Nord-Contenin we Francji<sup>30</sup>, a w 2005 r. Urząd Ochrony Radiologicznej Wielkiej Brytanii<sup>31</sup>, po przeprowadzeniu wnikliwych i opartych na dużych populacjach badań spowodowanych takimi alarmistycznymi doniesieniami, jednoznacznie stwierdzają, że obecność elektrowni jądrowych nie stanowi dla okolicznej ludności zagrożenia białaczką i innymi nowotworami. Nie istnieje też podwyższone ryzyko białaczki u dziecka poczętego przez rodziców, którzy przed poczęciem dziecka otrzymali dawkę niższą od około 100 mSv lub w ciągu pół roku przed poczęciem dawkę ok. 10 mSv. Pomimo wyników tych rzetelnych studiów, szczególnie w Niemczech do dziś ta sprawa jest podnoszona, choć nawet tam grupy ekspertów ostatecznie stwierdzają, że zwiększona liczba białaczek u dzieci w wieku 0-4 lat, mieszkających w odległościach do 5 km od elektrowni jądrowej, nie może być wiązana z pracą elektrowni. W istocie rzeczy, jest rzeczą znaną, że wszędzie tam, gdzie następuje duże mieszanie się ludności: w nowopowstałych miastach, osiedlach (klastrach) tworzonych wokół baz wojskowych itp., obserwuje się relatywny wzrost białaczek dziecięcych. Wzrost ten tłumaczony jest spadkiem odporności i zwiększoną podatnością na infekcje powstające z mieszaniem się ludzi napływających z różnych stron. Opis sytuacji w takich klastrach można znaleźć w pracach Dolla oraz Stillera i Boyle'a, a także Clarka i in.<sup>32</sup>.

Poza kontrolą rządową i nadzorem ONZ wydzielenia z elektrowni jądrowych są obserwowane przez organizacje antynuklearne, które wykorzystują każdą okazję by wzbudzać protesty publiczne przeciw pracy tych elektrowni. Szereg komisji i komitetów obywatelskich walczących przeciw elektrowniom jądrowym otrzymuje finansowanie z funduszy rządowych, a każdy obywatel ma prawo wglądu w wyniki pomiarów i obliczeń. Ta jawność w zakresie ochrony radiologicznej jest cechą szczególnie cenną, zapewniającą społeczeństwu możliwość nadzoru i wywierania wpływu na działania przedsiębiorstw energetyki jądrowej. Energetyka jądrowa pokazała, że taka jawność jest możliwa i że jest ona korzystna dla obu stron. Jak dotąd, żadna inna gałąź przemysłu nie osiągnęła takiego poziomu jawności i systematycznej kontroli wywieranego przez nią wpływu na środowisko. Efekty są widoczne – czyste niebo nad elektrowniami jądrowymi (rys. 9.28, tu powtórzone jako rys. 15.5) pozostaje osiągnięciem, do którego mogą tylko dążyć inne gałęzie przemysłu.

---

<sup>29</sup> S.Jablón et al., *Cancer in populations living near nuclear facilities*, National Cancer Institute, NIH Publication No. 90-874, US Dept. of Health and Human Services, July (1990)

<sup>30</sup> *Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques des leucémies associées de populations du Nord-Contenin*, Synthèse, Group Radioecologie Nord Contenin, July (1999)

<sup>31</sup> *The incidence of childhood cancer around nuclear installations in Great Britain*, Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment (COMARE), Tenth Report (2005); [www.comare.org.uk](http://www.comare.org.uk)

<sup>32</sup> R.Doll, *The seascale cluster: a probable explanation*, Br. J.Cancer 81 (1999) 1-3; C.A.Stiller, O.J.Boyle, *Effect of population mixing and socioeconomic status in England and Wales, 1979-85, on lymphoblastic leukaemia in children*, Br. Med.J. 313 (1996)1297-1300; B.R.Clark et al., *Evidence of population mixing based on the geographical distribution of childhood leukaemia in Ohio*, *Pediatr. Blood Cancer* 49 (2007) 797-802