

## **DAWKI PRZY NORMALNEJ PRACY ELEKTROWNI JĄDROWYCH**

Dr inż. A. Strupczewski<sup>1</sup>

### **Ogólne tendencje**

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 pomijalnie mały - 0.001 mSv/rok wobec średnio 2,4 mSv/rok jakie otrzymuje człowiek wskutek promieniowania tła naturalnego i zabiegów medycznych.

Wraz z rozwojem energetyki jądrowej podnoszono stale bezpieczeństwo jądrowe i obniżano dawki promieniowania. Obecne uwolnienia produktów radioaktywnych z EJ są pomijalnie małe, a także w przeszłości uwolnienia podczas normalnej eksploatacji EJ nie powodowały wykrywalnych efektów zdrowotnych. Jednakże 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. Ponadto przeciwnicy energetyki jądrowej donoszą wciąż o zachorowaniach na białaczkę, rzekomo powodowanych przez instalacje jądrowe. Jaka jest prawda? Zaczniemy od faktów.

Uwolnienia radioaktywne z EJ i z zakładów przerobu paliwa wypalonego są stale kontrolowane. Wyniki pomiarów podlegają kontroli urzędów dozoru jądrowego w krajach prowadzących eksploatację EJ, 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 EJ. Jednostką przyjętą do pomiaru radioaktywności jest bekerel (Bq) odpowiadający jednemu rozpadowi atomu na sekundę. Większa jednostka używana tradycyjnie to 1 Curie, równy  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq.

Systematyczne wysiłki energetyki jądrowej zmierzające do redukcji uwolnień substancji radioaktywnych i utrzymania narażenia radiacyjnego na poziomie tak niskim jak to możliwe w rozsądnych granicach (*as low as reasonably achievable -ALARA*) doprowadziły do imponujących sukcesów. Nikt ani z personelu, ani z ludności wokoło elektrowni nie otrzymał dawek, które spowodowałyby utratę zdrowia lub życia, nikt - poza ofiarami Czarnobyla, który nie jest typowy dla reaktorów energetycznych i zasługuje na osobną dyskusję. Energetyka jądrowa z natury rzeczy nie wydziela gazów powodujących efekt cieplarniany, ani 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, energetyka jądrowa osiągnęła wyniki, które mogą być wzorem dla innych gałęzi przemysłu. Dotyczy to zarówno działań zmierzających do zmniejszania zagrożeń społeczeństwa jak i pracowników.

---

<sup>1</sup> Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej, Instytut Energii Atomowej, 05-400 Swierk, e-mail: [A.Strupczewski@cyf.gov.pl](mailto:A.Strupczewski@cyf.gov.pl)

## Małe i wciąż obniżane narażenie radiacyjne pracowników elektrowni.

Ludźmi najbardziej narażonymi na promieniowanie z EJ są jej własni pracownicy. Dlatego kierownictwo elektrowni przykłada dużą wagę do redukcji dawek, jakie pracownicy otrzymują w czasie normalnej pracy i remontów urządzeń. Nie wystarczy przy tym chronić najbardziej narażonych pracowników kosztem dawek otrzymywanych przez innych pracowników. Celem jest zmniejszenie dawki kolektywnej<sup>2</sup>, czyli sumy wszystkich dawek otrzymywanych przez wszystkich pracowników elektrowni i personel czasowo zatrudniony przy pracach naprawczych.

Dbłość o zmniejszanie narażenia radiacyjnego nie powoduje bynajmniej obniżenia efektywności pracy elektrowni, wręcz przeciwnie, ich współczynniki wykorzystania mocy zainstalowanej rosną. Dane zbierane przez urzędy dozoru jądowego w różnych krajach i przez Światowe Stowarzyszenie Operatorów EJ – WANO (World Association of Nuclear Operators) wykazują, że w elektrowniach o najwyższych współczynnikach wykorzystania mocy zainstalowanej dawki kolektywne są najniższe. Na Rys. 1 widać krzywe oparte na danych WANO [1] przedstawiające wzrost średniego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej we wszystkich EJ na świecie, oraz dawki kolektywne w EJ z reaktorami PWR, a więc takimi, jakie prawdopodobnie będą budowane w Polsce. Dawki te, otrzymywane łącznie przez wszystkich pracowników elektrowni jądowych, włączając w to i zespoły remontowe spoza elektrowni, systematycznie maleją.



**Rys. 1 Wzrost współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej w EJ na świecie i obniżanie średniej dawki kolektywnej na rok pracy bloku z reaktorem PWR. Dane z [1].**

Co prawda, obniżanie dawek pracowników nie jest bynajmniej sprawą prostą. Pracownicy elektrowni otrzymują dawki promieniowania przede wszystkim podczas prac remontowych, gdy otwierają zbiorniki ze skażoną wodą lub zawory, na których osadziły się zaktywowane 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, a z drugiej strony zapewnić maksymalną czystość obiegów reaktora w czasie normalnej pracy EJ, tak by w obiegach tych nie gromadziły się materiały promieniotwórcze. Dlatego w obniżaniu dawek wielką rolę gra ulepszanie konstrukcji i materiałów EJ. Np. z konstrukcji stykających się z wodą przepływającą przez rdzeń reaktora usuwa się materiały ulegające aktywacji pod

<sup>2</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 jądowej).

## Dawki przy normalnej pracy EJ

wpływem promieniowania neutronowego w rdzeniu, takie jak np. kadm. Dzięki temu ilość zanieczyszczeń rozpuszczonych w wodzie obiegu pierwotnego i krążących wraz z nią w reaktorze jest mniejsza, a co za tym idzie, mniejsze jest ich promieniowanie i mniejsze są dawki otrzymywane przez personel przy remoncie urządzeń. Równolegle postępuje podnoszenie szczelności paliwa – tak by nie wyciekały z niego do wody produkty rozszczepienia – i podnoszenie szczelności obiegu pierwotnego.

Podejmuje się też wysiłki dla usprawnienia pracy w rejonach promieniowania. Przynosi to rezultaty – okresy przestojów remontowych w elektrowniach są skracane, a dawki stale maleją. Dla większych prac remontowych, takich jak wymiana wytwornic pary, przygotowania 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. Ogromnie ważny wpływ ma zdobywanie doświadczenia. Przykładem może być wymiana wytwornicy pary w Doel 3 (Belgia) pracownicy otrzymali dawkę kolektywną 1,9 os-Sv, to przy powtórzeniu tej operacji w EJ Tihange 1 w 1995 r. dawka była mniejsza (1,6 os-Sv), a przy podobnych operacjach w trzech następnych blokach jądrowych w Belgii w latach 1996-2001 dawki kolektywne wynosiły około 0,64 os-Sv. [2]. Podobnie w 1993 r. przy wymianie wytwornicy 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. [3].

W elektrowniach amerykańskich dawki kolektywne były najwyższe w roku 1980, gdy wykonywano szereg przeróbek wynikających z doświadczeń z awarii w Harrisburgu (EJ TMI-2) w 1978 roku. 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. [4]. W krajach UE redukcja dawek była jeszcze skuteczniejsza – np. w EJ 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 [5]. 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. 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, te dawki indywidualne ustalono z dużym marginesem bezpieczeństwa w stosunku do dawek, przy których obserwuje się ujemne skutki zdrowotne promieniowania tj. 100-200 mSv [6]. Jednocześnie we wszystkich krajach kładzie się nacisk na maksymalną redukcję dawek zgodnie z zasadą ALARA. Np. w Słowenii planowanie prac pod kątem maksymalnej redukcji dawek w granicach rozsądku (ALARA) wymagane jest dla wszystkich prac, przy których maksymalna dawka indywidualna przekracza 5 mSv, lub dawka kolektywna jest większa niż 0,01 os-Sv. Stosowanie zasady ALARA kontrolowane jest przez komitet ALARA, powoływany na najwyższym szczeblu zarządzania elektrownią [7].

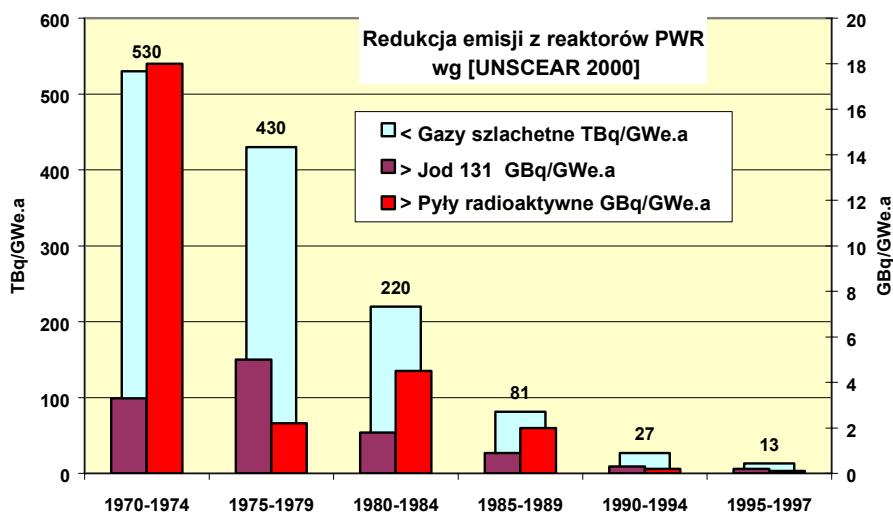
Z każdym rokiem do reaktorów wprowadza się kolejne ulepszenia, a dawki promieniowania otrzymywane przez pracowników maleją. W Niemczech, gdzie pracują reaktory czterech typów budowane w kolejnych fazach rozwoju energetyki jądrowej, dawki kolektywne w EJ z

reaktorami trzeciego typu obniżono w 2000 r. do 0,7 os-Sv na blok rocznie, a w EJ z reaktorami czwartego, najnowszego typu nawet do 0,18 os-Sv na blok rocznie! [8].

Biorąc pod uwagę, że proponowany przez konsorcjum francusko-niemieckie nowy reaktor EPR ma wszystkie zalety najnowszych reaktorów w Niemczech i we Francji, a ponadto szereg dodatkowych ulepszeń opracowanych przez najlepsze zespoły projektowe w UE, można oczekiwać, że dawki dla pracowników przyszłych polskich EJ będą naprawdę bardzo małe. Analizy radiologiczne przeprowadzone dla budowanej obecnie elektrowni w Olkiluoto z reaktorem EPR potwierdzają te oczekiwania [9].

## 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 EJ 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 EJ 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 [10]. 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>3</sup> wynosiła średnio  $2 \cdot 10^{-6}$  na osobę na rok. Od tej pory wydzielania produktów rozszczepienia z reaktorów jądrowych do otoczenia elektrowni stale malały. Na rys. 2 pokazano spadek wydzielenia jodu, gazów szlachetnych i pyłów radioaktywnych do atmosfery z elektrowni jądrowych z reaktorami PWR (dane z [11]).



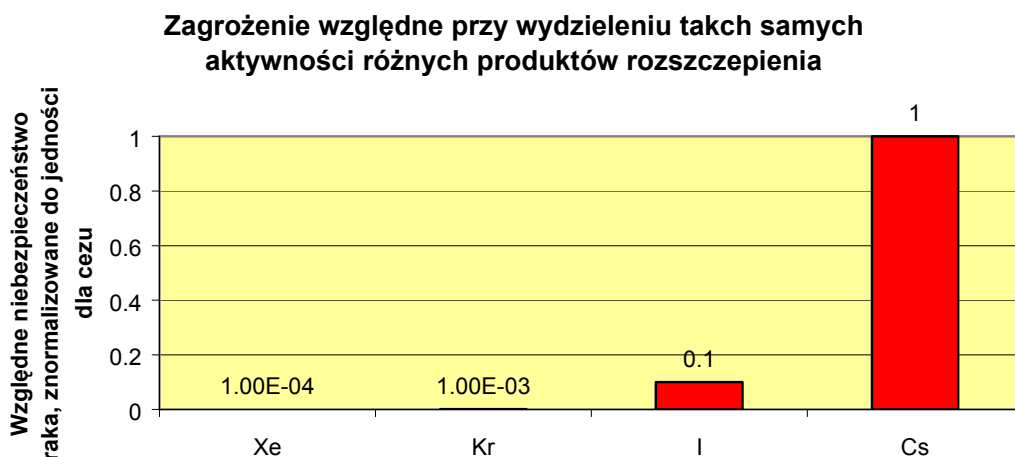
**Rys. 2 Redukcja emisji z reaktorów PWR-, dane liczbowe z [11]**

Warto tu dodać, że nie wszystkie produkty rozszczepienia są równie groźne. Do najgroźniejszych należą pyły radioaktywne (takie jak cez czy stront), które dostają się do organizmu człowieka i pozostają w nim długo, bo ich okres zaniku jest długi. Mniej groźny jest jod, który wprawdzie osadza się w tarczycy, ale stosunkowo szybko zanika (okres połowicznego zaniku izotopu J-131 to 8 dni, a dla innych izotopów jodu mniej). Jak pamiętamy z poprzedniego

<sup>3</sup> Krytyczna grupa ludności – grupa najbardziej zagrożona, np. w przypadku ludności wokoło EJ jest to zwykle grupa niemowląt, lub dzieci w wieku 2-7 lat, zamieszkających w rejonie wokoło EJ.

artykułu, badania wielu osób, które napromieniowywano jodem w celach diagnostycznych lub leczniczych, nie wykazały żadnego wzrostu zachorowań na raka [12]. 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 (mierzonej w liczbie rozpadów promieniotwórczych na sekundę, tj. Bq) gazów szlachetnych (krypton Kr, ksenon Xe), jodu (J) i ceszu (Cs) pokazano na rys. 3 (dane z [13]). Zagrożenie ze strony ceszu jest największe, bo ma on okres połowicznego zaniku 30 lat, a więc pozostaje w otoczeniu człowieka długo po kompletnym zniknięciu jodu i gazów szlachetnych.



**Rys. 3** Względne zagrożenie zachorowaniem na raka powodowane wydzieleniem pewnej aktywności produktów rozszczepienia, znormalizowane do jedności dla ceszu. Jak widać jod jest mniej groźny, a gaz szlachetne powodują znikomo małe zagrożenie. Dane do wykresu zaczerpnięte z [13].

Teraz, gdy zdajemy sobie sprawę z wielkości względnych zagrożeń, popatrzmy jeszcze raz na rys. 2. Jak widać, wysiłki energetyki jądrowej szły głównie w kierunku redukcji emisji ceszu, jodu i innych pyłów radioaktywnych, i przyniosły dobre rezultaty. Jak podaje [14], średnie uwolnienia z EJ z reaktorami PWR w krajach UE w 2003 roku mierzone na wyprodukowanej jednostkę energii elektrycznej wyniosły dla gazów szlachetnych 4,9 GBq/GWh, a dla jodu i aerozoli odpowiednio 0,000025 i 0,000042 GBq/GWh [14], a więc były ponad sto tysięcy razy mniejsze. Najgroźniejsze izotopy są najskuteczniej zatrzymywane.

Najbardziej reprezentatywne dla rozwoju energetyki jądrowej w Europie są elektrownie francuskie. 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. [6]. 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 4x1450 MWe emitują w sumie poniżej 4 TBq gazów szlachetnych i trytu, a poniżej 0,4 GBq jodów i pyłów radioaktywnych razem. Z rysunku 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! [6]. Wielkości tych nie można pokazać na rys. 2, bo pokrywają się z osią poziomą.

Biorąc pod uwagę ulepszone możliwości techniczne elektrowni jądrowych, urząd dozoru jądowego Francji ustalił dla ostatnio zbudowanych EJ z reaktorami 1450 MWe limity 10 razy niższe niż dla poprzednich bloków 1300 MWe. Podczas gdy dawne limity dla EJ z dwoma reaktorami o mocy 1300 MWe wynosiły 110 GBq dla jodu i aerosoli łącznie, a 3300 TBq dla gazów szlachetnych łącznie z trytem i C-14, dla nowych EJ w Chooz i Civaux limity te wynoszą odpowiednio 11 GBq i 330 TBq, chociaż moc tych EJ 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 EJ 2 x 1300 MWe wg starych i obecnych przepisów pokazane są w Tabl. 1.

**Tablica 1 Emisje dozwolone i rzeczywiste w EJ we Francji pracujących na podstawie zezwoleń pierwotnych (stare limity) i obecnych, odnowionych na bazie nowych przepisów (nowe limity) [6].**

EJ	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”

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 [6].

W innych krajach emisje są również systematycznie redukowane.

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

Wielkość rekomendowanej dawki dopuszczalnej dla ludności powodowanej przez instalacje jądrowe określiła Międzynarodowa Komisja Ochrony Przed Promieniowaniem (ICRP) jako 1 mSv/rok. Wielkość tę przyjęto jako obowiązującą w krajach Unii Europejskiej. Dodatkowo w niektórych krajach urzędy dozoru jądowego 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).

W Niemczech dla promieniowania z EJ ustalono limit równy 0,3 mSv/rok. W Finlandii urząd dozoru jądowego 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.

## Dawki przy normalnej pracy EJ

W metodyce określania emisji dopuszczalnych urzędy dozoru przyjmują założenia niekorzystne, tak by w rzeczywistości dawki były mniejsze od dozwolonych. Granice uwolnień ustalane są przez dozór jądrowy w wiodących krajach UE w taki sposób, by dawki roczne od uwolnień gazowych i ciekłych nie przekraczały wielkości podanych w tabelicy 2. Ponadto elektrownie starają się utrzymać emisje na poziomie jak najmniejszym zgodnie z zasadą ALARA. W efekcie rzeczywiste dawki wokoło EJ są znacznie mniejsze od dozwolonych.

**Tabl. 2 Efektywne dawki graniczne do określenia dopuszczalnych uwolnień z EJ**

Kraj	Dawka od uwolnień gazowych		Dawka od uwolnień ciekłych		Źródło
	Na całe ciało	Na dowolny organ	Na całe ciało	Na dowolny organ	
Belgia	50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	150 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	30 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	100 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	2
Czechy	200 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$		50		15
Finlandia	100 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od promieniowania zewnętrznego i wchłaniania substancji promieniotwórczych łącznie				16
Francja	1000 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od promieniowania zewnętrznego i wchłaniania substancji promieniotwórczych łącznie				6
Niemcy	300 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	1800 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	300 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	1800 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	8
Słowenia	50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od wszystkich uwolnień radioaktywnych + 200 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od promieniowania zewnętrznego od urządzeń EJ				7
Hiszpania	100 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ łącznie od wszystkich emisji z EJ				14
Szwajcaria	300 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od EJ, w tym 100 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ z promieniowania bezpośredniego i 200 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od emisji				3
W. Brytania	300 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od jednego bloku, 500 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od EJ z wieloma blokami i 1000 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ od wszystkich źródeł łącznie z promieniowaniem dawnych emisji, ale poza medycyną.				17
USA	50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}^*$	150 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	30 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	100 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$	4

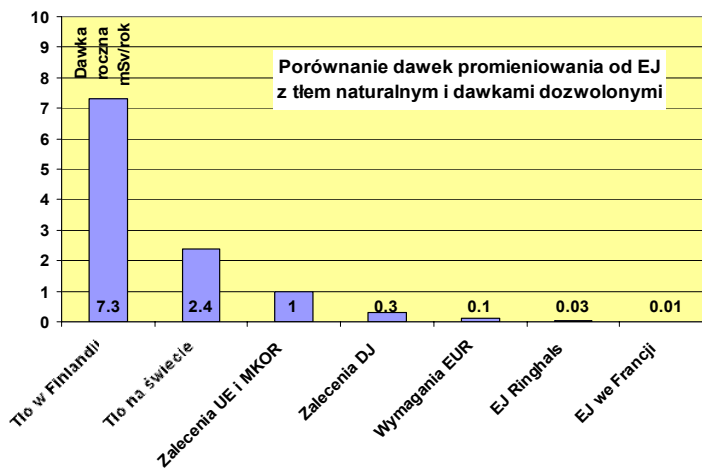
\* Ponadto w USA obowiązuje zasada, że należy zmniejszać dawki dla ludności, gdy koszt potrzebnych do tego środków jest mniejszy niż 100 000 \$/os-Sv [4].

We francuskiej EJ 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 [18].

Podobnie w USA uwolnienia średnie ze wszystkich EJ są 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 (500 000 osób) studium amerykańskiego Instytutu Chorób Nowotworowych potwierdziło, że nie ma żadnych oznak wzrostu zachorowań na raka w sąsiedztwie instalacji jądrowych w USA [19].

W Szwajcarii dawki wokoło EJ 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 [3]. 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 długo życiowych 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 – jakie też było promieniowanie w sąsiedztwie EJ w chwili owej awarii? Wyższe niż średnie tło promieniowania na Ziemi (2,4 mSv/rok), czy takie jak średnio w Finlandii (7 mSv/rok), czy tak wysokie jak w Ramsar w Iranie (70 mSv/rok)? O nie, owo natężenie awaryjne w szczycie wyniosło 0.1 mSv/rok, a więc było 20 razy MNIEJSZE od normalnego poziomu tła promieniowania [3].

A przy tym EJ Muehleberg to elektrownia bardzo stara. 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 MKOR (1 mSv/rok), Unii Europejskiej (UE) i od wymagań urzędów dozoru jądrowego (DJ). Wymagania te są różne, na rys. 4 pokazano poziom wymagany w Niemczech (0,3 mSv/rok).



**Rys. 4 Porównanie dawek promieniowania od EJ z tłem naturalnym i dawkami dozwalnymi.**

Dawka rzeczywista dla krytycznej grupy ludności wokoło EJ Ringhals (Szwecja) wynosi 0.03 mSv/rok. Dawki wokoło innych EJ w Szwecji są jeszcze mniejsze. We Francji dawki dla krytycznej grupy ludności wokoło EJ wynoszą około 0.01 mSv/rok [6]. Średnia moc dawki dla ludności Francji, gdzie przecież energia jądrowa dostarcza 80% potrzebnej krajowi energii elektrycznej, wynosi 0,001 mSv/rok [6], a więc jest pomijalnie mała według wszelkich ocen, czy to formułowanych przez Francuską Akademię Medyczną, czy przez ICRP lub UNSCEAR.

W Finlandii dawki dopuszczalne dla ludności powodowane pracą EJ ustalono na 0,1 mSv/rok. [16]. Przy przyjęciu niekorzystnych założeń, dawka efektywna, którą mogła spowodować praca EJ 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 EJ 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 pozostaną bez zmiany na poziomie 0,1 mSv/rok [16].

## Dawki przy normalnej pracy EJ

Przy przyjęciu niekorzystnych założeń teoretycznie możliwa dawka roczna dla najbardziej narażonej osoby w sąsiedztwie EJ powodowana pracą Olkiluoto 3 została oceniona na 0.014 mSv/rok. W oparciu o doświadczenie eksploatacyjne EJ w Niemczech i we Francji 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 EJ 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 [16].

Polski czytelnik nie powinien sądzić, że wyniki Szwajcarów, Niemców czy Amerykanów są dla nas nieosiągalne ze względu na różnice w kulturze technicznej i uwarunkowania społeczne. W sąsiadującej z nami Słowacji w końcu lat 80-tych budowano EJ z dwoma reaktorami typu WWER 400, podobnymi do budowanych w Polsce reaktorów w EJ Żarnowiec. Po zmianie ustroju na Słowacji zatrzymano budowę EJ 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 tak małe, że nie daje się ich mierzyć. Gdy dokonano obliczeń, okazało się, że w ciągu 6 lat od chwili uruchomienia EJ Mochovce roczne dawki dodatkowe powodowane przez tę elektrownię nigdy nie przekroczyły jednej MILIONOWEJ siwerta (wahały się od 0,1 do 0,7 mikroSv). [7]. Podobnie na Węgrzech roczne dawki efektywne w odległości 3 km od EJ Paks z 4 reaktorami WWER 440 wynoszą od 0,1 do 0,5 mikroSiwerta [20]. 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 EJ z najnowszymi reaktorami, dostarczoną 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 założeń pesymizujących.

### **Ryzyko powodowane bliskością elektrowni jądrowej**

Zgodnie z Encyklopedią Energii z 2004 roku, następujące czynności powodują ten sam wzrost ryzyka, równy prawdopodobieństwu zgonu 1 na milion w ciągu 1 roku:

Dawki otrzymywane od źródeł naturalnych lub wskutek działań człowieka, mSv	
420	Dawka roczna kosmonauty na orbicie
300	Dawka roczna od promieniowania naturalnego w Ramsar (Iran)
20	Dawka roczna w niewietrzonym domu na podłożu granitowym
3,6	Dawka roczna od promieniowania naturalnego na wysokości 1500 m npm.
2,4	Dawka roczna średnia na ziemi od źródeł naturalnych
0,7	Dawka otrzymywana przy prześwietleniu rentgenowskim płuc
0,06	Dawka od promieniowania kosmicznego podczas lotu Warszawa-New York-Warszawa
<0,01	Dawka otrzymywana podczas tygodniowego pobytu na nartach w górach
<0,001	Dawka roczna w najbliższym sąsiedztwie elektrowni jądrowej

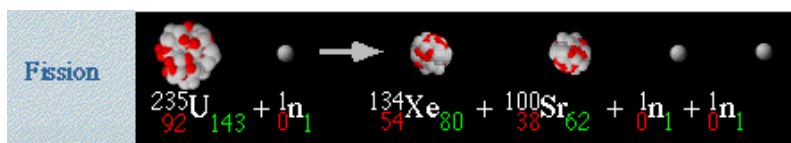
- Wypalenie 1,4 papierosa
- Jazda 16 km na rowerze
- Zjedzenie 40 łyżek stołowych masła z orzeszków ziemnych
- Wypicie 30 puszek dietetycznego napoju gazowanego zawierającego sacharynę
- Mieszkanie przez 50 lat w odległości 8 km od reaktora jądrowego [21].

Porównania te mogą budzić sprzeciw, 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 dalszych artykułach, po omówieniu problemu awarii w elektrowni jądrowej, który budzi żywe emocje, szczególnie od czasu awarii w Czarnobylu. Ale porównanie wielkości dawek występujących typowo wokoło elektrowni jądrowych z dawkami z innych źródeł pokazane na rysunku obok obrazuje jak znikome jest zagrożenie ze strony EJ.

Dodatkowa moc dawki poniżej 0.001 mSv/ rok powodowana przez EJ jest niezauważalnym przyrostem na tle wahań promieniowania tła naturalnego.

## Jak osiągamy tak małe uwolnienia poza elektrownię?

W rdzeniu reaktora zachodzi reakcja łańcuchowa rozszczepienia uranu, która wytwarza ciepło, ale też i powoduje emisję promieniowania. Przykład takiej reakcji pokazano na rys. 5. Ksenon i stront to dwa spośród wielu izotopów promieniotwórczych, które mogą powstać po rozszczepieniu uranu i ulegać dalszemu rozpadowi, emitując promieniowanie alfa, beta i gamma.



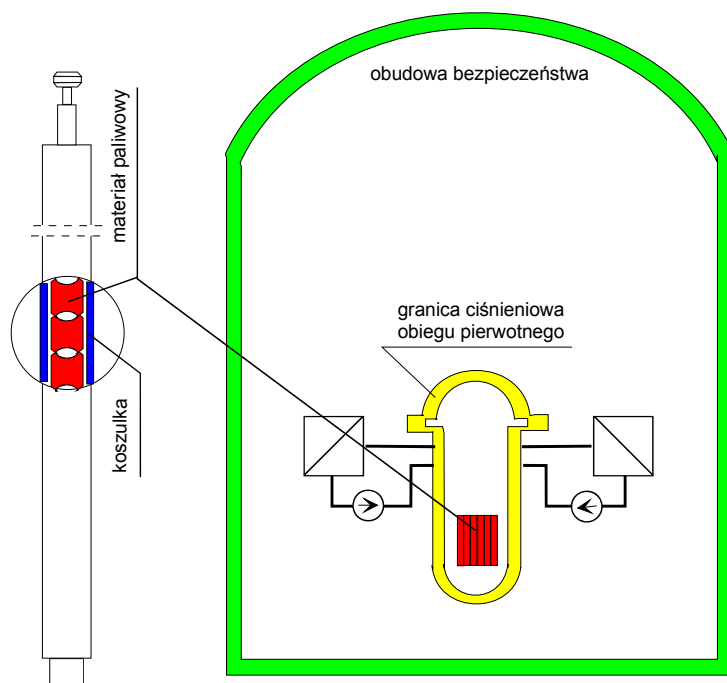
**Rys. 5 Przykład reakcji rozszczepienia.** Po uderzeniu neutronu w jądro uranu U-235 następuje rozszczepienie uranu, wyrzucenie jąder produktów rozszczepienia niosących ogromną energię kinetyczną (około 168 MeV<sup>4</sup>) i ulegających dalszym rozpadom radioaktywnym, oraz emisja promieniowania gamma i wyrzucenie dwóch lub trzech neutronów, mogących powodować dalsze rozszczepienia. Łącznie jedno rozszczepienie powoduje wydzielenie energii około 200 MeV

<sup>4</sup> MeV – Milion elektronowoltów – energia równa 1,6 10<sup>-10</sup> Ws.

## Dawki przy normalnej pracy EJ

Przed bezpośrednim promieniowaniem emitowanym podczas reakcji rozszczepienia chronimy się otaczając rdzeń reaktora grubymi osłonami z żelazobetonu, które jak się okazało w ostatnich latach mogą też skutecznie chronić rdzeń reaktora przed zamachami terrorystów. Bardziej skomplikowany problem przedstawia możliwe wydzielanie produktów rozszczepienia z paliwa do wody chłodzącej rdzeń i rozprzestrzenianie ich w obiegu pierwotnym, a w razie jego nieszczelności – poza obieg. Jak widzieliśmy z liczb podanych powyżej, w stosunku do aktywności znajdującej się w rdzeniu wydzielania poza elektrownią są znikomo małe, praktycznie zerowe. Jak udaje się to osiągnąć?

Nie jest to zadanie łatwe i konstrukcja bezpiecznego reaktora kosztuje drogo. Dlatego nakłady inwestycyjne na budowę EJ są tak wysokie – układy elektrowni, tworzące wspólnie system barier powstrzymujących uwalnianie produktów rozszczepienia - muszą zapewnić zatrzymywanie produktów rozszczepienia wewnątrz elektrowni zarówno w czasie normalnej eksploatacji jak i podczas stanów przejściowych, a także awaryjnych.



Schemat układu barier w EJ pokazany jest na rys. 6. Produkty rozszczepienia powstają w paliwie uranowym i pozostają w nim podczas pracy i po wyłączeniu reaktora. Droga, jaką przebywają jądra izotopów powstających przy rozszczepieniu jest bardzo krótka, rzędu mikronów, tak że ponad 99% produktów rozszczepienia nie opuszcza pastylek paliwowych. Tak więc samo paliwo stanowi pierwszą barierę, powstrzymującą uwalnianie produktów rozszczepienia.

**Rys. 6 Schemat barier w EJ powstrzymujących uwolnienia produktów rozszczepienia.**

Produkty rozszczepienia w postaci gazowej (jak ksenon lub krypton) lub takie jak jod czy cez, lotne w wysokich temperaturach (500-2000 °C) panujących w paliwie, częściowo wydostają się poza pastylki paliwowe, ale zatrzymywane są przez otaczające paliwo koszulki z cyrkonu, materiału bardzo wytrzymałego i odpornego na wysokie temperatury. Koszulki te stanowią drugą barierę chroniącą przed wyjściem produktów rozszczepienia. Od zewnątrz koszulki omywane są wodą, odbierającą od paliwa energię rozszczepienia w postaci ciepła, przenoszonego na zewnątrz reaktora w celu wytworzenia pary wodnej napędzającej turbogeneratory.

Stężenia produktów rozszczepienia w wodzie są stosunkowo małe i ściśle kontrolowane, a w razie nagłego wzrostu tych stężeń reaktor zostaje wyłączony, znajduje się nieszczelne elementy paliwowe i usuwa się je z rdzenia. Woda chłodząca płynie w obiegu, którego ścianki, zawory itd. wykonane są z najwyższą starannością, z najlepszych materiałów, i podlegają kontroli podczas pracy i po wyłączeniu reaktora. Granica ciśnieniowa tego obiegu chłodzenia, zwanego obiegiem pierwotnym, stanowi trzecią barierę powstrzymującą uwalnianie produktów rozszczepienia. Na koniec, cały obieg pierwotny otoczony jest szczelną obudową bezpieczeństwa, stanowiącą kopułę ze zbrojonego betonu, często z dwóch koncentrycznych warstw, z dodatkową wykładziną stalową od wewnątrz, zwiększającą

szczelność obudowy będącej ostatnią, czwartą kolejną barierą chroniącą otoczenie elektrowni przed wydostaniem się produktów rozszczepienia na zewnątrz.

Te cztery bariery zapewniają niemal całkowite powstrzymanie produktów rozszczepienia w granicach elektrowni. Przykładem skuteczności systemu barier ochronnych elektrowni jądrowej jest Tablica 3 pokazująca rozkład względny w EJ 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.

**Tabl 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	0,01	1/100 tys.	1/100 mln	<b>1/ 100 mld</b>
Sr-89	1	0,001	1/10 mln	1/10 mld	<b>1/mln mld</b>

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.

Warto dodać, że bariery te są konstrukcjami trwałymi, i ani materiał pastylek paliwowych, ani koszulki cyrkonowe, ani rurociągi obiegu pierwotnego nie mogą być „wyłączone” z systemu barier, tak jak podejrzewają przeciwnicy elektrowni jądrowych, przekonani że inżynierowie jądrowi w dążeniu do brudnych zysków gotowi są do wyłączania zabezpieczeń i skażenia środowiska. Ostatnia bariera, ponad metrowej grubości żelazo-betonowa obudowa bezpieczeństwa też nie może zniknąć.



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. 6. EJ Loviisa w zimie**

Poza kontrolą rządową i nadzorem ONZ wydzielania z elektrowni jądrowych są obserwowane przez organizacje antynuklearne, które wykorzystują każdą okazję by wzbudzać protesty publiczne przeciw pracy EJ. 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 pozostaje osiągnięciem, do którego mogą tylko dążyć inne gałęzie przemysłu.

### Literatura

1	<a href="http://www.wano.org.uk/PerformanceIndicators/PI_TriFold/PI_2004_TriFold.pdf">http://www.wano.org.uk/PerformanceIndicators/PI_TriFold/PI_2004_TriFold.pdf</a>
2	KINGDOM OF BELGIUM, Third Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, National Report, Sept. 2004
3	SWITZERLAND Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety, the Third Swiss Report in accordance with article 5, July 2004,
4	THE UNITED STATES OF AMERICA Third National Report for the Convention on Nuclear Safety US NRC Sept. 2004, NUREG-1650
5	NETHERLANDS Convention on Nuclear Safety, National Report of the Kingdom of Netherlands, The Hague, Sept. 2004
6	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
7	SLOVAK REPUBLIC National report compiled in terms of the Convention on Nuclear Safety, Sept. 2004
8	GERMANY Environmental Policy, Convention on Nuclear Safety, Report by the Government of the Federal Republic of Germany. BMU Sept. 2004
9	RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITY (STUK): Statement Issued by the Radiation and Nuclear Safety Authority Concerning the Construction of the Olkiluoto Nuclear Power Plant Unit 3, Annex 1 21.1.2005 Safety Assessment of the Olkiluoto 3 Nuclear Power Plant Unit for the Issuance of Construction License
10	US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, US NRC Policy Statement on Nuclear Power Plant Safety Goals, Atomic Energy Clearing House, 32(26); (23 June 1986).
11	UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation.
12	STRUPCZEWSKI A. Oddziaływanie małych dawek promieniowania na zdrowie człowieka, Biuletyn Miesięczny czerwiec 2005, 10-25
13	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
14	SPAIN, Convention on Nuclear Safety, Third National Report, September 2004
15	CZECH REPUBLIC, National Report under the Convention on Nuclear Safety, revision 2004
16	STUK Finnish Report On Nuclear Safety Convention On Nuclear Safety September 2004 STUK-B-YTO 234
17	THE UNITED KINGDOM's Third National Report On Compliance With The Convention On Nuclear Safety Obligations Revision 3, September 2004
18	GROUPE RADIOECOLOGIE NORD CONTENTIN “Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques de leucemies associes de populations du Nord-Contentin, Synthese”, (July 1999)
19	JABLON, S., 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).
20	REPUBLIC OF HUNGARY, National Report, Convention on Nuclear Safety, Third Report, 2004
21	INHABER H.: Risk Analysis Applied to Energy Systems, Encyclopedia of Energy, Volume 5. Elsevier, 2004.