

KOSZTY ZEWNĘTRZNE WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ W UNII EUROPEJSKIEJ

Dr inż. Andrzej Strupczewski¹

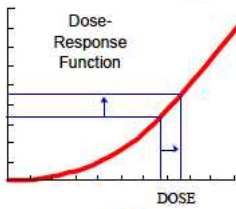
1. Wstęp

Obecne metody zaspokajania potrzeb energetycznych świata nie zapewniają możliwości zrównoważonego długoterminowego rozwoju. Od 1960 roku zapotrzebowanie energii na świecie wzrosło dwukrotnie, chociaż energochłonność na jednostkę dochodu narodowego brutto (DNB) zmalała. Przewiduje się dalszy spadek energochłonności, ale nie wystarczy on do pokrycia ogromnego wzrostu zapotrzebowania. Według ocen ONZ, liczba ludności na świecie wzrośnie z 6 miliardów w 1999 roku do 8,1 miliardów w 2020 i 10,5 miliardów w 2100 roku. Większość tego przyrostu wystąpi w krajach rozwijających się, które obecnie zużywają znacznie mniej energii niż kraje rozwinięte. A zużycie energii elektrycznej gra kluczową rolę w ochronie zdrowia i podnoszeniu standardu życiowego człowieka. W miarę rozwoju podaży elektryczności rośnie wydajność rolnictwa, polepsza się zaopatrzenie w żywność, rośnie uprzemysłowienie, podnosi się poziom opieki zdrowotnej i wykształcenia, powstają nowe możliwości zatrudnienia, co przynosi w efekcie obniżenie umieralności dzieci, wzrost długości życia i podniesienie standardu życiowego.

Nie ulega wątpliwości, że kraje rozwijające się będą przykładać wszelkich starań dla rozwinięcia swej elektroenergetyki. Również kraje uprzemysłowione potrzebują nowych elektrowni, niezależnie od wszelkich działań na rzecz zmniejszania energochłonności naszych urządzeń. Na przykład Stany Zjednoczone ogłosiły program zbudowania 1300 nowych elektrowni o łącznej mocy 300 000 MWe w ciągu najbliższych 20 lat. Zgodnie z prognozami Światowej Rady Energetycznej, przy obecnym poziomie zużycia światowe rezerwy węgla wystarczą na 200 lat, gazu ziemnego na 60 lat a ropy naftowej na 40 lat [1]. Konieczność wprowadzenia źródeł energii innych niż paliwa organiczne staje się jasna.

Aby dokonać świadomego wyboru najlepszych dróg dalszego rozwoju elektroenergetyki trzeba zdawać sobie sprawę z pełnego bilansu skutków zdrowotnych i ekologicznych związanych z wytwarzaniem energii elektrycznej. Jednakże obciążenia środowiska i ryzyko wypadków w różnych cyklach paliwowych są różne w różnych etapach produkcji energii, charakter skutków – zdrowotnych lub środowiskowych, miejscowych, regionalnych lub globalnych, krótko terminowych lub długoterminowych, doraźnych lub chronicznych – różni się dla różnych źródeł energii, a baza danych jest także bardzo różna dla różnych opcji energetycznych. Funkcje dawka-skutek są definiowane w różny sposób, a w pewnych przypadkach były zdecydowanie zmieniane w ciągu ostatniego dziesięciolecia. W świetle tych wszystkich różnic łatwo jest usprawiedliwić ograniczenie analizy porównawczej do wybranych etapów cyklu paliwowego, lub do części relacji dawka-skutek. Ale jeśli analiza ograniczona jest do wybranych aspektów sytuacji, wyniki nie są poprawne. Na szczęście rozwój metodologii i bazy danych w skali międzynarodowej, szczególnie w prowadzonym intensywnie przez kraje Unii Europejskiej programie porównań kosztów zewnętrznych wytwarzania energii elektrycznej ExternE (*External Electricity Costs*), umożliwił wyjaśnienie wielu uprzednio niejasnych zagadnień i zapewnił wysoki poziom współczesnych analiz porównawczych. Etapy oceny kosztów zewnętrznych programie ExternE pokazane są na rysunku 1.

¹ Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądowego, Instytut Energii Atomowej, A.Strupczewski@cyf.gov.pl



Rys. 1 Etapy analiz prowadzonych w ExternE.

A – Określenie źródła emisji (technologii i miejsca) oraz wielkości emisji np. w kg/rok

B - Dyspersja – (model dyspersji w atmosferze) i wynikające stąd zwiększenie koncentracji zanieczyszczeń w powietrzu w miejscu odbioru, np. w mikrogramach pyłu PM/m^3 dla każdego z rozważanych rejonów

C- funkcja dawka-skutek (lub koncentracja- skutek) określająca skutki zdrowotne i inne, np. liczbę przypadków astmy wskutek wzrostu stężenia pyłu.

D- wycena monetarna np. koszt przypadku astmy

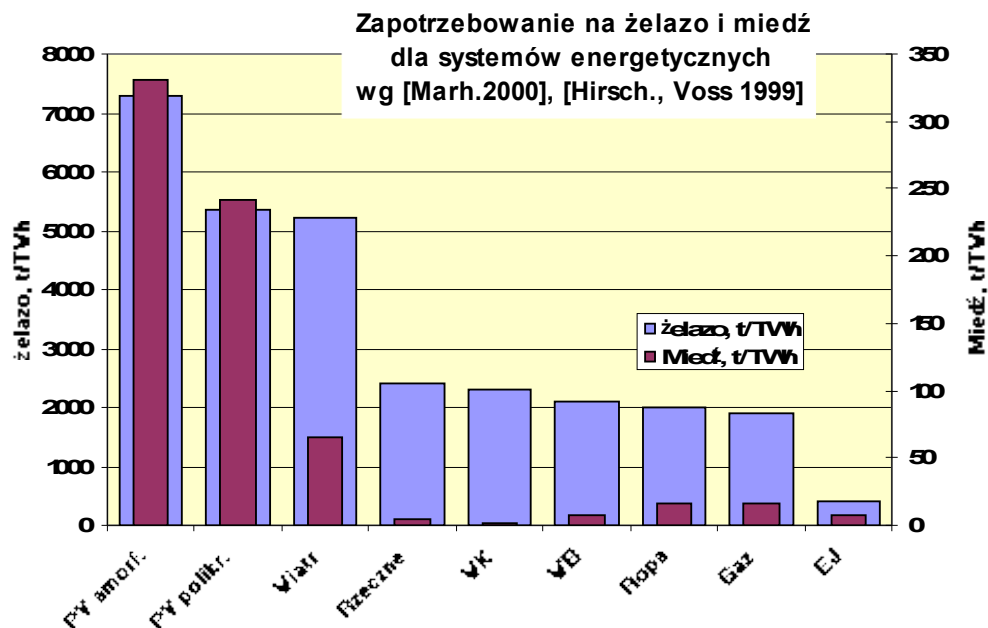
2. Analiza pełnego cyklu wytwarzania energii

Aby uchronić się przed pominięciem istotnych etapów cyklu wytwarzania energii, przyjęto zgodnie z normą ISO 14040 zasadę analizy w cyklu całego życia (*Life Cycle Analysis - LCA*), która obejmuje emisje i wypadki podczas budowy zakładów energetycznych wraz z wydobyciem surowców i produkcją urządzeń, podczas wydobycia i transportu paliwa, eksploatacji elektrowni, z uwzględnieniem magazynowania energii lub mocy rezerwowej potrzebnej w przypadku źródeł energii o działaniu przerywanym,

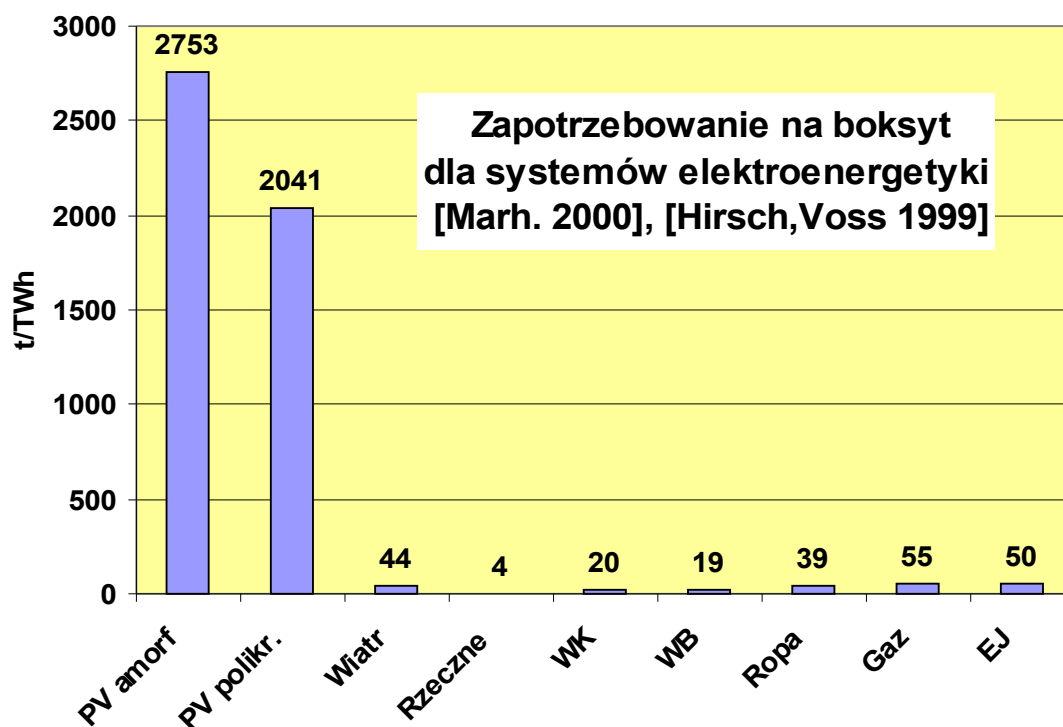
usuwania i składowania odpadów oraz likwidacji zakładów energetycznych aż do przywrócenia pierwotnego stanu środowiska.

Uwzględnienie wszystkich etapów cyklu wytwarzania energii, włączając w to etapy wstępne, jest szczególnie ważne przy analizach porównawczych tych źródeł energii, które charakteryzują się niskimi lub zerowymi emisjami w czasie eksploatacji elektrowni, ale do zbudowania elektrowni wymagają wielkich nakładów energii, materiałów i pracy. Tak właśnie jest w przypadku energii odnawialnych, szczególnie elektrowni z ogniwami foto-woltaicznymi (*photo-voltaic cell -PVC*), które z uwagi na małe wymiary pojedynczych ogniw uważane są za energo- i materiałooszczędne w porównaniu w wielkimi elektrowniami jądrowymi (EJ). W rzeczywistości ilości materiałów i energii potrzebne na jednostkę energii wytworzonej w elektrowni słonecznej są znacznie większe niż w przypadku elektrowni jądrowej lub opalanej węglem, jak pokazano na rys. 2, 3 i 4, wykorzystujących dane zebrane przez czołowy ośrodek zajmujący się kosztami zewnętrznymi w Niemczech [2, 3].

Uwzględnienie emisji przy wytwarzaniu materiałów potrzebnych dla danej technologii jest zrozumiałe i nie budzi większych kontrowersji. Bardziej dyskusyjna jest sprawa zanieczyszczeń powodowanych przez produkcję energii elektrycznej zużywanej do tego celu, a także do wytwarzania urządzeń, budowy elektrowni itd. Wielkość ta zależy nie tylko od ilości potrzebnej elektryczności, ale i od charakterystyk systemu energetycznego, który tę energią elektryczną wytwarza. W przypadku energii jądrowej całkowita ilość energii, którą trzeba dostarczyć we wszystkich etapach cyklu paliwowego by wyprodukować 1 kWh wynosi według najnowszych danych w cyklu otwartym 0,044 kWh, a w cyklu zamkniętym, dzięki mniejszej ilości pracy przy separacji uranu w przypadku odzysku plutonu z wypalonego paliwa, tylko 0,4 kWh [4]. Porównanie graficzne dla różnych źródeł energii, oparte na nieco wcześniejszych danych, pokazano na rys. 4.



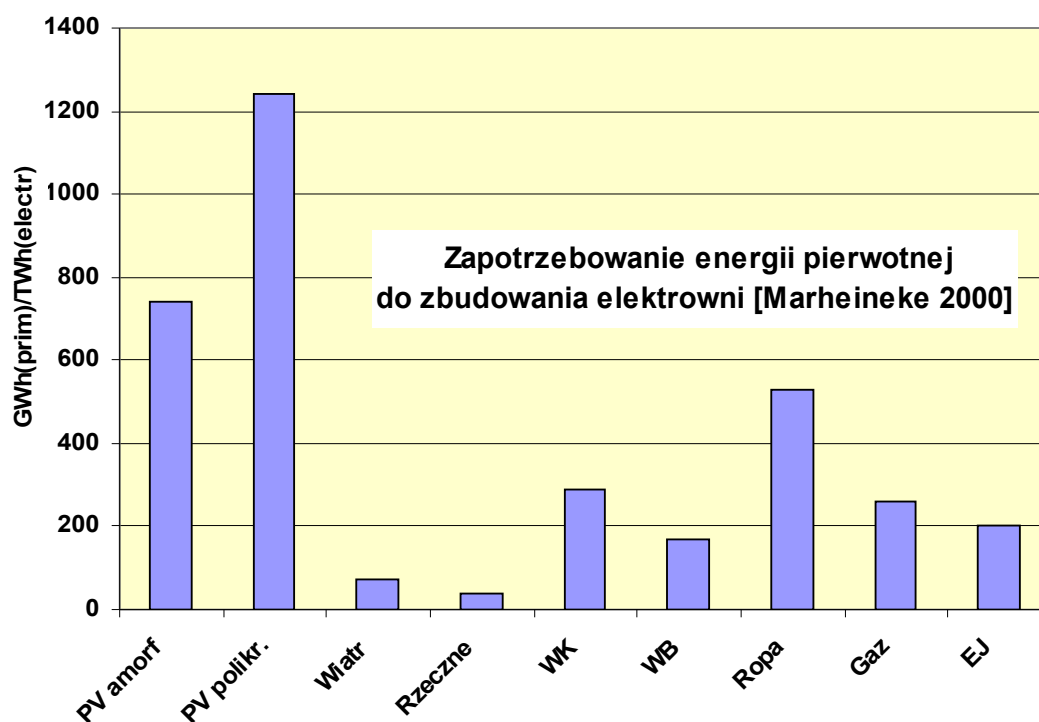
Rys. 2 Zapotrzebowanie na żelazo i miedź dla różnych systemów energetycznych, dane z [2,3].



Rys. 3 Zapotrzebowanie na boksyt dla różnych systemów energetycznych, dane z [2, 3].

Można założyć, że energia zużywana np. dla produkcji paliwa jądrowego dostarczana jest przez elektrownie jądrowe, które pracują w podstawie systemu energetycznego i mogą wobec tego pokryć zapotrzebowanie energetyczne dla całego cyklu paliwowego. Przy takim podejściu okazałoby się, że jądrowy cykl paliwowy nie powoduje żadnej emisji zanieczyszczeń chemicznych ani nie przyczynia się do efektu cieplarnianego. Jednakże w

rzeczywistości energia zużywana w produkcji paliwa jądrowego nie pochodzi wyłącznie z EJ, ale także z innych elektrowni. W przypadku energii słońca lub wiatru, które dostarczają elektryczność w sposób przerywany, konieczność wykorzystania do produkcji urządzeń i materiałów całego systemu energetycznego jest oczywista.



Rys. 4 Zapotrzebowanie na energię pierwotną dla różnych systemów energetycznych, dane z [3]

W programie ExternE przyjęto, że niezależnie od tego, czy elektrownie pracują w sposób ciągły (i mogą same pokryć potrzeby energetyczne całego cyklu) czy w sposób przerywany (i potrzebują wsparcia systemu), działania wymagające zużycia energii elektrycznej uważa się za obciążone średnimi emisjami i wypadkami obliczonymi dla całego kraju lub regionu energetycznego, gdzie znajdują się zużywające energię zakłady. Konsekwentnie, produkcja paliwa jądrowego jest obciążona emisjami wynikającymi z wytwarzania potrzebnej dla niej energii. W przypadku elektrowni słonecznych foto-woltaicznych (PV) efekt ten jest znacznie większy w związku z wielkim zapotrzebowaniem energii i materiałów na zbudowanie systemu tych elektrowni.

Innym ważnym elementem uwzględnianym w analizie porównawczej jest zapotrzebowanie na magazynowanie energii lub na moc rezerwową w systemie. Jeśli źródło energii o pracy nieciągłej, jak elektrownia wiatrowa lub słoneczna, dostarcza bardzo małą część energii elektrycznej produkowanej w systemie energetycznym, to problem mocy rezerwowej nie ma większego znaczenia. Jeśli jednak udział elektrowni słonecznych w systemie będzie znaczący, np. 20% mocy produkowanej, wówczas problem rozbieżności między szczytowym zapotrzebowaniem energii a okresem szczytowej produkcji staje się istotny. Aby dysponować energią w czasie, gdy jest ona najbardziej potrzebna, np. wieczorem, energię produkowaną przez elektrownie słoneczne trzeba magazynować, a koszty środowiskowe magazynowania są znaczne. Wobec tego, że magazynowania energii nie wprowadzono dotychczas na znaczącą

skalę, analizy porównawcze muszą uwzględniać moc rezerwową potrzebną w istniejącym systemie, którą może zapewnić energia jądrowa, paliwo kopalne lub hydroenergia. Studium [2] zakłada, że koszty rezerwy energetycznej odpowiadają kosztom średnim budowy zakładów energetycznych w danym systemie energetycznym i wykazuje, że są to wielkości znaczące.

Oceny niemieckie z 2000 roku [2] zostały potwierdzone przez opublikowane w 2004 roku studium brytyjskiej Królewskiej Akademii Inżynierskiej, które podkreśliło znaczenie mocy rezerwowych w systemie potrzebnych dla źródeł energii o charakterze przerywanym i dało wycenę finansową potrzebnych nakładów [5]. W świetle planowanego przez UE wzrostu udziału źródeł energii odnawialnej do 10% a nawet do 20 % energii wytwarzanej w systemie, pomijanie kosztów bezpośrednich i kosztów zewnętrznych wynikających z potrzebnych rezerw systemowych byłoby błędem.

3. Technologia reprezentatywna.

Interesujące sugestie odnośnie wyboru technologii reprezentatywnej dla danego rodzaju energetyki zawiera raport projektu [6] dotyczący hydroelektrowni. Analizy w tym zakresie zostały opracowane przez Norwegię, która stwierdziła, że nigdy w historii nie wystąpiły pęknięcia tam w Norwegii, a wobec tego zagrożenie społeczne związane z pęknięciem tam jest równe zeru. Założenie to zaaprobowano mimo tego, że w ciągu ostatnich 40 lat pęknięcia tam spowodowały znaczne straty zdrowia i życia. Inny przykład dostarcza studium Instytutu Paula Scherrera prowadzone przez wiele lat dla rządu szwajcarskiego na temat ryzyka wypadków w różnych gałęziach energetyki. Studium wykazało, że zagrożenie rozerwaniem tam zbudowanych w drugiej połowie XX wieku w krajach OECD jest pomijalnie małe (0.004 zgonu/GWe.a), podczas gdy zagrożenie rozerwaniem tam w krajach nie należących do OECD jest wysokie (2.1 zgonu/GWe.a) [7]. Na tej podstawie autorzy studium przyjęli dla Szwajcarii, w której poziom wymagań bezpieczeństwa jest podobny jak w krajach OECD, wskaźniki zagrożenia dla krajów OECD.

Tak więc w analizach porównawczych uwzględnia się, że baza danych służąca do przewidywania ryzyka związanego z nowymi elektrowniami musi być rozpatrywana z uwzględnieniem tła technicznego i historycznego. Jeśli po katastrofach wprowadzano zmiany, które wykluczają powtórzenie się tych katastrof, to porównawcza ocena ryzyka powinna brać te zmiany pod uwagę. Jest to ważne nie tylko dla hydroenergetyki, ale i dla energii jądrowej, której przeciwnicy wciąż twierdzą, że awaria w Czarnobylu była „typową” awarią i pomijają różnice w konstrukcji i kulturze bezpieczeństwa, wykluczające powtórzenie się awarii czarnobylskiej w reaktorach budowanych w krajach UE.

W przypadku energetyki jądrowej w krajach OECD jedyny wypadek z uwolnieniem radioaktywności do otoczenia w ciągu ponad 10 000 reaktoro-lat pracy elektrowni jądrowych zdarzył się w EJ TMI i nie spowodował ani utraty życia, ani żadnych strat na zdrowiu. Nie ma więc podstaw historycznych by oceniać zagrożenie w drodze statystycznej. Co więcej, zarówno technika jak i kultura bezpieczeństwa poszły daleko naprzód od czasu awarii w TMI, tak że proste założenie jednej awarii na 10 000 lat byłoby nie uzasadnione. Z drugiej strony potencjalne skutki awarii mogą być znacznie groźniejsze niż w przypadku TMI. Dlatego obecnie dla porównań przyjmuje się wyniki Probabilistycznej Analizy Bezpieczeństwa (*Probabilistic Safety Analysis -PSA*), w której uwzględnia się wszystkie istotne cechy bezpieczeństwa EJ, możliwości awarii struktur, systemów i elementów EJ i oblicza się prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia i uwolnienia produktów radioaktywnych. Przy probabilistycznej ocenie skutków radiologicznych przejmuje się hipotezę LNT mówiącą że

nawet najmniejsze dawki mogą zwiększać prawdopodobieństwo zgonu na raka, co jak przedstawiliśmy w pierwszym artykule w naszym cyklu daje bardzo zawyżone wyniki i jest obecnie poddawane w wątpliwość. Jest to jednak założenie konsekwentnie realizujące zasadę, że we wszystkich porównaniach przyjmuje się dla energii jądrowej najbardziej niekorzystne możliwe sytuacje.

Podobnie w przypadku EJ rozważa się tylko technologie już opanowane i wprowadzone w praktyce, a dane np. dotyczące uwolnień przyjmuje się według scenariuszy o pesymistycznych założeniach. Jest to sytuacja inna niż np. dla energii słonecznej, dla której zakłada się intensywny przyszły rozwój i ekstrapoluje się obecnie osiągnięty postęp na dziesiątki lat naprzód.

4. Uwzględnianie pełnego zakresu obciążeń środowiskowych i funkcji dawka-skutek

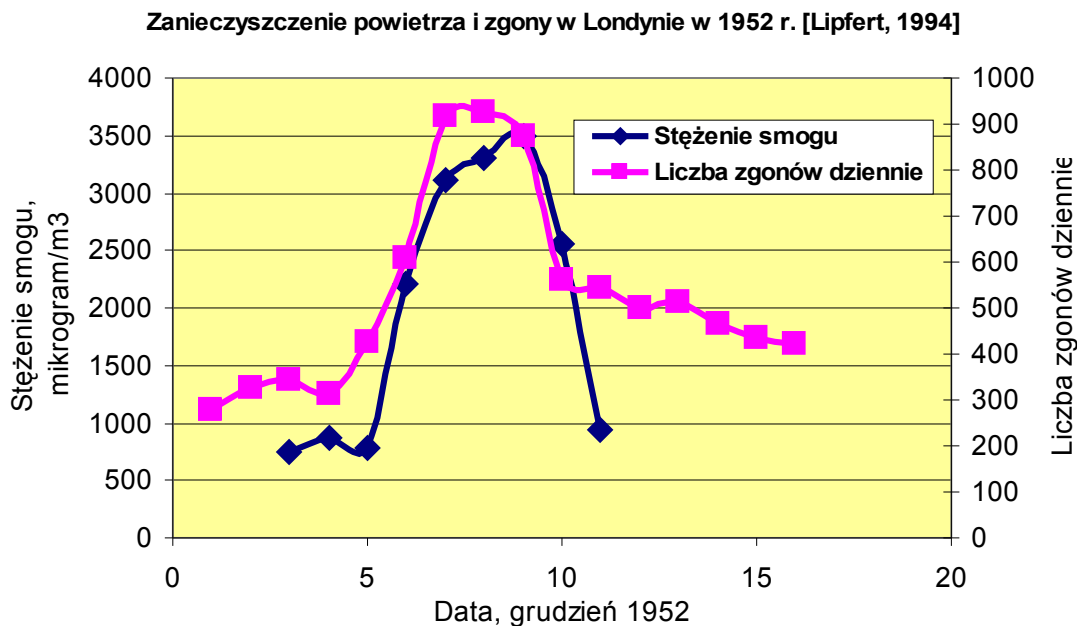
Obciążenia środowiska w analizach porównawczych powinny uwzględniać nie tylko emisje pierwotne, ale i wtórne zanieczyszczenia powodowane przez wytwarzanie energii elektrycznej. Zasadę tę uważa się za bezwzględnie obowiązującą w energetyce jądrowej, gdzie uwzględnia się wszystkie obciążenia radiacyjne, nie tylko ograniczone do radionuklidów uwalnianych z EJ, ale i te powodowane przez ich produkty rozpadu. W przypadku zanieczyszczeń konwencjonalnych konieczność rozpatrywania pełnego spektrum zagrożeń została uznana dopiero w ostatnim dziesięcioleciu. Chociaż emisje pyłu PM10² i SO₂ uznano za szkodliwe już ponad pół wieku temu, emisji tlenków azotu nie wiązano bezpośrednio z zagrożeniem zdrowia ludzkiego, i nie rozpatrywano tworzenia się pyłu drobnego wskutek przemian SO₂ i NO_x w atmosferze. Dopiero w połowie lat 90-tych uznano, że właśnie pyły drobne oznaczane PM 2.5³ są najbardziej szkodliwe dla zdrowia, ponieważ przenoszone są one w atmosferze na duże odległości i przenikają przez naturalne bariery ochronne w układzie oddechowym by osiąść głęboko w płucach powodując poważne schorzenia.

Obecnie rejestr emisji uwzględnianych w ExternE obejmuje pyły pierwotne, SO₂ i NO_x, pyły wtórne tworzone w atmosferze na bazie SO₂ i NO_x, ozon tworzony po przekształceniach NO_x w świetle słonecznym, pierwiastki toksyczne takie jak Hg, Cd i Cu unoszone z pyłem i przenikające z nim do organizmu człowieka oraz pierwiastki promieniotwórcze emitowane z różnych zakładów energetyki jądrowej i konwencjonalnej.

Skutki tych emisji zależą od wielu czynników i określane są na podstawie badań epidemiologicznych w dużych populacjach, w których stan zdrowia dziesiątków tysięcy ludzi koreluje się z poziomem zanieczyszczenia atmosferycznego różnymi substancjami. Najlepiej znanymi przykładami takich okresowego wzrostu zanieczyszczeń są epizody w Londynie w 1952 roku i w innych latach, ale rejestrowano je także w Nowym Jorku, w Osaka, Oslo i wielu innych miastach. Jak widać na rys. 5, opartym na danych z pracy [8], nie ma wątpliwości, że wzrost liczby zgonów w czasie epizodu w Londynie był skutkiem wzrostu stężenia zanieczyszczeń w powietrzu. W ciągu tygodnia łączna liczba dodatkowych zgonów przekroczyła 4000. Korelacje między liczbą nagłych zgonów dodatkowych a krótkotrwałym wzrostem stężenia zanieczyszczeń określane z takich epizodów jak w Londynie były przez wiele lat wykorzystywane jako podstawa ocen liczbowych w porównawczej analizie ryzyka.

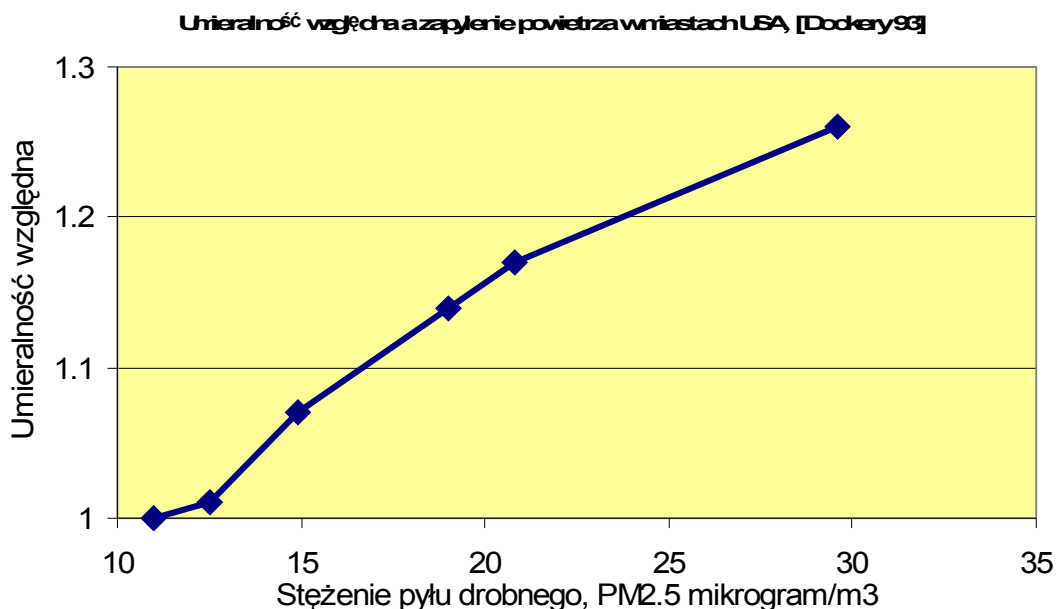
² PM 10 –(PM - *particular matter*) – pył o średnich rozmiarach 10 mikrometrów.

³ PM 2.5–pył drobny o średnich rozmiarach 2.5 mikrometra.



Rys. 5 Zanieczyszczenie powietrza i zgony w Londynie w grudniu 1952 roku, dane z [8].

Oczywiste jest jednak, że długoterminowe skutki narażenia na wdychanie zanieczyszczonego powietrza są większe niż narażenia krótkotrwałego. W związku z trudnościami metodologicznymi przez długi czas nie można było opracować korelacji opisujących takie skutki długoterminowe, ale w połowie lat 90-tych badania takie jak [9] i [10] utworowały drogę do powszechnej akceptacji korelacji uwzględniających narażenia chroniczne.



Rys. 6 Wzrost umieralności względnej przy niskich, ale długotrwałych zanieczyszczeniach powietrza w miastach USA, dane z [9].

Studium [Pope 95] obejmowało losy ponad pół miliona ludzi, a wobec braku danych europejskich dotyczących umieralności chronicznej, zostało ono przyjęte w programie ExternE jako podstawa do oceny skutków zanieczyszczenia powietrza. Wobec tego, że dane tych badań dotyczyły składu zanieczyszczeń powietrza typowego dla warunków USA, przeprowadzono adaptację funkcji dawka-skutek dla warunków europejskich wykorzystując wyniki epidemiologiczne dla umieralności nagłej w USA i w Europie. W wyniku otrzymano nieco niższe niż w USA nachylenie krzywej umieralności chronicznej. Obecnie w analizach porównawczych uwzględnia się zarówno umieralność nagłą jak i chroniczną.

W raportach ExternE z 1998 i 2000 roku zakładano, że toksyczność wszystkich siarczanów równa jest toksyczności drobnego pyłu $PM_{2.5}$ a toksyczność tlenków azotu równa jest toksyczności pyłu PM_{10} . To rozróżnienie między siarczanami a azotanami było oparte tylko na rozmiarach cząstek, z uwzględnieniem, że azotany potrzebują innych cząstek, na których się mogą skraplać, podczas gdy siarczany same wytwarzają ośrodki kondensacji i są w związku z tym mniejsze.

Wg najnowszego raportu programu ExternE [11] przyjmuje się obecnie, że toksyczność azotanów jest dwukrotnie mniejsza niż toksyczność PM_{10} , a toksyczność siarczanów i pyłów pierwotnych z elektrowni równa się toksyczności PM_{10} .

Dla umieralności przy narażeniu chronicznym, które daje dominujący wkład w koszty zewnętrzne, funkcję zależności skutków od stężenia pyłów skorygowano na podstawie badań [12], przyjmując względne ryzyko 1.05 dla stężenia $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Wraz z uwzględnieniem efektów narażenia chronicznego podjęto sprawę najlepszej definicji skutków zdrowotnych. Do połowy lat 90-tych korelowano je jako liczbę dodatkowych zgonów przypadających na dany wzrost zanieczyszczeń lub na jednostkę produkowanej energii elektrycznej (np. 37 zgonów/GWe-a energii elektrycznej z elektrowni węglowej [6]). W drugim etapie programu ExternE uzgodniono, że najlepszą miarą efektów zdrowotnych nie jest liczba dodatkowych zgonów – bo i tak wszyscy musimy kiedyś umrzeć – ale skrócenie oczekiwanego okresu życia [13]. To skrócenie życia określa się dla całej narażonej populacji jako sumę dni lub miesięcy traconych przez poszczególne osoby, podając tę sumę jako YOLL (*Years of lost life expectancy*) – liczbę lat utraconego oczekiwanego trwania życia dla narażonej populacji.

Zmiany w metodologii stosowanej przez ExternE – uwzględnienie pyłów wtórnych, efektów narażenia chronicznego i zmiana z liczby zgonów na liczbę straconych lat oczekiwanego okresu życia (YOLL) – pozwoliły na znacznie lepsze przedstawienie procesów wpływających na koszty zewnętrzne i przedstawienie wyników w sposób uwzględniający skutki chorób i zgonów w różnym wieku narażonych osób.

5. Założenia w analizach kosztów zewnętrznych energetyki jądrowej

Zasięg zanieczyszczeń. Wobec tego, że zasięg zanieczyszczeń atmosfery powodowanych przez pyły wtórne i gazy radioaktywne jest bardzo duży, analizy nie mogą być ograniczone do efektów lokalnych wokół elektrowni, ale powinny uwzględniać wpływ cyklu paliwowego w skali regionalnej lub globalnej. W przypadku kopalnych źródeł energii znaczny krok naprzód przedstawiają wyniki programu ExternE, który uwzględnia całą Unię Europejską, ale analiza ta nie jest pełna, bo pozostawia poza obrębem zainteresowań skutki w Europie Wschodniej i Azji. W analizach energetyki jądrowej z reguły uwzględnia się skutki emisji produktów radioaktywnych obejmujące cały świat.

Stopa dyskonta. Przy rozpatrywaniu zagrożeń długoterminowych proponuje się stosowanie małych, ale dodatnich wielkości stopy dyskonta dla przyszłych skutków zdrowotnych.

Odpowiada to postępowi wiedzy medycznej i techniki, który pozwoli w przyszłości na zmniejszenie skutków zanieczyszczenia środowiska i efektów zdrowotnych. Na przykład, przed stu laty zachorowanie na raka oznaczało niemal nieuchronnie śmierć, dziś natomiast połowa chorób nowotworowych jest uleczalna. Wprowadzenie stopy dyskonta chroni nasze dzieci przed ponoszeniem nadmiernych obciążeń w imię uniknięcia w odległej przyszłości ryzyka, które może okazać się znikomo małe dzięki rozwojowi naszej wiedzy.

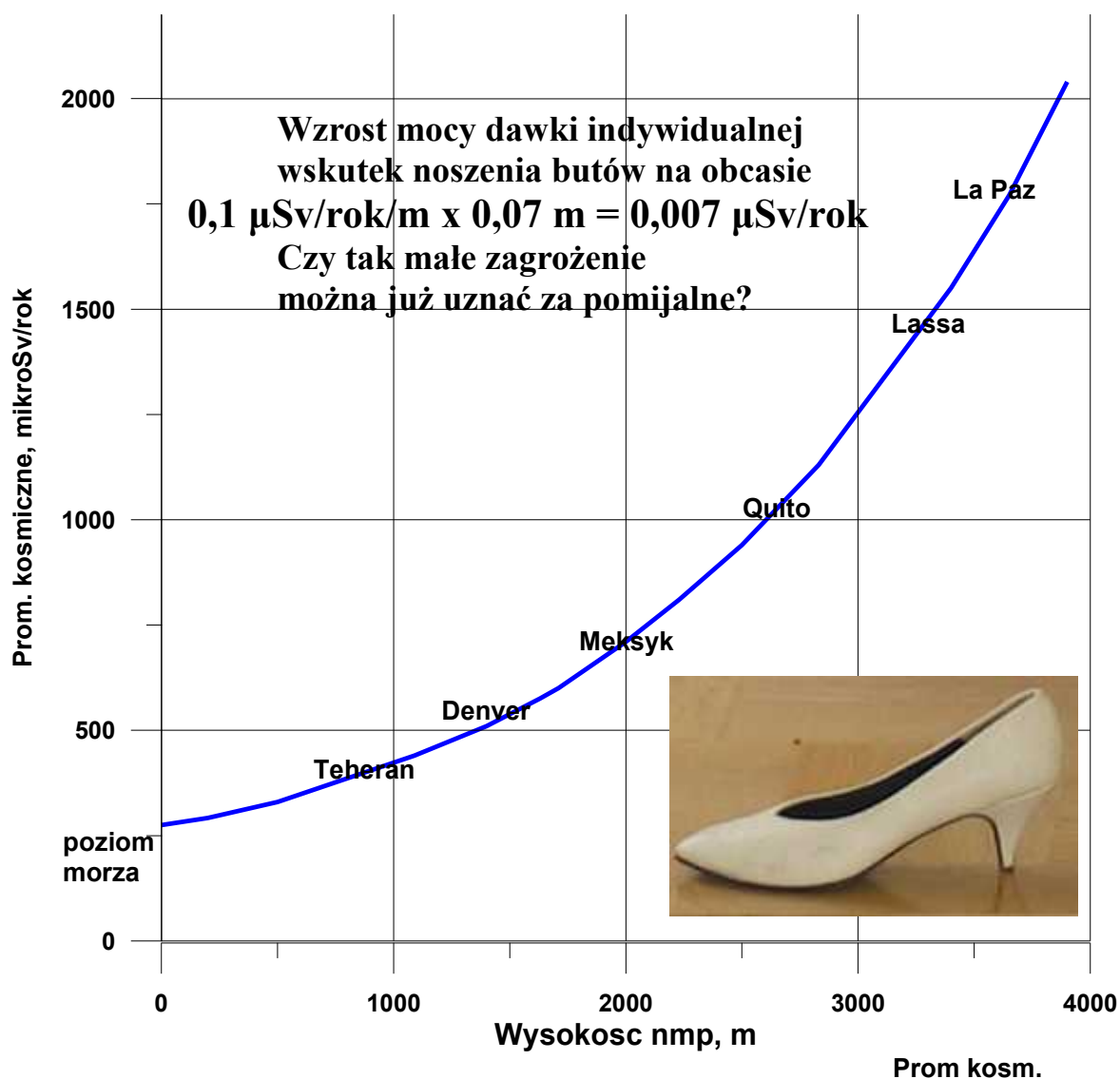
W analizach energii jądrowej zawsze uwzględniano długoterminowe skutki narażenia radiologicznego. Efekty zdrowotne w przyszłych pokoleniach uwzględniano tak jak efekty w czasie teraźniejszym to jest stosując stopę dyskonta zero. Wobec tego, że możliwe zagrożenia obliczano na wiele tysięcy lat naprzód, takie postępowanie dawało wyniki niekorzystne dla EJ.

Całkowanie zagrożeń wielokrotnie mniejszych od tła naturalnego. W latach 80-tych oraz 90-tych XX-wieku występowała tendencja do całkowania efektów bardzo małych dawek promieniowania na bardzo duże populacje i bardzo długie okresy czasu. Prowadziło to często do zniekształcenia obrazu zagrożeń. Na przykład, wydzielenia węgla aktywnego⁴ C-14 do atmosfery, powodujące minimalne wzrosty jego promieniowania w atmosferze, po scałkowaniu dawek przez 100 tysięcy lat i rozciągnięciu wyników na całą populację Ziemi dawały wskaźnik narażenia 1,88 osobo-Sv/TWh, co odpowiadało dużym liczbom teoretycznie możliwych przyszłych zgonów.

Ale chociaż w skali globalnej węgiel aktywny daje ponad 77% całkowitej dawki kolektywnej powodowanej przez jądrowy cykl paliwowy [6], to średnia dawka indywidualna powodowana rocznymi emisjami C-14 jest bardzo mała. Łącznie wskutek wytwarzania energii elektrycznej i przetwarzania paliwa wypalonego wartość średnia w okresie od 100 do 100 000 lat po emisji z cyklu EJ wynosi 2E-12 Sv/TWh. Oznacza to, że gdyby w Polsce pracowały przez 50 lat EJ produkujące połowę obecnie zużywanej energii elektrycznej tj. 70 TWh/rok, to w okresie od 100 do 100 000 lat po ich eksploatacji wzrost średniej mocy dawki od węgla aktywnego C-14 w atmosferze wyniósłby 7 10⁻⁹ Sv/rok, lub w jednostkach łatwiejszych do wyobrażenia 0,007 μSv/rok. Czy mamy się więc obawiać o zdrowie naszych prawnuków?

Jest to dawka wynosząca około trzech milionowych dawki średniej od tła naturalnego (2400 μSv/y), a mniejsza od jednej tysięcznej średniej indywidualnej dawki od naturalnego ¹⁴C (12 μSv/y). Jak wiadomo, promieniowanie zawsze było i jest wszędzie dokoła nas. Nawet zjedzenie banana czy wypicie mleka powoduje, że przyswajamy sobie pewną radioaktywność. Naturalne wahania mocy dawki są więc normalne i nie powodują zagrożenia. Aby lepiej zdać sobie sprawę z wielkości dawki określonej powyżej, przypomnijmy, że moc promieniowania dochodzącego do nas z kosmosu rośnie w miarę, jak podnosimy się coraz wyżej. Średnio w Polsce na każdy metr wysokości przypada wzrost mocy dawki o 0,1 μSv/rok. To oznacza, że gdy kobieta założy buty na wysokim obcasie (7 cm) narażona jest ona na wzrost mocy dawki od promieniowania naturalnego o 0.007 μSv/rok [14]. Tyle właśnie wyniósłby długoterminowy wzrost dawki od potężnej energetyki jądrowej zaspokajającej połowę potrzeb energii elektrycznej w Polsce. Ale nikt o zdrowych zmysłach nie sądzi, by kobieta wkładająca „szpilki” narażała się na zgon na raka, podczas gdy przeciwnicy budowy EJ energicznie atakują emisje C-14 jako „nieetyczne”, powodujące „zagrożenie radioaktywne” przyszłych pokoleń.

⁴ Nie należy mylić uwolnień węgla aktywnego C-14 z emisjami CO₂ przy spalaniu węgla. Ilości wydzielanego C-14 są śladowe, nie wpływają w żaden sposób na efekt cieplarniany, a ich możliwe ujemne skutki polegają tylko wzroście promieniowania C-14 z atmosfery.



Rys. 7 Narazenie od C-14 z EJ – i z powodu noszenia pantofli na obcasie 7 cm [14].

Niedawne rekomendacje ICRP ostrzegają przed długoterminowym całkowaniem bardzo małych dawek i podkreślają, że celem powinna być ochrona zdrowia przyszłych pokoleń na tym samym poziomie, co zdrowia obecnej generacji. „Ze względu na dodatkową niepewność odnośnie związku między dawką o szkodami zdrowotnymi w przyszłości, prognozy szkód zdrowotnych dla okresów czasu dłuższych niż kilkaset lat powinny być rozpatrzone krytycznie... Komisja sądzi, że roczna dawka indywidualna dla grupy krytycznej przy normalnym narażeniu i roczne indywidualne ryzyko dla grupy krytycznej przy narażeniu potencjalnym stanowią łącznie właściwą miarę dla porównań granicznych szkód zdrowotnych w przyszłych pokoleniach z wielkościami obecnie stosowanymi dla naszej generacji” [15].

W tym kontekście warto przypomnieć, że jak wskazywał już pierwszy artykuł w tej serii [16], sama koncepcja liniowej bez progowej (LNT) zależności skutków promieniowania od dawki jest obecnie mocno kwestionowana a wiele badań doświadczalnych wykazało, że istnieje wartość progowa, poniżej której nie zaobserwowano nigdy ujemnych skutków promieniowania [17]. Wiąże się to z faktem, że promieniowanie jest potrzebne do naturalnych procesów życiowych, a jego poziom jest dziś na Ziemi niższy niż był w okresie kształtowania się pierwszych organizmów żywych.

Jest to sytuacja zdecydowanie inna niż w przypadku zanieczyszczeń powietrza, gdzie stężenia zanieczyszczeń powodowanych przez człowieka są wielokrotnie większe niż tła naturalne, a elektrownie ze spalaniem paliw organicznych wprowadzają dodatkowe obciążenia dodające się do tych już i tak wysokich poziomów zanieczyszczenia. Na przykład stężenia SO_2 w rejonach uprzemysłowionych są wielokrotnie większe od tła naturalnego (20 do $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w stosunku do $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a dotatkowe emisje SO_2 z elektrowni nakładają się na te już i tak zbyt wysokie stężenia. Jeśli założyć, że organizm człowieka jest genetycznie przystosowany do promieniowania lub zanieczyszczeń chemicznych na poziomie tła naturalnego, to można oczekiwać, że nie wartości bezwzględne zanieczyszczeń, lecz ich stosunek do tła naturalnego powinien być miarą szkód zdrowotnych ponoszonych przez człowieka.

Takie podejście zredukowałoby zdecydowanie postulowane zagrożenia związane z energetyką jądrową i prawdopodobnie doprowadziłoby do uznania, że bardzo małe moce dawki typowe dla otoczenia EJ nie przedstawiają żadnego zagrożenia. Jednakże dotychczas we wszystkich analizach porównawczych stosowano hipotezę o zależności liniowej bez progowej LNT, tak że ryzyko szkód zdrowotnych obliczano nawet w przypadku najmniejszych mocy dawki. W szczególności w programie ExternE w raportach wydanych w latach 1995-1998 stosowano zalecenia ICRP odnośnie LNT i przyjmowano współczynniki ICRP do opisu skutków zdrowotnych małych dawek promieniowania [6, 18]. W raporcie francuskim zagrożenie całkowano przez 100 000 lat, w raporcie brytyjskim wydanym w II etapie ExternE - przez 10 000 lat [19]. Ocen tych później nie korygowano, dlatego we wszystkich porównaniach skutki bardzo małych dawek są całkowane na całą ludzkość i na wiele tysięcy lat. Takie podejście z pewnością nie faworyzuje energii jądrowej.

6. Koszty zewnętrzne jądrowego cyklu wytwarzania energii elektrycznej.

W programie ExternE pierwszy obszerny raport na temat kosztów zewnętrznych EJ opracowała Francja [6], a w następnej fazie W. Brytania i kilka innych państw, z wykorzystaniem materiałów francuskich i z korektami stosownie do ich własnej praktyki. Podane niżej wyniki oparte są o analizy brytyjskie prowadzone dla EJ Sizewell B z reaktorem PWR o mocy 1258 MWe (1188 MWe netto) pracującym ze współczynnikiem obciążenia 84,2%, a więc mniejszym niż obecnie przyjmowany i osiągnany współczynnik obciążenia równy 90%. Uwolnienia przy przerobie paliwa wypalonego oceniano uwzględniając technologię stosowaną w zakładach Sellafield w W. Brytanii, przy której uwolnienia węgla aktywnego C-14 są znacznie mniejsze niż we francuskich zakładach w La Hague. Obciążenia środowiska i zagrożenia zdrowia człowieka powodowane przez uwolnienia substancji promieniotwórczych w kolejnych fazach cyklu jądrowego według ocen brytyjskich [19] z poprawką na wyniki studium [20] przedstawiają się następująco:

Górnictwo uranowe i przerób rudy do postaci koncentratu.

Po wykonaniu analiz dla 8 wielkich ośrodków produkcji uranu w 4 krajach, które w 1997 roku wyprodukowały 2/3 uranu na świecie studium [20] wykazało, że dawka kolektywna dla osób nie narażonych zawodowo wyniosła 0,11 os-Sv/TWh. Według danych brytyjskich, dawka dla osób narażonych zawodowo wyniosła 0.7 os-Sv/TWh. Łącznie więc dawka na tym etapie wynosi 0,81 os-Sv/TWh.

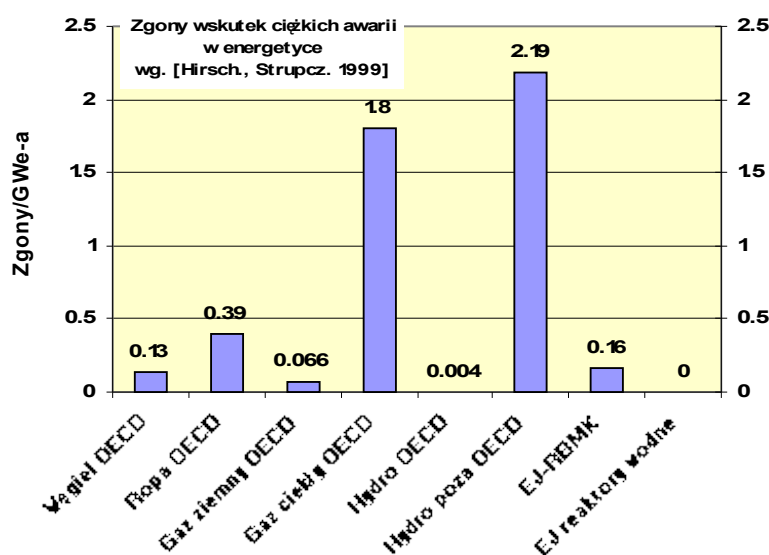
Uwolnienia do atmosfery przy konwersji, wzbogacaniu uranu i produkcji paliwa są bardzo małe, łącznie rzędu 0,05 os-Sv/TWh.

Uwolnienia podczas pracy elektrowni jądrowej są bardzo małe i znacznie niższe od wielkości dopuszczalnych. W studium brytyjskim przyjęto wielkości odpowiadające górnej granicy

projektowej, od 15 do 100 razy większe od wielkości średnich zmierzonych dla elektrowni tego samego typu pracujących we Francji, Szwecji, Szwajcarii i USA. Autorzy studium brytyjskiego przyznali, że uwolnienia te są znacznie zawyżone i będą skorygowane zgodnie z rzeczywistymi uwolnieniami średnimi. Uwzględniając te rzeczywiste uwolnienia podzielono wyniki szacunkowe w studium brytyjskim przez 10, co z dużym zapasem bezpieczeństwa daje dawkę kolektywną dla społeczeństwa równą 0,04 os-Sv/TWh. Narazenie zawodowe wynosi 0,028 os-Sv/TWh [19].

Transport materiałów radioaktywnych. Skutki zdrowotne awarii związanych z transportem materiałów radioaktywnych są bardzo małe i dotyczą głównie osób nie narażonych zawodowo. Skutki zdrowotne nie związane z promieniowaniem w przypadku studium francuskiego obejmują 0.0003 zgonu i 0.0017 urazów na TWh. To odpowiada łącznej liczbie około 0.1 zgonu i 0.7 urazu rocznie we Francji w dobie obecnej, przy rocznej generacji około 400 TWh w elektrowniach jądrowych, co jest wielkością pomijalnie małą w porównaniu z obecną liczbą zgonów i urazów powodowanych przez wypadki drogowe wszystkich rodzajów. Sprawy tej można byłoby nie dyskutować, gdyby nie akcje organizacji antynuklearnych, które wykorzystują transport paliwa wypalonego lub odpadów radioaktywnych by straszyć ludzi bajkami o radioaktywnych pociągach „świecących w nocy”. W czasie normalnego transportu niewielkie promieniowanie występuje na powierzchni pojemników transportowych i szybko maleje. Poza wagonem jest ono wielokrotnie mniejsze od tła naturalnego. Aby zaś nie dopuścić do rozsypania radioaktywnego paliwa poza pojemnik w razie awarii transportowej, pojemniki te wykonuje się tak, że są odporne na zderzenie pojazdów jadących z dużą prędkością, na upadek z dużej wysokości, na pożar itd. Chociaż przeprowadzono już dziesiątki tysięcy transportów materiałów radioaktywnych, nie było jeszcze żadnego wypadku, który spowodowałby konsekwencje radiologiczne. Koszty zewnętrzne dla transportu materiałów radioaktywnych są pomijalnie małe.

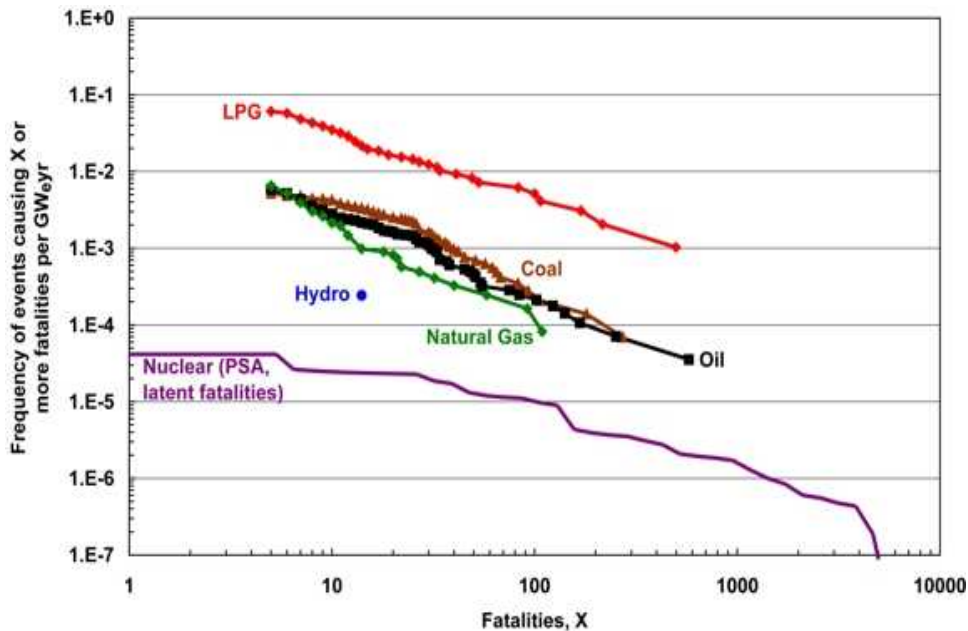
Przy przerobieniu paliwa wypalonego dawka kolektywna na jednostkę energii elektrycznej produkowanej w elektrowni jądrowej Sizewell B była obliczana z całkowaniem skutków radiologicznych przez 10 000 lat i wyniosła 0,448 os-Sv/TWh [19].



Awarie jądrowe są sprawą prowadzącą zawsze do najgorętszych dyskusji. Przeciwnicy przyjmują Czarnobyl jako podstawę do ocen przyszłych awarii, przy czym wyliczają jego skutki zdrowotne w oparciu o teoretyczne zależności przyjęte zaraz po awarii, nie odpowiadające rzeczywistości. Dane obecnie zebrane i zgodnie przyjęte przez organizacje ONZ i zainteresowane kraje wskazują, że skutki

zdrowotne Czarnobyla były niewielkie, natomiast błędne decyzje administracyjne spowodowały niepotrzebną masową ewakuację i ciężkie konsekwencje społeczno-gospodarcze [21, 22].

W ramach ExternE jako awarię reprezentatywną rozpatruje się ciężką awarię EJ połączoną ze stopieniem rdzenia i utratą szczelności obudowy bezpieczeństwa. Nie uwzględnia się przy tym szeregu naturalnych cech reaktorów PWR i BWR, które obniżają zdecydowanie wydzielenia radioaktywności. Pomimo to, ryzyko awarii w EJ okazuje się o wiele mniejsze niż w instalacjach związanych z innymi źródłami energii. Na rys. 8, zaczerpniętym z [23], pokazano porównanie historycznych danych o skutkach awarii w różnych systemach energetycznych.



Rys. 9 przedstawia porównanie wyników probabilistycznych otrzymanych również w Szwajcarii w studium prowadzonym przez wiele lat na polecenie rządu szwajcarskiego, który trudno podejrzewać o faworyzowanie energii jądowej [24]. Na osi poziomej widać

liczbę możliwych zgonów w razie awarii, a na osi pionowej częstość wydarzeń powodujących X lub więcej zgonów na jednostkę wyprodukowanej energii elektrycznej (1 GW-rok). Ocenę zagrożeń jądowych oparto o analizy dla starej elektrowni jądowej w Muehlebergu. Chociaż nie ma ona tak dobrych układów bezpieczeństwa jak EJ przewidziane do budowy w Polsce, okazała się ona znacznie bezpieczniejsza niż inne źródła energii rozważane do zastosowania w Szwajcarii. Prawdopodobieństwo awarii mogącej spowodować np. 100 zgonów jest dla EJ 100 razy MNIEJSZE niż dla gazu ziemnego, hydroelektrowni lub węgla, a około 500 razy MNIEJSZE niż dla LPG.



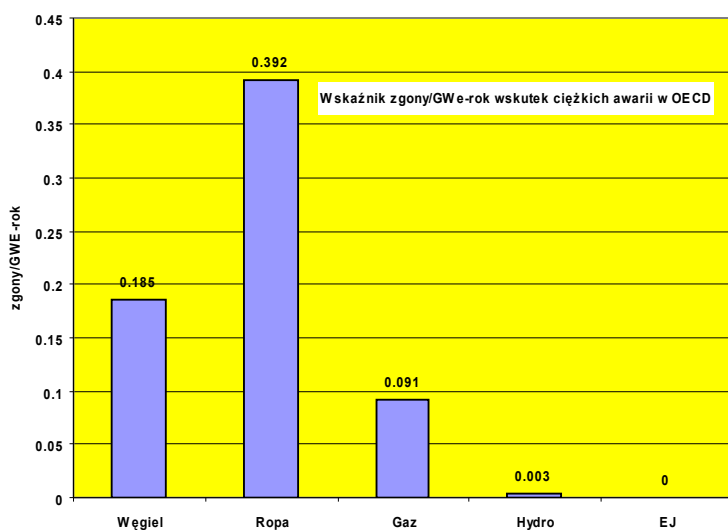
Rys. 10 – Pożar szybu naftowego

Należy też dodać, że na rys. 9 przedstawiono zagrożenia tylko w krajach OECD, pomijając dodatkowe zagrożenia wskutek awarii w krajach poza OECD, które często ponoszą główne ryzyko wydobycia ropy naftowej, a także narażone są na skutki awarii statków transportujących ropę. W przypadku uwzględnienia tych zagrożeń krzywe dla ropy, gazu i węgla leżą znacznie wyżej i porównania wypadają jeszcze korzystniej dla EJ. Zestawienie danych liczbowych z uwzględnieniem wpływu zagrożeń przy wydobyciu surowców energetycznych na zagrożenie sumaryczne przy produkcji energii

elektrycznej w krajach OECD pokazuje Tabl. 1 (dane wg. [24])

Tabl. 1 Liczba ciężkich awarii i spowodowanych przez nie nagłych zgonów w latach 1969-2000 dla różnych źródeł energii wg [24]

	Liczba ciężkich awarii	Liczba nagłych zgonów	Wskaźnik zgonu/GWe-rok	
			Dla OECD	Poza OECD
Węgiel	1221	25107	0.185	1.576
Ropa	397	20283	0.392	0.502
Gaz	125	1978	0.091	0.096
Hydro	11	29938	0.003	10.285
EJ	1	31	0	0.048



W tabelicy tej uwzględniono awarię w Czarnobylu. Na **rys. 11** pokazano względne liczby zgonów spowodowanych przez różne źródła energii w krajach OECD z uwzględnieniem korekty wynikającej z awarii zachodzących w innych krajach.

Jak widać energia jądrowa i wodna są znacznie bezpieczniejsze niż cykle paliwowe ze spalaniem surowców organicznych.

Koszty zewnętrzne związane

z potencjalnymi awariami jądrowymi są małe. Nawet po uwzględnieniu zgonów opóźnionych, które według hipotezy LNT mogą wystąpić w dużych populacjach narażonych na małe dawki, a także innych kosztów, składowa kosztów powodowanych przez możliwe awarie np. dla EJ Muhleberg w Szwajcarii wyniosła poniżej 0,001 Euro-centa/kWh, co autorzy ze szwajcarskiego Instytutu Scherrera określili jako wartość „pomijalnie małą” [24]. W ocenie tej przyjmowano koszt przedwczesnego zgonu (VSL - *value of statistical life*) równy 1 045 000 Euro, a koszt zachorowania nie powodującego śmierci 70 000 Euro.

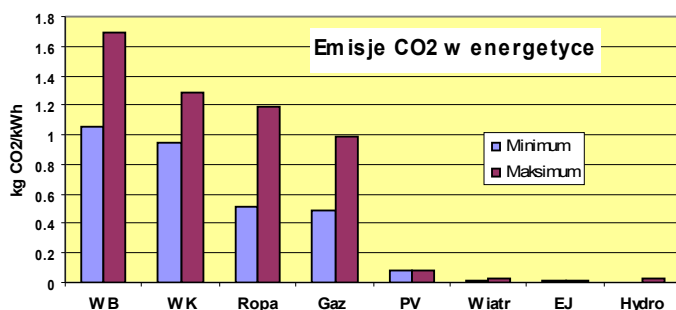
Łącznie, po uwzględnieniu wszystkich etapów cyklu paliwowego, budowy i likwidacji EJ, gospodarki odpadami radioaktywnymi i możliwych awarii, dawka przypadająca na jednostkę wytwarzanej energii elektrycznej wyniosła wg studium brytyjskiego 1,45 os-Sv/TWh. Przy współczynnikach funkcji dawka-skutek stosowanych w ExternE oznacza to, że liczba zgonów wśród populacji europejskiej wskutek rocznej pracy jednego dodatkowego reaktora PWR o mocy 1300 MWe wytwarzającego około 7 TWh rocznie wyniosłaby po scałkowaniu przez całe 100 000 lat mniej niż 0,1 zgonu. Wielkość tę można porównać z liczbą zgonów na raka ze wszystkich przyczyn zdarzających się co rok w Europie równą 800 000.

8. Koszty globalnej zmiany klimatu

Oceny kosztów wynikających ze zmiany klimatu zmieniały się znacznie w ciągu ubiegłych lat. Skutki zmiany klimatu są niezwykle złożone i obejmują ogromną liczbę różnych efektów. W wielu przypadkach nie rozumiemy jeszcze dobrze mechanizmów wpływających na przebieg zmian. Trudno jest też ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk ekstremalnych. Ale z roku na rok coraz więcej krajów przyznaje, że groźba ocieplenia globalnego jest realna i należy przyjąć sposób postępowania, który nie będzie przyczyniał się do wzrostu zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze.

W przypadku energii jądrowej emisje CO₂ w cyklu otwartym (bez przerobu paliwa wypalonego) wynoszą 4,8 g/kWh, a w cyklu zamkniętym około 4 g/kWh, a więc 200 razy mniej niż w nowoczesnych elektrowniach węglowych emitujących około 800 g/kWh [4].

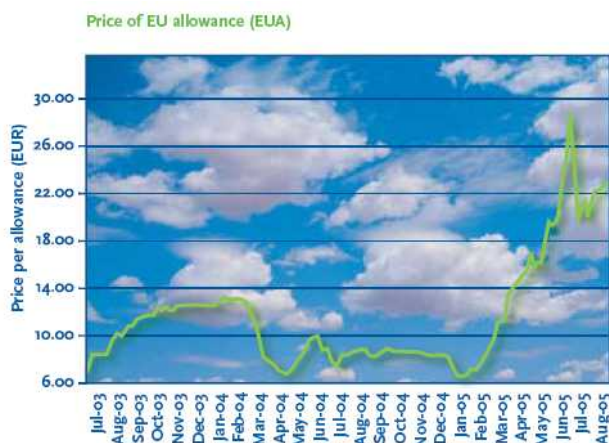
W tym kontekście warto spojrzeć na rys. 12, przedstawiający wyniki opracowanej w Szwajcarii inwentaryzacji emisji równoważnej CO₂ przy wykorzystaniu różnych źródeł energii. Jak widać, energia jądrowa jest wraz z energią wodną najkorzystniejsza dla ograniczenia stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze.



Rys. 12 Emisje równoważne CO₂ z różnych źródeł energii, dane z [25].

W styczniu 2005 r. Unia Europejska wprowadziła w życie system zezwoleń na emisję dwutlenku węgla, przyznawanych każdemu z krajów członkowskich po rozważeniu jego sytuacji energetycznej. Polska otrzymała

limit wynoszący 717,3 milionów ton na okres 2005-2007, co oznacza redukcję o 141,3 milionów ton w stosunku do propozycji strony polskiej. Tak więc limity UE będą odczuwane także i przez energetykę w Polsce.



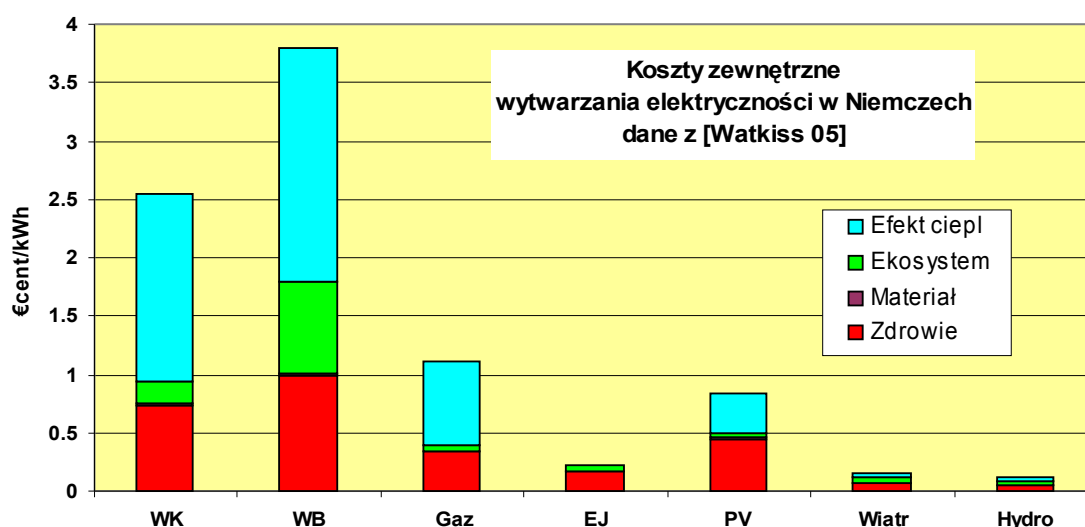
Możliwy jest handel zezwoleniami na emisję, przy którym elektrownie, emitujące mniej CO₂ niż im zezwolono, mogą sprzedać swoje zezwolenia na rynku krajowym lub międzynarodowym. Cena zezwolenia początkowo wynosiła 10 Euro/t CO₂, ale z chwilą wprowadzenia w styczniu 2005 roku limitów obowiązujących w Unii Europejskiej zaczęła ona szybko rosnąć i w we wrześniu 2005 wynosiła około 22 Euro/t CO₂ (rys. 13).

Wobec tego, że elektrownie przekraczające swe limity będą musiały w latach 2005-2007 płacić karę w wysokości 40 €/t, a w późniejszym okresie 100 €/t, należy oczekiwać, że cena zezwolenia nie będzie spadać. Tak więc koszty emisji gazów cieplarnianych będą większe niż wartość przypisana im obecnie w programie ExternE, wynosząca 19 €/t [11].

6. Wyniki porównań

Należy wyraźnie zaznaczyć, że eksperci pracujący w programie ExternE nie są w żaden sposób związani z przemysłem nuklearnym. Z pewnością nie przyjmują oni założeń dogodnych dla energetyki jądrowej. Przeciwnie, starają się oni przyjmować zawsze wartości reprezentujące warianty najgorsze dla EJ. Przykładem tego podejścia może być wielkość uwolnień substancji promieniotwórczych z EJ, która np. w pracy brytyjskiej była przyjmowana jako równa maksymalnym uwolnieniom dopuszczalnym według projektu, a nie obliczana na podstawie danych o rzeczywistych uwolnieniach z EJ. W efekcie uwolnienia z nowoczesnej EJ Sizewell B z reaktorem PWR, w którym wprowadzono szereg ulepszeń, zostały przyjęte znacznie większe niż średnie uwolnienia ze starych reaktorów w USA [19].

Pomimo to, dane na temat kosztów zewnętrznych wytwarzania energii elektrycznej w krajach UE opublikowane w [26] wykazują, że energia jądrowa wraz z hydroelektrowniami, wiatrakami i ogniwami słonecznymi należą do źródeł energii najbardziej przyjaznych dla człowieka (rys. 14).].



Rys. 14 Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektryczności w Niemczech dane z [26]

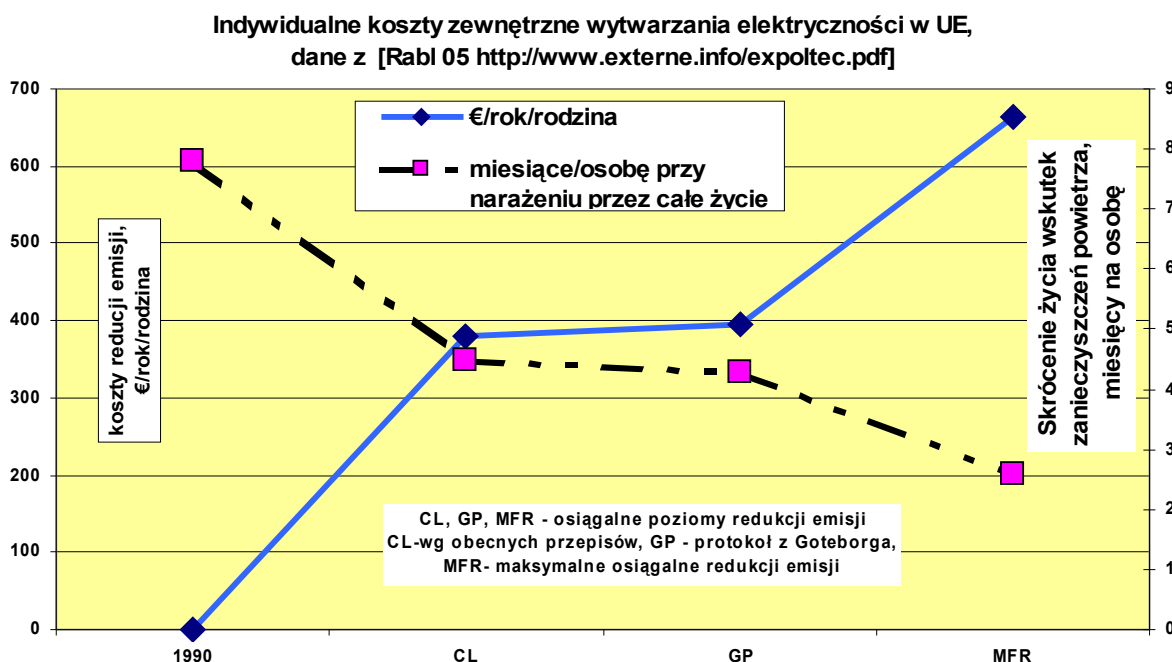
W przeciwieństwie do energii jądrowej, dla której skutki indywidualne są pomijalnie małe, roczne skutki spalania paliw organicznych zgodnie z ExternE [26] są znaczące.

Wskutek wzrostu stężenia **ozonu w powietrzu**, w krajach UE umiera co roku przedwcześnie 21 000 osób, a dziesiątki milionów cierpią na zaburzenia oddechowe powodujące konieczność przyjmowania lekarstw i ograniczania aktywności.

Wskutek wzrostu stężeń **pyłów PM** w roku 2000 mieszkańcy krajów UE utracili około 3 milionów osobo-lat oczekiwanego trwania życia. Jest to równoważne liczbie około 288 000 przedwczesnych zgonów osób dorosłych, z dodatkowymi 560 przedwczesnymi zgonami noworodków. Ponadto pyły PM spowodowały w 2000 roku około 83 000 poważnych przypadków wymagających leczenia szpitalnego [19], około 25 milionów dni wymagających użycia leków wspomagających układ oddechowy i kilkuset milionów dni o ograniczonej aktywności [26].

Obniżenie poziomu zanieczyszczenia powietrza nie jest łatwe ani tanie, ale może przynieść znaczne korzyści zdrowotne. Na rys. 15 opartym na danych z pracy [11] widać, jakie koszty finansowe musiałaby ponieść każda rodzina dla osiągnięcia wymaganej redukcji emisji zanieczyszczeń do atmosfery zgodnie z planami Unii Europejskiej. Symbole CL, GP i MFR

odpowiadają redukcji zanieczyszczeń powietrza zgodnie z obecnymi przepisami (*current legislation- CL*), z protokołem z Gothenburga (*GP*), i zgodnie z maksymalną możliwą redukcją przy pełnym zastosowaniu obecnie dostępnych metod technicznych (*Maximum Feasible Reduction MFR*). Jednocześnie widać jednak, że przy emisji zanieczyszczeń w 1990 roku przeciętne skrócenie oczekiwanej długości życia mieszkańca UE wskutek całożyciowego narażenia na wdychanie zanieczyszczonego powietrza wynosiło 7,8 miesiąca. Dzięki planowanemu zmniejszeniu zanieczyszczenia powietrza przeciętny mieszkaniec UE-25 może zyskać w najlepszym wariantcie ponad 5 miesięcy oczekiwanego trwania życia. Jest to wielkość znacząca dla każdego człowieka.



Rys. 15 Wydatki przypadające na rodzinę i redukcja oczekiwanego skrócenia życia odpowiadające zmniejszeniu emisji zgodnie z planami UE, dane z [11].

Redukcją emisji można osiągnąć przez instalowanie coraz doskonalszych filtrów i ograniczanie spalania węgla o niskiej jakości. Jednak znacznie skuteczniejszą drogą jest wprowadzenie elektrowni nie emitujących zanieczyszczeń, takich jak hydroelektrownie, elektrownie jądrowe i wiatrowe. Te ostatnie są bardzo drogie i pracują niestabilnie, co wymaga posiadania dużej sieci z elektrowniami pracującymi w sposób ciągły. Wyniki porównań prowadzonych w programie ExternE wskazują więc, że elektrownie jądrowe, które nie emitują pyłów ani ozonu do atmosfery, a pracują w sposób ciągły i są znacznie tańsze od elektrowni słonecznych czy wiatrowych, powinny być wprowadzane do energetyki dla dobra zdrowia człowieka.

Podsumowanie

Każdy z krajów uczestniczących w programie ExternE wprowadzał do analiz swoje specyficzne dane, takie jak gęstość zaludnienia, warunki meteorologiczne, średnie emisje powodowane przez istniejącą sieć elektroenergetyczną itd. Dlatego też i wyniki analiz różnią się nieco, ale ogólny układ kosztów zewnętrznych pozostaje podobny, jak pokazano na rys. 14 dla przypadku Niemiec. Widać, że największe koszty zewnętrzne występują w przypadku

węgla i ropy, gaz i biomasa stanowią grupę o średnich kosztach zewnętrznych, a EJ, hydro, PV i wiatr tworzą grupę źródeł energii najbardziej przyjaznych dla człowieka i środowiska.

Jak wykazaliśmy w toku rozważań przedstawionych w tym artykule, wyniki te odpowiadają przyjmowaniu dla energii jądrowej systematycznie założeń najbardziej niekorzystnych, jakie da się znaleźć. Czemu więc obliczenia kosztów zewnętrznych wykazują, że są one tak małe w przypadku energetyki jądrowej? Powody są dwa:

1) Wpływ promieniowania na zdrowie człowieka jest mały, nawet jeśli przyjmuje się jako punkt odniesienia skutki zdrowotne dawek otrzymanych przy bombardowaniu atomowym Hiroszimy i Nagasaki i hipotezę LNT. Jak mówił Lord of Goring, długoletni prezes WANO: *„Dlaczego Pan Bóg nie dał nam zmysłu wykrywającego natężenie promieniowania? Bo promieniowanie nie jest dla nas ważne. Po prostu – nie jest ważne”*.

2) Elektrownie jądrowe wprowadziły już od dawna układ barier zapewniających zatrzymywanie produktów rozszczepienia wewnątrz elektrowni. Oznacza to, że EJ musi ponosić koszty tego układu, co powoduje znane wszystkim wysokie nakłady inwestycyjne. Dzięki temu jednak emituje ona bardzo mało substancji radioaktywnych, a więc powoduje małe koszty zewnętrzne.

Wyniki programu ExternE były zaskoczeniem dla przeciwników energii jądrowej i wywołały różne ich reakcje. Organizacje zdecydowanie przeciwnie energii jądrowej, które pierwotnie wzywały do rachunku kosztów zewnętrznych, po ogłoszeniu wyników postanowiły zmienić swe hasła i obecnie podkreślają nie koszty zewnętrzne, ale wpływ wykorzystywania różnych źródeł na zatrudnienie, twierdząc, że im więcej ludzi potrzeba do wykonania pewnej pracy, tym lepiej. O kosztach zewnętrznych wolać nie mówić. Są jednak i wybitni przedstawiciele ruchów ekologicznych, którzy zrozumieli, że energia jądrowa jest jedynym praktycznym rozwiązaniem problemu zapewnienia energii elektrycznej dla ludzkości i obecnie popierają jej rozwój. Należy do nich Lovelock, jeden z twórców ruchu ekologicznego i znany autor wydanej również w Polsce książki „Gaia”, w której opisuje on ziemię jako żywy organizm, którego równowagę człowiek może naruszyć. Jest też szereg innych wybitnych działaczy ekologicznych, a także wielu zwykłych ludzi, którzy uważają, że energia jądrowa pomoże w ochronie przyrody i stworzyli światową organizację SEREN – Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej. Niewątpliwie wyniki wieloletnich prac ExternE pomogły w akceptacji energii jądrowej w Unii Europejskiej.

Oceny kosztów zewnętrznych wytwarzania energii elektrycznej prowadzono również dla warunków w Polsce [27, 28]. Wyniki tych prac będą przedstawione w następnym artykule.

Literatura

- 1 Survey of Energy Resources 2004, World Energy Council, London, 2004
- 2 MARHEINEKE T. KREWITT W., NEUBARTH J., FRIEDRICH R., VOSS A. Ganzheitliche Bilanzierung der Energie-und Stoffströme von Energieversorgungsstechniken, Universität Stuttgart Institut fuer Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, IER Band 74, August 2000
- 3 HIRSCHBERG S. VOSS A. Nachhaltigkeit und Energie: Anforderungen der Umwelt, Proceedings der Fachtagung Nachhaltigkeit und Energie, Zurich, 25/26 November 1998, PSI Proceedings 99-01, Mai 1999, Paul Scherrer Institut
- 4 ExternE Info system 2005, <http://externe.jrc.es/Belgium+Nuclear.htm>
- 5 The Royal Academy of Engineering. The Costs of Generating Electricity, March 2004
- 6 EXTERNE 1995, Externalities of Energy, Vol. 1-7, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, Luxembourg, 1995

- 7 HIRSCHBERG, S., SPIEKERMAN, G. and DONES, R. "Severe Accidents in the Energy Sector". PSI Report Nr. 98-16, Paul Scherrer Institute, Switzerland, (November 1998).
- 8 LIPFERT, F.W., "Air pollution and community health", Van Nostrand Reinhold, New York, (1994).
- 9 DOCKERY D.W. et. al. (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England J. Med.* 329: 1753-1759.
- 10 POPE, C A, et al (1995) 'Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of US Adults' *Am. J. Resp. Critical Care Med* 151 (1995) 669-674
- 11 RABL A. et al.: Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications, Final Technical Report, Version 2, August 2005
- 12 Pope CA, RT Burnett, MJ Thun, EE Calle, D Krewski, K Ito, & GD Thurston 2002. "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution ". *J. Amer. Med. Assoc.*, vol. 287 (9), 1132-1141.
- 13 LEKSELL I., RABL A., Air Pollution and Mortality: Quantification and Valuation of Years of Life Lost, *Risk Journal*, 2001
- 14 STRUPCZEWSKI A., Analiza zagrożeń i korzyści związanych z różnymi źródłami energii elektrycznej, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Raport PTN -3/1999, Warszawa 1999
- 15 International Commission on Radiological Protection, Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste, ICRP Publication 77, Pergamon, (1997)
- 16 STRUPCZEWSKI A. : Oddziaływanie małych dawek promieniowania na zdrowie człowieka, *Biuletyn PSE*, lipiec 2005
- 17 French Academy of Sciences and National academy of Medicine: Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionising radiation, March 30, 2005
- 18 EXTERNE 1998, Externalities of Energy, Vol. 1-10, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, Luxembourg, 1998
- 19 BERRY, J.E., HOLLAND M.R., WATKISS P.R. STEPHENSON W., Power Generation and the Environment - a UK Perspective ETSU Final Report. June 1998
- 20 SENES, Long Term Population Dose Due to Radon (Rn-222) Released from Uranium Mill Tailings, SENES Consultants Limited, Richmond, Canada, April 1998
- 21 The Chernobyl Forum (Belarus, the Russian Federation, Ukraine, FAO, IAEA, UNDP, UNEP, UNSCEAR, UN-OCHA, WHO, WORLD BANK GROUP), -: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, Vienna 2005
- 22 STRUPCZEWSKI A.: Czy awaria taka jak w Czarnobylu może powtórzyć się w polskiej elektrowni jądrowej? *Biuletyn PSE*, październik 2005
- 23 HIRSCHBERG S., STRUPCZEWSKI A., How Acceptable? - Comparison of Accident Risks in Different Energy Systems, *IAEA Bulletin* 41/1/1999, s. 25/30, 1999
- 24 Hirschberg S.: Accidents in the Energy Sector: Comparison of Damage Indicators and External Costs, Workshop on Approaches to Comparative Risk Assessment Warsaw, Poland, 20-22 October 2004
- 25 Dones R., et al (2004) Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Final report ecoinvent 2000 No. 5. Paul Scherrer Institut, Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, from: www.ecoinvent.ch
- 26 WATKISS P.: AEAT/ED51014/Baseline Scenarios CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020, AEA Technology Environment, January 2005
- 27 STRUPCZEWSKI A., BORYSIEWICZ M., TARKOWSKI S., RADOVIC U., Ocena wpływu wytwarzania energii elektrycznej na zdrowie człowieka i środowisko i analiza porównawcza dla różnych źródeł energii, w: „Ekologiczne Aspekty Energetyki”, Warszawa 14-16 listopad 2001
- 28 STRUPCZEWSKI A., TWARDY L., PAPROCKI R., KROCHMALSKI R., Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych, gazowych i jądrowych w warunkach polskich, Seminarium „Energetyka dla Polski”, Warszawa 25-26 marca 1999, Raport IEA, ISSN 1232-5317