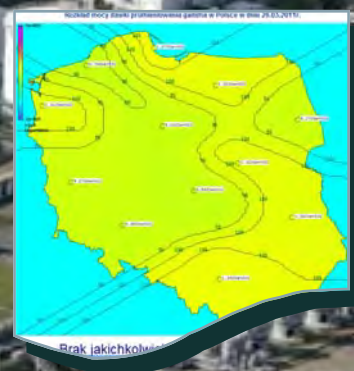




福島第一原子力発電所横

Fukushima 1
Japońska energetyka jądrowa

Rozkład mocy dawki promieniowania gamma w Polsce



Czy pracownicy elektrowni jądrowych częściej umierają ?





Osiągnięcia wybrzmiewają w przyszłość

Zależnie od odległości, na jakie ma być przesyłana energia, różne są wartości stosowanych napięć. Wynoszą one: od **220 do 400 kV** (tzw. najwyższe napięcia), w przypadku przesyłania na duże odległości, **110 kV** (tzw. wysokie napięcie), w przypadku przesyłania na odległości nie przekraczające kilkudziesięciu kilometrów, od **10 do 30 kV** (tzw. średnie napięcia), stosowane w lokalnych liniach rozdzielczych.



239 linii o łącznej długości 13 294 km, w tym:
1 linia o napięciu 750 kV o długości 114 km,
71 linii o napięciu 400 kV o łącznej długości 5 261 km,
167 linii o napięciu 220 kV o łącznej długości 7 919 km,
106 stacji najwyższych napięć (NN).



ul. Świętokrzyska 14 00-050 Warszawa
tel. 22 336 14 19 fax. 22 336 14 25
www.ekoatom.com.pl
E-mail: redakcja@ekoatom.com.pl

SKŁAD REDAKCJI

Redaktor Naczelny

dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
dr inż. Marek Rabiński,
dr inż. Andrzej Mikulski,
dr inż. Piotr Czerski (PGE),
Sekretarz Redakcji

Jerzy Szczurowski (COSIW SEP)
Redaktor Techniczny

Jarosław Cyrynger (COSIW SEP)

RADA PROGRAMOWA:

Przewodniczący

prof. dr hab. Maciej Sadowski,
Członkowie

prof. dr hab. Janusz Lewandowski (PW),

prof. dr hab. Łukasz Turski (UW)

prof. dr hab. Zdzisław Celiński,

prof. dr Andrzej Strupczewski,

prof. dr hab. Natalia Golnik (PW)

NASZ SPONSOR



DOŁĄCZ I ZOBACZ RELACJE FOTOGRAFICZNE



Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów, korekty, edycji nadesłanych materiałów, oraz nie zwraca materiałów niezamówionych. Redakcja zastrzega sobie prawo do publikacji materiałów w dogodnym dla redakcji czasie i kolejności oraz niepublikowania materiału bez podania przyczyny. Redakcja nie odpowiada za treść zamieszczonych reklam ogłoszeń i innych płatnych.

EKOATOM JEST PRAWNIE ZASTRZEŻONYM
ZNAKIEM TOWAROWYM

Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw
Ul. Świętokrzyska 14 00-050 Warszawa
tel. 22 336 14 19 fax. 22 336 14 25
www.cosiw.pl
e-mail: handlowy@cosiw.pl



Szanowni Państwo



Przedstawiamy pierwszy numer nowego czasopisma - kwartalnika, którego podstawowym celem jest obiektywne informowanie społeczeństwa o plusach i minusach, jakie niesie ze sobą wykorzystanie energii jądrowej przede wszystkim do produkcji energii elektrycznej oraz o wpływie energetyki jądrowej w pełnym cyklu paliwowym na człowieka i środowisko, ze szczególnym podkreśleniem szeroko pojętych zagadnień bezpieczeństwa ekologicznego. Redakcja dołoży starań aby, publikowane materiały odzwierciedlały różne punkty widzenia i w ten sposób zachęcały do dyskusji.

Czasopismo ma charakter popularnonaukowy. Wpisuje się w program prac nad podniesieniem stanu wiedzy oraz poziomu akceptacji społecznej dla energetyki jądrowej. Czasopismo będzie pełnił również funkcje informacyjne w zakresie stosowania zasad bezpieczeństwa jądrowego w naszym kraju. Przewidujemy prowadzenie następujących działów, które mogą w przyszłości przekształcić się w serie wydań broszurowych zawierających zbiory najciekawszych artykułów:

Wiadomości: informacje z serwisów Ministerstwa Gospodarki, Polskiej Grupy Energetycznej (PGE), Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) itp., przebieg i realizacja programu energetyki jądrowej w Polsce, wydarzenia na świecie, nowiny, informacje o spotkaniach, odczytach, kongresach, wystawach itp.

Elektrownie jądrowe: opisy światowych technologii jądrowych łącznie z proponowanymi dla Polski, zagadnienia lokalizacji, systemy zabezpieczenia, analizy możliwych awarii i sposoby zapobiegania im.

Paliwo jądrowe: wydobywanie, produkcja, wykorzystanie, przerób i przechowywanie.

Promieniowanie jonizujące: wpływ promieniowania jonizującego na człowieka i środowisko.

Edukacja: informacje wyjaśniające w możliwie przekonujący i przystępny sposób pojęcia z zakresu szeroko pojętej atomistyki.

Chcemy by czasopismo było elementem integrującym środowiska popierające użytkowanie energii jądrowej nie tylko do produkcji energii elektrycznej ale również w medycynie i innych działach techniki.

Wszystkich chętnych, a przede wszystkim specjalistów, serdecznie zapraszamy do współpracy i publikowania na naszych łamach.

Redaktor Naczelny
Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

Wiadomości

6 ZIELONI: INTELIGENTNY SYSTEM ENERGETYCZNY ZAMIAST ENERGETYKI JĄDROWEJ

7 POLSKA NIE ZREZYGNUJE Z PROGRAMU NUKLEARNEGO

8 JEŚLI NIE ATOM, TO CO ?

9 ZEBRANIA SEP W SPRAWIE ENERGETYKI JĄDROWEJ

9 PTJ > 50 LAT

Elektrownie Jądrowe

Artykuł usunięty na prośbę autora.

Krzysztof Rzymkowski - Wieloletni inspektor MAEA w Japonii i Dalekim Wschodzie
Obecnie Sekretarz SEREN POLSKA

14 FUKUSHIMA JEDEN

福島第一

Zdzisław Celiński - przewodniczący Komitetu Energe-

tyki Jądrowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich

22 ENERGETYKA A ŚRODOWISKO

Elektrownie węglowe a środowisko. Szkody ekologiczne związane z kopalnictwem węgla. Elektrownie wodne a środowisko. Elektrownie jądrowe a środowisko. Porównanie szkodliwości dla środowiska elektrowni węglowej i jądrowej

Andrzej Grzegorz Chmielewski

32 ENERGETYKA I ŚRODOWISKO - POWER SECTOR AND THE ENVIRONMENT

Wzrost liczby ludności, wyższe standardy życia, rosnąca urbanizacja i rozwój przemysłu prowadzą do postępującej degradacji środowiska naturalnego.

Paliwo jądrowe

40 ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE W ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Krzysztof Rzymkowski — Wieloletni inspektor MAEA w Japonii i Dalekim Wschodzie Obecnie Sekretarz SEREN POLSKA

40 PALIWO DLA ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Jacek T. Kaniewski — Były Radca Prezesa PAA. Członek Społecznego Zespołu Doradców przy Pełnomocniku Rządu ds. Energetyki Jądrowej

42 WYPALONE PALIWO JĄDROWE: GROŻNE ODPADY CZY CENNY SUROWIEC ENERGETYCZNY ?

Promieniowanie jonizujące

Andrzej Wójcik - CRPR – Centre for Radiation Protection Research Uniwersytet w Sztokholmie

54 ENERGETYKA JĄDROWA, PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE I ZDROWIE CZŁOWIEKA

Artykuł wstępny do serii artykułów dotyczących problemu działania promieniowania jonizującego na zdrowie człowieka w kontekście energetyki jądrowej.

Krzysztof Wojciech Fornalski — doktorant w Instytucie Problemów Jądrowych w Świerku

59 NARAŻENIE PRACOWNIKÓW PRZEMYSŁU JĄDROWEGO

NA PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE Pracownicy przemysłu jądrowego, w szczególności operatorzy elektrowni jądrowych, są grupą zawodowo narażoną na promieniowanie jonizujące. Na przykładzie wybranych wyników przedstawiono jakie jest ryzyko zachorowalności i umieralności na choroby nowotworowe wśród tej grupy.

Edukacja

66 ROK 2011 ROKIEM MARII SKŁODOWSKIEJ - CURIE

Piotr Czerni— PGE Energia Jądrowa S.A.

68 KONSULTACJE SPOŁECZNE W WIELKIEJ BRYTANII W SPRAWIE ROZWOJU ENERGETYKI JĄDROWEJ

Na podstawie: *Meeting the Energy Challenge, A White Paper on Nuclear Power, January 2008, Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform (BERR)*





CHCESZ WSPÓŁTWORZYĆ EKOATOM ?

MASZ CIEKAWY ARTYKUŁ ...?

NAPISZ NA ADRES

redakcja@ekoatom.com.pl

wnp.pl (Dariusz Ciepela) - 13-04-2011 14:02



Zieloni: inteligentny system energetyczny zamiast energetyki jądrowej

Polscy Zieloni domagają się zatrzymania realizacji rządowego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej i przyspieszenia rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz zwiększania efektywności energetycznej.

- Lobby atomowe od lat forsuje przedłużanie życia reaktorów jądrowych, dezinformując opinię publiczną. Prawie wszystkie reaktory na świecie zbliżają się do projektowego końca swojego życia - 30 lat. 26 marca 2011 roku Fukushima I osiągnęłaby wiek 30 lat. W sytuacji rosnącego oporu społecznego wobec atomu oraz coraz większej konkurencyjności sektora energetyki odnawialnej jedyną nadzieją lobby atomowego na reanimację podupadającego przemysłu jądrowego na świecie jest okłamywanie społeczeństw, że siłownie nuklearne są, mimo upływu lat, bezpieczne, a nawet bezpieczniejsze niż w momencie oddania ich do użytku. Ponadto od 25 lat, od dramatycznej katastrofy w Czarnobylu, lobbyści atomowi obiecują nam bezpieczną i tanią energię elektryczną z reaktorów jądrowych - czytamy w oświadczeniu Zielonych.

Zieloni przekonują, że awaria w elektrowni Fukushima powinna ostatecznie zamknąć erę jądrową w energetyce w Europie i na świecie. Polscy Zieloni domagają się zatrzymania realizacji rządowego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej oraz rozpoczęcia debaty publicznej na temat przyszłości naszej energetyki. Społeczeństwu należy, ich zdaniem, przedstawić co najmniej kilka wariantów rozwoju energetyki, w tym wariant bez elektrowni jądrowych w Polsce.

Jednocześnie polscy Zieloni postulują podjęcie przez rząd i samorządy natychmiastowych działań mogących skutecznie zapobiec zagrożeniom związanym z dramatycznym stanem technicznym niemodernizowanego sektora energetycznego. Działania te obejmują m.in. modernizację energetycznych sieci przesyłowych, budowę transgranicznych połączeń energetycznych z systemem Unii Europejskiej, inwestycje w programy oszczędzania energii i podnoszenia efektywności energetycznej (obecnie w parlamencie znajduje się ustawa o efektywności energetycznej, z której Sejm usunął zapis o obowiązkowym podnoszeniu efektywności w sektorze publicznym) oraz zwiększanie potencjału odnawialnych źródeł energii, w tym energetyki wiatrowej lądowej i morskiej, biomasy, biogazu, energetyki słonecznej, wodnej czy geotermalnej.

- Zwłaszcza rozproszony rozwój odnawialnych źródeł energii na poziomie lokalnym przyniesie setki tysięcy nowych lokalnych miejsc pracy - zapewniają Zieloni.

Zieloni zapowiadają jednocześnie działania zwiększające wiedzę społeczeństwa o prawdziwych kosztach ekologicznych, społecznych i gospodarczych energetyki jądrowej oraz wzmacniające zaplecze naukowe i eksperckie dla dynamicznego rozwoju energetyki odnawialnej oraz podnoszenia efektywności energetycznej.

- Celem polskich Zielonych jest zatrzymanie rządowego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej, szkodliwego dla środowiska, społeczeństwa i gospodarki i niezgodnego z polską racją stanu, oraz wsparcie działań Zielonych Europejskich na rzecz odejścia od atomu w całej Europie. Stanowczo sprzeciwiamy się budowie nieprzejrzystego, scentralizowanego i autorytarnego państwa atomowego, w którym interesy korporacji energetycznych są forsowane kosztem konsumentów i konsumentek oraz środowiska. Popieramy rozwój demokracji energetycznej, opartej na rozproszonej, odnawialnej energetyce lokalnej na ludzką skalę, kontrolowanej przez lokalne społeczności, zapewniającej bezpieczeństwo społeczne i ekologiczne oraz zrównoważony rozwój - napisali Zieloni.



 **Ekologia Energetyka Ekonomia - wstęp do SEREN POLSKA**

Stowarzyszenie Ekologów Na Rzecz Energii Nuklearnej

SEREN

ul. Świętokrzyska 14 00-050 Warszawa

+48 22 5564309 :: seren@seren.org.pl

[Przystap do SEREN](#)

PAP - 12-04-2011 13:12



Polska nie zrezygnuje z programu nuklearnego - zapewniła we wtorek na konferencji pełnomocnik ds. energetyki jądrowej Hanna Trajanowska. Głównym tematem spotkania dostawców koncernu Westinghouse jest wpływ wydarzeń w Fukushima na nuklearny biznes.

Westinghouse, obok GE-Hitachi i francuskiej Arevy to potencjalny dostawca technologii do polskiej elektrowni jądrowej

Rozpoczętą we wtorek w Warszawie konferencję otworzyli m.in. rządowy pełnomocnik ds. energetyki jądrowej, wiceminister gospodarki Hanna Trojanowska oraz ambasador USA. To spotkanie wszystkich kooperantów koncernu z Europy, Bliskiego Wschodu i Afryki. Według firmy Westinghouse, w jej łańcuchu dostaw technologii nuklearnej jest ok. 200 przedsiębiorstw z regionu.

Trojanowska podkreśliła, że po wydarzeniach w Japonii pojawiły się pomysły zatrzymania rozwoju energetyki jądrowej; zdarzenia w Fukushima próbuje się nawet wykorzystać do zmiany polityki energetycznej Unii Europejskiej.

"Z jednej strony mamy próby walki z globalnym ociepleniem, z drugiej antynuklearną fobią. A w tym samym czasie konkurencyjność gospodarcza jest jednym z priorytetów Unii. Żadna z decyzji podejmowana w tych kwestiach nie może być spowodowana strachem. Chciałabym tu zadeklarować, że my nie zrezygnujemy z programu nuklearnego" - powiedziała wiceminister gospodarki.

Trojanowska podkreśliła, że kluczowe znaczenie ma edukacja społeczeństwa. Zaznaczyła, że o ile przed wypadkami w Japonii zwolenników energii jądrowej w Polsce było więcej niż przeciwników, a tylko około 10 proc. nie miało w tej sprawie zdania, to obecnie odsetki zwolenników i przeciwników znacznie spadły, natomiast znacznie więcej ludzi chce wiedzieć więcej na temat tej energii.

W jej ocenie 50 lat pomyślnej eksploatacji elektrowni jądrowych na świecie skłania do wniosku, że ta energia to racjonalny wybór. "Wdrożenie w Polsce programu nuklearnego to bardzo ważny element dywersyfikacji naszych źródeł energii. To nie jest alternatywa dla naszej polityki energetycznej, ale jej uzupełnienie. Zadaniem rządu jest identyfikacja zagrożeń i znajdowanie sposobów na ich uniknięcie na każdym etapie projektu. Warunki bezpiecznej eksploatacji elektrowni jądrowych zawarliśmy w rządowym programie rozwoju tej energetyki" - mówiła wiceminister.

Podkreślała też, że właśnie we wtorek w sejmowej komisji nadzwyczajnej ruszają prace nad rządowymi propozycjami ustawowymi, które mają dać prawne podstawy rozwoju. "Standardy bezpieczeństwa powinny być najwyższe z możliwych i zawierać międzynarodowe doświadczenia. (...) Należy robić wszystko, by dotrzeć do ludzi, by przekonać ich do korzyści, jakie niesie ze sobą ta energia. Rząd ponosi odpowiedzialność za ochronę społeczeństwa przed ewentualnymi negatywnymi skutkami oraz za to, by zminimalizować ryzyko tego typu wypadków. Musimy podwoić wysiłki, by nie pozwolić naturze przekroczyć granic naszej wyobraźni czy przypuszczeń" - mówiła Trojanowska.

Dywersyfikacja źródeł energii, nowe, niskoemisyjne jej źródła to kwestia bezpieczeństwa narodowego - podkreślił z kolei ambasador USA w Polsce Lee Feinstein. Przypomniał niedawne wystąpienia Baracka Obamy w sprawach energetycznych, kiedy to prezydent USA wskazywał, że Stany Zjednoczone muszą zwiększać udział nowych źródeł energii, zwłaszcza rodzimych, w tym i energetyki atomowej.

Takie decyzje niosą ze sobą polityczne ryzyko, ale energia jądrowa musi mieć swój udział w bilansie zużycia, mimo wypadków w Japonii - przypominał słowa Obamy ambasador. Dodał, że Obama mówił też, iż energia nuklearna nie powoduje emisji gazów cieplarnianych i że mimo wypadków w Japonii ta dziedzina będzie dalej rozwijana.

Feinstein zaznaczył, że współpraca energetyczna była bardzo ważnym tematem grudniowego spotkania Obamy z prezydentem Bronisławem Komorowskim. Jak powiedział, była mowa o bezpieczeństwie energetycznym i współpracy w dziedzinie energii atomowej i Komorowski zapewniał, że proces wyboru dostawcy technologii nuklearnych do Polski będzie uczciwy i maksymalnie przejrzysty.

Amerykański ambasador podawał też inne przykłady polsko-amerykańskiej współpracy energetycznej. Podkreślił, że w poniedziałek odwiedził odwiert amerykańskiej firmy, prowadzącej pod Warszawą poszukiwania gazu niekonwencjonalnego.



Jeśli nie atom, to co ?

Nie stać nas na to, by nie rozwijać energetyki jądrowej - mówi dla portalu wnp.pl Hanna Trojanowska, pełnomocnik rządu.

Awaria elektrowni Fukushima była następstwem kataklizmu, ale wywołała dyskusję o przyszłości energetyki jądrowej. Dlaczego?

- Europa poszukuje dziś miejsca między fobią związaną z emisją CO2 a fobią jądrową. Jedni boją się skutków klimatycznych i gospodarczych emisji gazów cieplarnianych, inni - energetyki jądrowej, uznając ją za kosztowną i ryzykowną. Nie sposób dzisiaj mówić o wdrażaniu energetyki jądrowej, nie uwzględniając europejskiej dyskusji na temat przyszłości energetyki w ogóle. Jesteśmy w specyficznej sytuacji, bo z programem jądrowym w Polsce startujemy od samego początku, jesteśmy na etapie tworzenia "oprzyrządowania" regulacyjnego i organizacyjnego, które dopiero będzie umożliwiać podejmowanie decyzji o stosownych inwestycjach. Każdy moment jest dobry na dyskusję merytoryczną, ale bez fachowej oceny prac stabilizujących stan uszkodzonych reaktorów w Fukushima i wniosków z tego płynących dla przemysłu jądrowego taka dyskusja o przyszłości energetyki jądrowej będzie zbyt emocjonalna.

Czym zatem jest pani zdaniem festiwal opinii o energetyce jądrowej po katastrofie w Japonii?

- Obecnie wygłaszane opinie to swoisty polityczno-intelektualny drybling między faktami i domniemaniami. Dzisiaj wiemy z relacji służb elektrowni, że reaktory w Fukushima zostały automatycznie wyłączone i awaryjnie chłodzone do momentu, w którym tsunami zmyło zbiorniki z olejem napędowym do silników diesla, co spowodowało brak zasilania i w efekcie brak chłodzenia reaktora. Brak możliwości odbioru ciepła spowodował uszkodzenie prętów paliwowych i topienie rdzenia reaktora. W dzisiejszych nowoczesnych technologiach trzeciej generacji prawdopodobieństwo takiej awarii jest tysiąckrotnie mniejsze, w porównaniu do generacji drugiej, dzięki zastosowaniu niewymagających zasilania elektrycznego układów (pasywnych) lub zwielokrotnienia (redundancji) układów bezpieczeństwa.

Jak wydarzenia w Japonii wpłynęły na jądrową część Unii Europejskiej?

- Paradoksalnie, wydarzenia w Japonii zadziałały w większości krajów europejskich eksploatujących elektrownie jądrowe jak szczepionka. Zdajemy sobie sprawę, jak poważna jest sytuacja w japońskiej elektrowni dotkniętej kataklizmem, pamiętamy jednak, że dzięki energetyce jądrowej Japonia uniknęła humanitarnej katastrofy. W wyniku trzęsienia ziemi i tsunami w Japonii uszkodzonych zostało 21 obiektów energetyki konwencjonalnej, w tym elektrownie węglowe i gazowe. Tsunami rozmyło bowiem linie kolejowe oraz poważnie uszkodziło gazociągi, co w konsekwencji sparaliżowało dostawy paliw do elektrowni. Sytuację w Japonii po trzęsieniu ziemi ratują wciąż działające elektrownie jądrowe.

Co pani sądzi o propozycji referendum w sprawie budowy elektrowni jądrowej w Polsce?

- Nie zakładaliśmy ogólnopolskiego referendum, zważywszy, że w najbliższym sąsiedztwie Polski pracuje kilkanaście jądrowych reaktorów energetycznych wybudowanych bez konieczności konsultowania się z nami, a kolejne obiekty mogą być budowane blisko naszych granic. W przypadku energetyki jądrowej instytucja ogólnopolskiego referendum wydaje mi się trudna do uzasadnienia, jeśli zakładamy, że takie referendum powinno opierać się na przesłankach merytorycznych i mierzalnych, a nie na emocjach czy instynkcie. Chodziłoby w zasadzie o pytanie o stosunek obywatela do kwestii bezpieczeństwa energetycznego państwa i jego znaczenia dla przyszłości gospodarczej kraju i o wynikającą z tego jakość życia obywateli. Nie wyobrażam sobie, by na fali emocji i instynktownych obaw wywołanych sytuacją w Japonii decydować o tych sprawach w referendum.

Nie widzi pani alternatywy dla energetyki jądrowej w Polsce?

- Nie zaczynamy programu energetyki jądrowej, by sobie zafundować ekstrawaganckie i kosztowne rozwiązania. Po prostu nie stać nas na to, by nie rozwijać energetyki jądrowej. Bo jeśli nie energetyka jądrowa, to co? Z powodu polityki klimatycznej sytuacja energetyki węglowej jest dosyć oczywista - prawdopodobnie będzie coraz droższa. Potencjał energetyki odnawialnej mimo wspierania jej rozwoju przez państwo jest na tyle niski, że nie może stanowić substytutu czy alternatywy dla dużych systemowych elektrowni, a rozwój energetyki gazowej oznacza także wzrost importu paliw.

Rozmawiał: Ireneusz Chojnacki

Więcej o energetyce jądrowej w rozmowie z minister Hanną Trojanowską w kwietniowym numerze miesięcznika gospodarczego "Nowy Przemysł".

Energetyka atomowa, w tym wybór technologii atomowych, uwarunkowania ekonomiczne projektów czy bezpieczeństwo eksploatacji elektrowni atomowych, będzie istotnym tematem dyskusji na [III Europejskim Kongresie Gospodarczym](#).



ZEBRANIA SEP W SPRAWIE ENERGETYKI JĄDROWEJ

29 marca br. w Sali Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej odbyło się zebranie Komitetu Energetyki Jądrowej SEP, Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN oraz Sekcji Energetyki Jądrowej Polskiego Towarzystwa Nukleonowego. Wysłuchano odczytu wiceprezesa Państwowej Agencji Atomistyki, Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego w Polsce mgr inż. Macieja Jurkowskiego pt.: „**Problemy bezpieczeństwa reaktorów jądrowych**”.

Następnie pod przewodnictwem prof. Zbigniewa Jaworowskiego odbyło się Walne Zebranie Stowarzyszenia SEREN Polska. Sekretarz generalny SEREN dr Krzysztof Rzymkowski przedstawił Sprawozdanie Zarządu a Jerzy Chmielewski sprawozdanie Komisji Rewizyjnej.

W dyskusji podkreślono konieczność: zaangażowania się SEREN w walkę z dezinformacją w zakresie energetyki jądrowej oraz w zainicjowanie dyskusji na temat elektrociepłowni jądrowej dla dużych aglomeracji miejskich. Zgłoszono propozycję wystąpienia z inicjatywą wprowadzenia do projektu Prawa Atomowego zapisu o możliwości powstawania, na terenach, gdzie znajdują się obiekty jądrowe, Lokalnych Komisji Społecznych. W skład nowego Zarządu SEREN weszli:

prof. Zbigniew Jaworowski – prezes, wiceprezesa: prof. Zdzisław Celiński, prof. Andrzej Strupczewski, dr Tadeusz Wójcik, dr Krzysztof Rzymkowski – sekretarz generalny, dr Marek Rabiński – skarbnik, oraz członkowie Zarządu: mgr inż. Jacek Burski, mgr inż. Andrzej Boroń, prof. Maciej Sadowski. Wyrażono zadowolenie z podjęcia pracy w Zarządzie SEREN przez Sekretarza Generalnego SEP.



POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ > 50

POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ

Kwartalnik ukazujący się od 52 lat. Interesujące popularnonaukowe pismo, w którym zamieszczane są artykuły nt. aktualnych osiągnięć w dziedzinie atomistyki, informacji o "nowinkach" naukowych z zakresu chemii, fizyki, biologii. Autorami artykułów są znakomici specjaliści w poszczególnych dziedzinach. Pismo ma stałe rubryki, gdzie zamieszczane są: doniesienia ze świata i z kraju, relacje z konferencji, listy do redakcji i noty biograficzne. Pismo jest chętnie czytane nie tylko przez profesjonalistów, ale także przez młodzież szkół ponadpodstawowych.

Redaktor Naczelny

dr Stanisław Latek

Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa



REDAKCJA

ul. Krucza 36

00-522 Warszawa

Tel. 22 695 98 15 lub 22 695 98 22

Artykuł usunięty n

a prośbę autora.

Artykuł usunięty

na prośbę autora.

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Centralny Ośrodek Szkolenia
i Wydawnictw



Data wydania 30-03-2011

Rok II , Numer 1/ 5

BIULETYN INFORMACYJNO - TECHNICZNY

AUGUST

ENERGETYKA

WARTO WIEDZIEĆ

20 grudnia ubiegłego roku w Dzienniku Ustaw nr 239 opublikowano ROZPORZĄDZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY z dnia 10 grudnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Wchodzi ono w życie 21 marca 2011.

Celem nowelizacji jest wprowadzenie wymagań wynikających z aktualnych Polskich Norm, czyli norm wprowadzających najnowsze Normy Europejskie (EN) i podniesie poziomu nowoczesności budynków na zbliżony do europejskiego.

Stosowanie w projektowaniu i wykonawstwie aktualnych Polskich Norm, wprowadzonych w zmieniającym załączniku do rozporządzenia, wpłynie pozytywnie na wzrost bezpieczeństwa budynków, w szczególności w zakresie obciążeń wiatrem, jak i oceny zagrożeń od skutków wyładowań atmosferycznych.

Krzysztof Rzymkowski

Fukushima 1

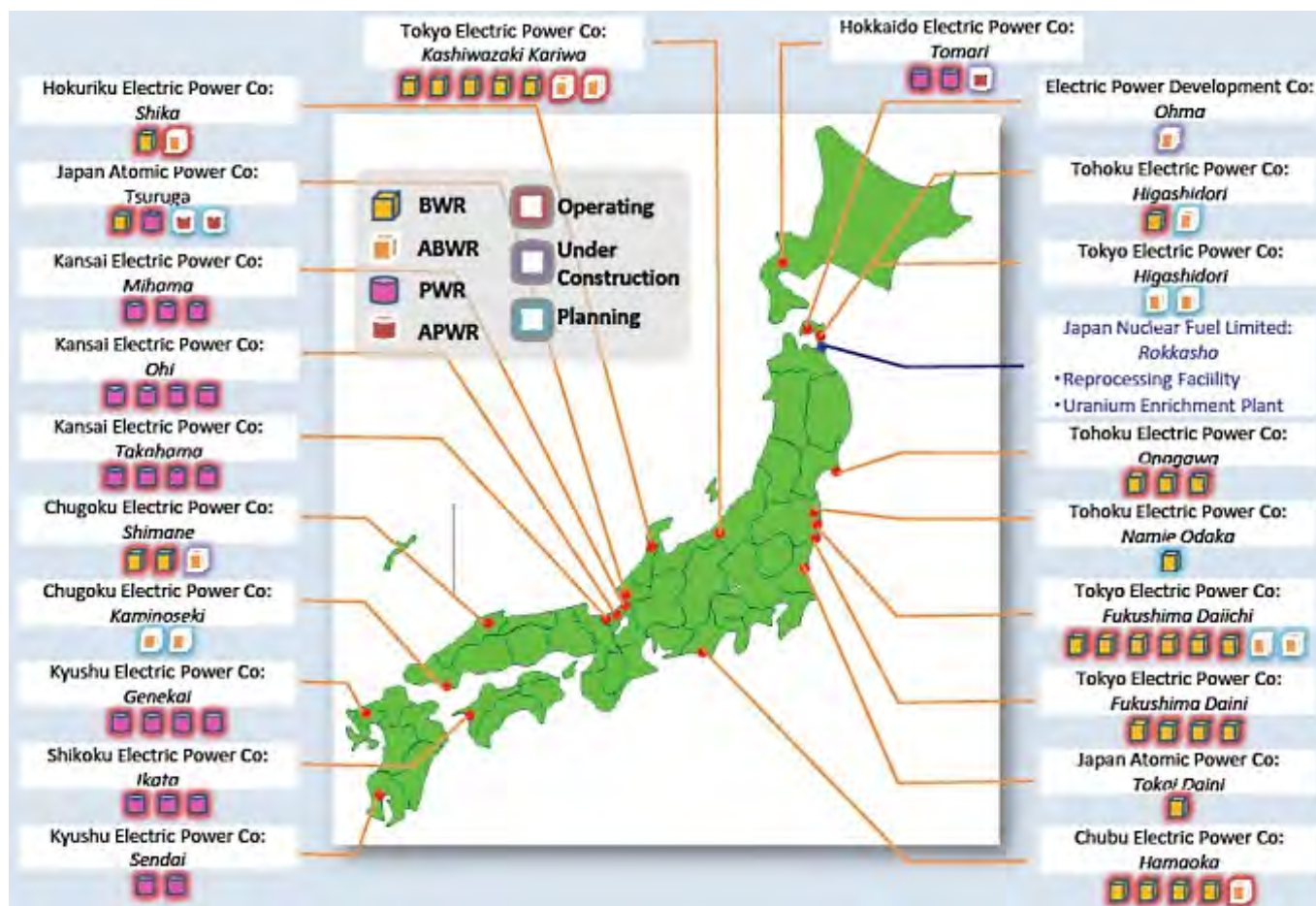
福島第一

Wdrażanie długoterminowego, kompleksowego programu badań i rozwoju energii jądrowej rozpoczęto w Japonii w 1954 roku. Od roku 1956, w którym do realizacji tego programu powołano Komisję Energii Atomowej (*Atomic Energy Commission*) był on wielokrotnie modyfikowany. Komisja Energii Atomowej uznała, że dominującym źródłem energii będzie w XXI wieku w Japonii energia jądrowa pokrywając w 2030 roku 30 do 40 % zapotrzebowania na energię, a w roku 2050 już 60 %. Ważnym elementem programu jest przemysłowe odzyskiwanie uranu i plutonu z wypalonego paliwa w zamkniętym cyklu paliwowym. W świetle ostatnich wydarzeń możli-

wa jest kolejna modyfikacja programu.

Do realizacji pierwotnego programu jądrowego przystąpiły wielkie koncerny energetyczne (m.in., TEPCO - *Tokyo Electric Power Company*, TOHOKU - *Tohoku Power Plant Company*, HOKURIKU - *Hokuriku Electric Power Company*, CHUGOKU - *Chugoku Electric Power Company*, KYUSHU - *Kyushu Electric Power Company*, HEPSCO - *Hokkaido Electric Power Company*, KEPCO - *Kansai Electric Power Company*) zrzeszone w Federacji Towarzystw Energetycznych Japonii - FEPC.

Właścicielem elektrowni Fukushima Daiichi i Daini jest TEPCO. Powstały w 1951 koncern był do niedawna potentatem na rynku energii, posiadając również hydroelektrownie, elektrociepłownie (wykorzystujące węgiel, ropę, gaz) inne elektrownie jądrowe, a także elektrownie doświadczalne, wykorzystujące biomasę, wiatr, słońce, źródła geotermiczne, odpady. Przed wydarzeniami w Fukushimie planowano, że w roku 2019 dostarczana na rynek energia elektryczna wytwarzana przez TEPCO będzie pochodziła z hydroelektrowni (13%), elektrowni węglowych (5%), gazowych (37%), jądrowych (30%), wykorzystujących ropę (15%). Obecnie, po utracie



80% wartości akcji, TEPCO jest na skraju bankructwa, wśród komentatorów coraz częściej mówi się o nacjonalizacji, choć według ostatnich doniesień rząd ma przejąć nie więcej niż 50% akcji niedawnego giganta.

Elektrownia Fukushima Daiichi

Podobnie jak wszystkie pracujące i projektowane japońskie elektrownie jądrowe jest ona wybudowana bezpośrednio nad brzegiem morza, w tym przypadku Oceanu Spokojnego. Taka lokalizacja posiada szereg zalet, przede wszystkim umożliwia wykorzystanie wody morskiej jako wody chłodzącej, co przy ograniczonej ilości słodkowodnych zbiorników wodnych w głębi lądu jest najlepszym i ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem. Wszystkie japońskie elektrownie jądrowe posiadają własne porty, co ułatwia transport świeżego, jak i wypalonego paliwa bezpośrednio z elektrowni do

lub z innych zakładów przemysłowych (zakładów produkcji paliwa, zakładów przerobu) odciażając lądowe drogi komunikacyjne. Istotną wadą takiego usytuowania elektrowni jest trudna do przewidzenia (jak to pokazało ostatnie trzęsienie ziemi) wysokość ewentualnej fali tsunami. Elektrownia Fukushima jest położona na wysokości około 5 m nad lustrem wody w fazie przyływu i miała opierać się fali tsunami wysokości do 5 m. Elektrownia Fukushima Daiichi położona w odległości około 12 km na południe od Fukushimy Daiichi przy podobnej zabudowie i usytuowaniu nie uległa tak silnym zniszczeniom wywołanym falą tsunami ze względu na bardziej nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne.

Rys.1 Elektrownia Fukushima Daiichi



Podstawowe dane elektrowni FUKUSHIMA DAIICHI

	Blok 1	Blok 2	Blok 3	Blok 4	Blok 5	Blok 6
Moc (MW)	460	784	784	784	784	1100
Decyzja budowy (projekt)	25 12 1968	22 12 1967	23 05 1969	30 06 1971	26 02 1971	17 12 1971
Uzyskiwanie Licencji	19 11 1968	18 09 1967	01 07 1969	05 08 1971	22 01 1971	21 12 1971
	01 04 1969	29 01 1968	23 01 1970	13 01 1972	23 09 1971	12 12 1972
Włączenie do sieci	26 03 1971	18 07 1974	27 03 1976	12 19 1978	18 04 1978	24 10 1979
Zestawy paliwowe w rdzeniu	400	548	548	548	548	764
Ilość ton U	69	94	94	94	94	132
Obudowa reaktora	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark II
Wykonawca	General Electric	General Electric & Toshiba	Toshiba	Hitachi	Toshiba	General Electric & Toshiba

Z przedstawionej tabeli wynika, że wzrost wytwarzanej energii w elektrowni Fukushima Daiichi uzyskano głównie poprzez zwiększenie ilości materiału jądrowego (uranu) w rdzeniu reaktora, bez dokonywania ulepszeń konstrukcyjnych - dopiero w bloku 6 wprowadzono dodatkowe zmiany konstrukcyjne. W sąsiedzącej z elektrownią Fukushima Daiichi elektrowni Fukushima Daini zastosowano bardziej zaawansowaną technologię (bloki 2, 3, 4), jedynie blok 1 ma konstrukcję identyczną z blokiem 6 Fukushimy Daiichi. Ilość materiału jądrowego w rdzeniach jest we wszystkich blokach identyczna.

Jednym z działań podjętych w celu pełnej realizacji długoterminowego rozwoju energetyki jądrowej jest zwiększenie współczynnika wykorzystania reaktora, tzn. wielkości określającej stosunek liczby godzin pracy reaktora do liczby godzin w danym roku wyrażony w procentach. Przerwy w pracy reaktora są planowane i wynikają m.in. z konieczności kontroli.

Rok	Blok 1	Blok 2	Blok 3	Blok 4	Blok 5	Blok 6
1971	66,2					
1979	58,3	65,7	58,8	59,5	70,9	98,0
2009	91,7	73,4	71,2	82,6	86,5	80,0

Współczynnik wykorzystania reaktorów Fukushima Daiichi

Zasada pracy reaktora BWR

Reaktory w elektrowni Fukushima Daiichi są reaktorami typu BWR (Boiling Water Reactor) tzw. Reaktory z Wrzącą Wodą. W Reaktorach z Wrzącą Wodą woda, która omywa zestawy paliwowe reaktora wrze i paruje. Para przepływa przez systemy osuszania umieszczone nad rdzeniem i jest doprowadzana do turbin, gdzie po wykonaniu pracy i skropleniu w skraplaczu (chłodnicy) powraca do reaktora. Jest to tzw. system jednobiegowy, który jest cechą charakterystyczną reaktorów typu BWR. Zaletą tego rozwiązania jest znaczne uproszczenie konstrukcji reaktora, np. nie ma konieczności stosowania wytwornic pary, a względnie niskie temperatury wewnątrz rdzenia oraz niskie ciśnienie pozwalają na zmniejszenie grubości stalowych ścian reaktora do 16 cm. Temperatura pary nasyco-

nej poruszająca turbinę wynosi około 280 0C, a jej ciśnienie około 7 MPa. Natomiast wadą tego typu rozwiązania jest konieczność budowy odpowiednio skonstruowanych turbin napędzanych parą zawierającą cząstki radioaktywne.

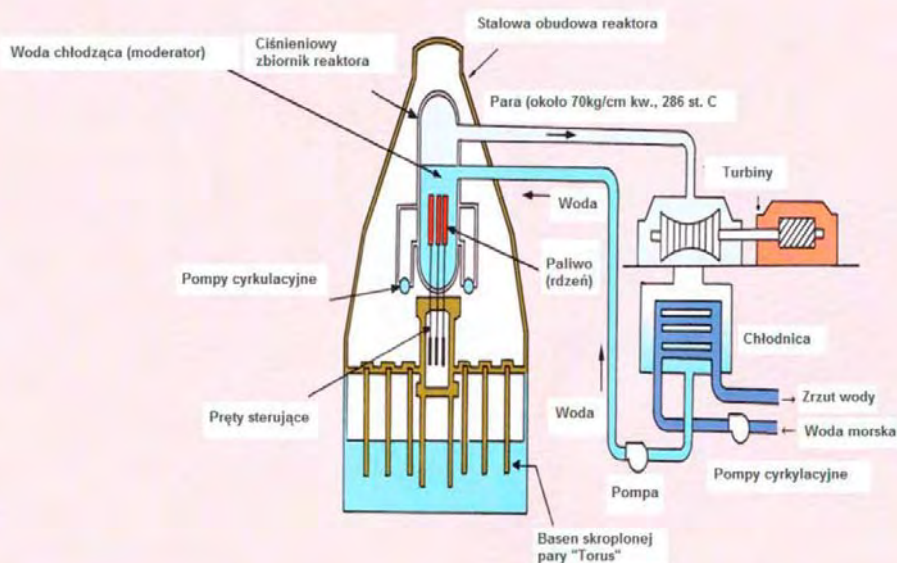
Budowa zestawów paliwowych jest podobna do budowy zestawów używanych w reaktorach ciśnieniowych tzn. w rurkach cyrkonowych stanowiących pręty paliwowe umieszczone są pastylki uranowe (walce o średnicy około 1 cm i długości również 1 cm). Zestaw prętów 7x7 (w nowszych konstrukcjach 9x9) stanowi zestaw paliwowy, tzw. kasetę. Kasety umieszczane są w rdzeniu, a ich ilość jest różna dla różnych rozwiązań reaktorów. Inną charakterystyczną cechą tych reaktorów jest wprowadzenie elementów sterujących w dolnej części rdzenia.

Basen skroplonej pary jest układem bezpieczeństwa reaktora. Przy zbyt dużym ciśnieniu przy wzroście temperatury rdzenia nadmiar pary jest odprowadzany do zbiornika w kształcie pierścienia (geometryczna nazwa torus), gdzie ulega skropleniu. Podczas normalnej pracy elektrowni reaktor jest przysłonięty od góry pokrywą uzupełniającą betonową obudowę bezpieczeństwa. Ściana obudowy jest wykonana ze specjalnie wzmocnianego betonu i ma grubość powyżej 1,5 m. W czasie wymiany paliwa zdejmowane są pokrywa betonowej osłony reaktora (składająca się z kilku części), oraz pokrywa stalowej obudowy bezpieczeństwa. Stalowa obudowa bezpieczeństwa jest na ten okres składowana w hali obok reaktora, a górna pokrywa zbiornika reaktora wraz z elementami systemu osuszania pary jest składowana pod wodą w basenie pomocniczym (na rys.3 basen z lewej strony naprzeciwko basenu wypalonego paliwa). W blokach 1, 2, ,3, 4 w chwili trzęsienia ziemi zadziałały

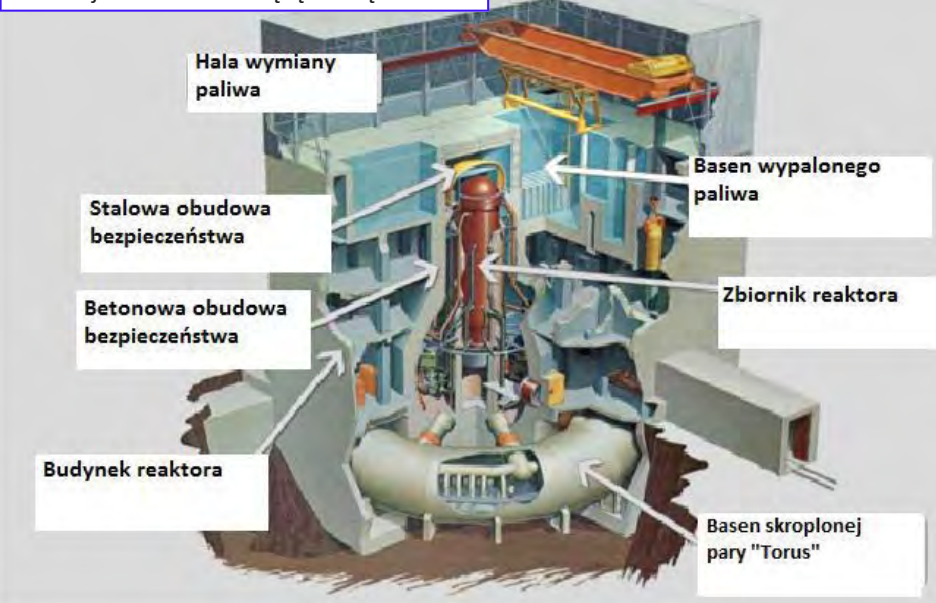
wszystkie urządzenia awaryjne i bloki zostały wyłączone. Jednakże wysoka fala tsunami uszkodziła systemy awaryjnego chłodzenia powodując przez to dalsze zniszczenia. Podobne usytuowanie elektrowni Daini oraz bloków 5 i 6 w Daiichi, ale o bardziej nowoczesnych rozwiązaniach systemu chłodzenia nie spowodowało takich skutków awarii.

Na terenie elektrowni Daiichi projektowano w najbliższym czasie rozpoczęcie budowy dalszych bloków 7 i 8 z reaktorami ABWR (Advanced Boiling Reactors) - Zaawansowane Reaktory z Wrzącą Wodą tj. reaktory trzeciej generacji +. W następnych latach planowano zastąpić obecnie pracujące reak-

Reaktor z Wrzącą Wodą

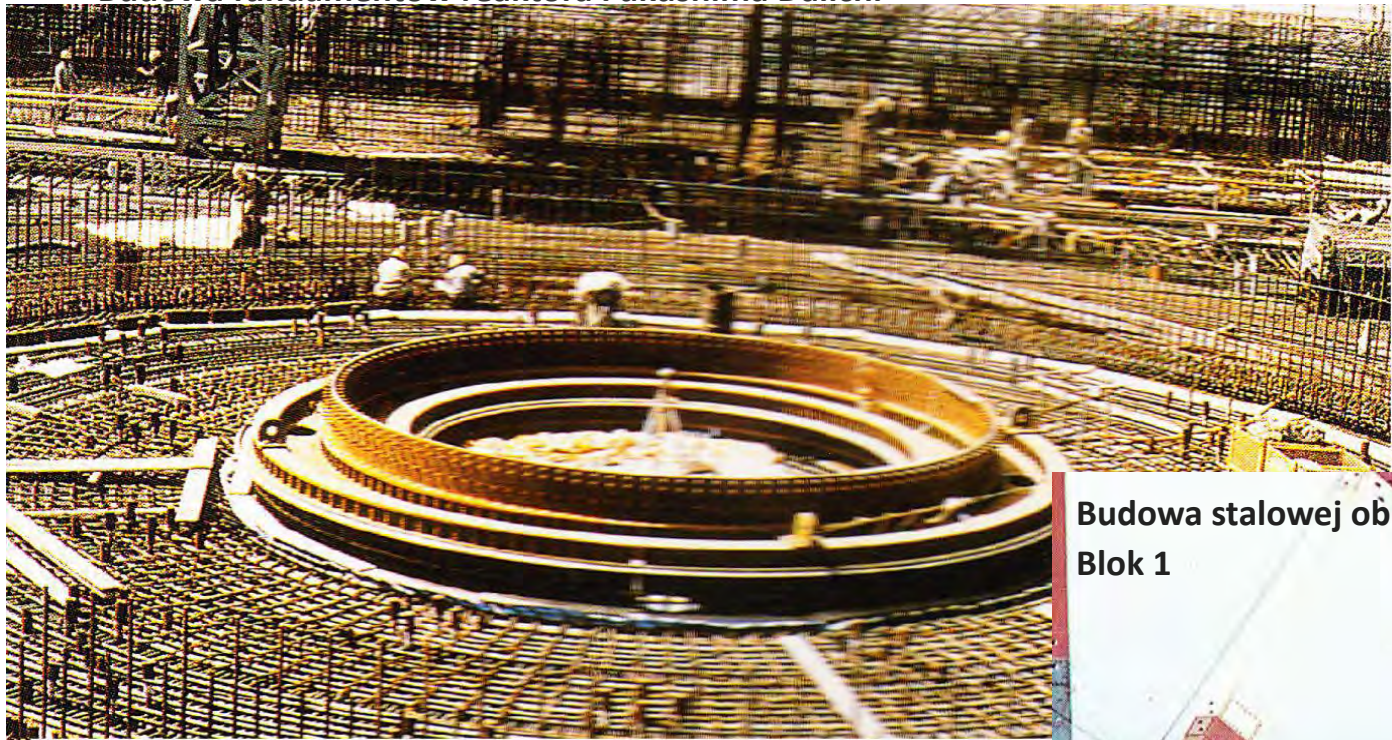


Przekrój Reaktora z Wrzącą Wodą

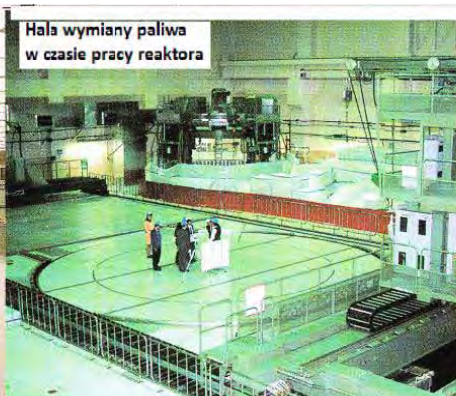


tory reaktorami ABWR. Istniejąca już na terenie obecnego obiektu infrastruktura (magazyny odpadów, zakłady unieszkodliwiania odpadów, stacje wysokiego napięcia dołączone do sieci krajowej, doprowadzone linie przesyłowe, tymczasowe magazyny wypalonego paliwa, zatwierdzona lokalizacja) pozwala przypuszczać, że po opanowaniu sytuacji plany te mogą być realizowane. Zniszczone reaktory, jeżeli nie mogłyby być rozebrane, muszą być umieszczone w sarkofagach, a zgromadzony tam materiał jądrowy będzie musiał być stale chłodzony.

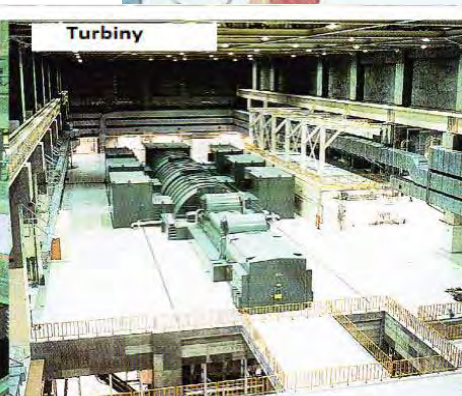
Budowa fundamentów reaktora Fukushima Daiichi

Budowa stalowej obudowy b
Blok 1

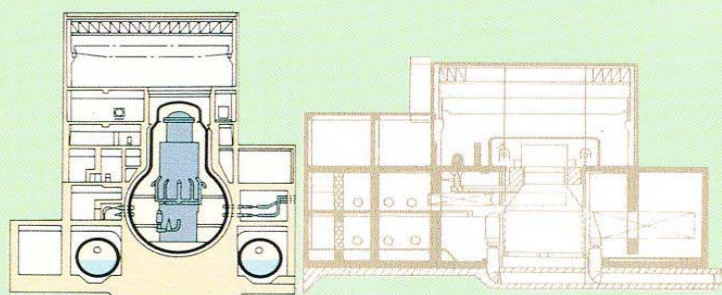
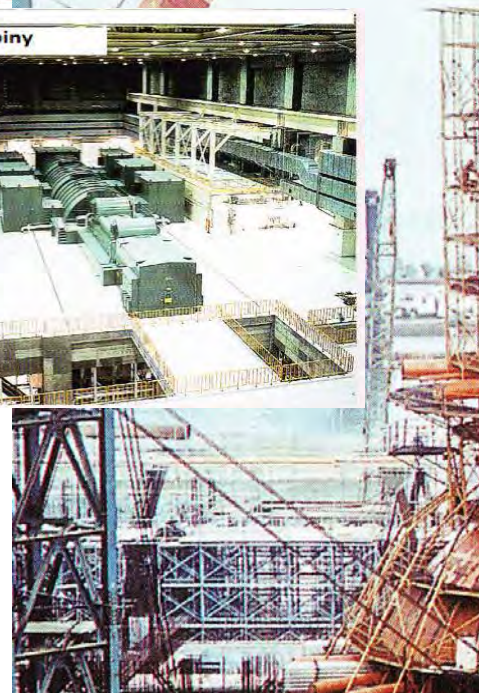
Sterownia

Hala wymiany paliwa
w czasie pracy reaktora

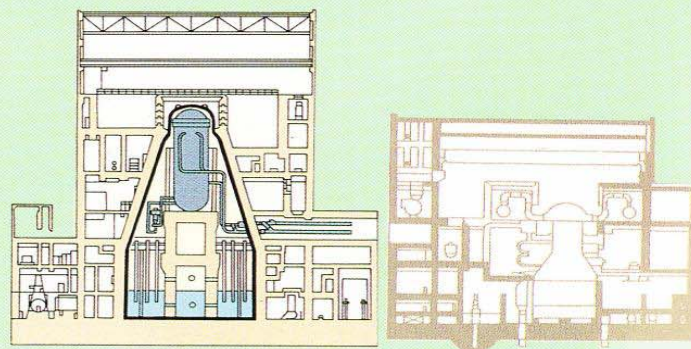
Turbiny



Pomieszczenia elektrowni. Na zdjęciu, przedstawiającym halę wymiany paliwa widać z lewej strony fragment urządzenia przeładowawczego zatrzymanego na skraju basenu wypalonego paliwa. W sterowni umieszczone są wszystkie wskaźniki połączone z niezliczoną ilością mierników, czujników, oraz detektorów, informujące o pracy reaktora, jak również systemy umożliwiające ingerencję operatora, jeśli zawiodą systemy automatyki. Czujniki wykrywające trzęsienia ziemi znajdują się na kilku poziomach budynku reaktora.

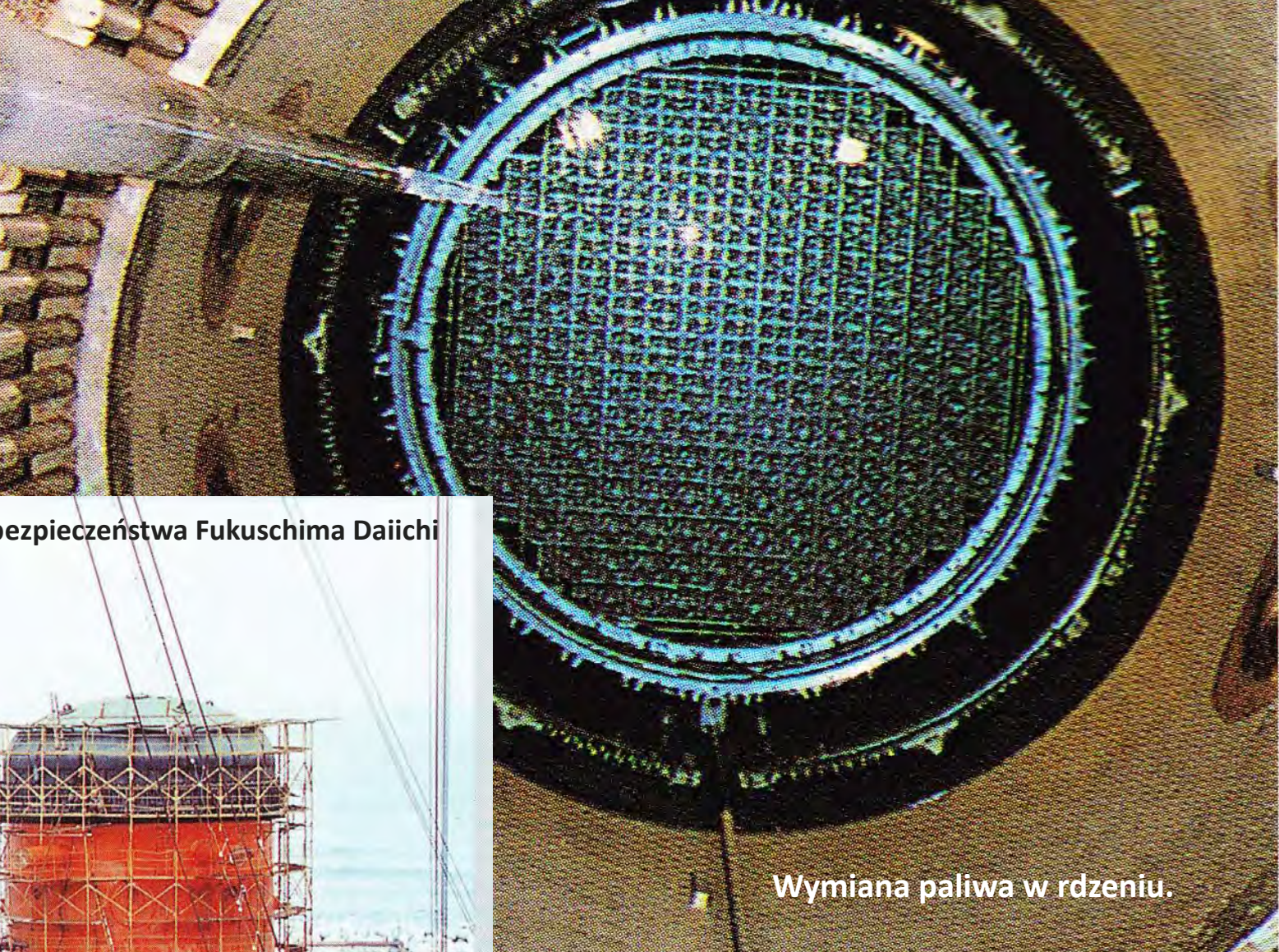


Fukushima Daiichi No. 1-5



Fukushima Daiichi No. 6

Porównanie konstrukcji reaktorów pracujących w elektrowni Fukushima Daiichi



bezpieczeństwa Fukushima Daiichi

Wymiana paliwa w rdzeniu.



Budowa stalowej obudowy bezpieczeństwa reaktora Fukushima Daiichi Blok 6





Literatura

Foldery: Tokyo Electric Power Company,
Tokyo 1-3 Uchisawaicho 1-Chome Chyoda-ku
Fukushima Daiichii Power Station , 22 Kitarhara Ottozawa
Ohkuma-machi Futaba-gun Fukushima-ken

www.tepco.co.jp 2011 03 26

www.iaea.org 2011 03 29

Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

Wieloletni inspektor MAEA w Japonii i Dalekim Wschodzie

Obecnie Sekretarz SEREN POLSKA



Zdzisław Celiński

Energetyka a środowisko

Energia jest podstawą funkcjonowania współczesnej cywilizacji. Najbardziej wartościową, uszlachetnioną formą energii jest energia elektryczna. Przesądza o tym łatwość jej przemiany z wysoką sprawnością w inne użyteczne formy energii, a ponadto możliwość jej przesyłania nawet na znaczne odległości.

Wielkość jej zużycia przez mieszkańców jest dzisiaj w dużym stopniu miarą dobrobytu i poziomu cywilizacyjnego kraju. Produkcja i zużycie energii elektrycznej stale rośnie. Pociąga to za sobą potrzebę budowy coraz to nowych elektrowni oraz konieczność podejmowania decyzji co do doboru paliwa. W przeszłości decyzje podejmowane były zazwyczaj na podstawie kryteriów technicznych i ekonomicznych. Od kilkunastu już lat dołączono do nich kryterium ochrony środowiska, które nabiera coraz większego znaczenia przy podejmowaniu tychże decyzji.

Teoretycznie wyboru można dokonywać spośród wielu typów elektrowni, takich jak: elektrownie jądrowe, klasyczne – opalane węglem (kamiennym lub brunatnym), ropą lub gazem, elektrownie wodne bądź oparte na tzw. odnawialnych źródłach energii (wiatr, słońce, biomasa, biogaz, fale morskie itd.). W rzeczywistości możliwości wyboru są ograniczone, gdyż niektóre rozwiązania trzeba z góry odrzucić.

Ropa jest dzisiaj zbyt cennym surowcem dla przemysłu chemicznego oraz podstawowym źródłem energii dla komunikacji samochodowej, żeby mogła zastępować węgiel w dużych elektrowniach i ciepłowniach. Podobnie gaz. Jego zużycie na świecie ostatnio szybko rośnie: zastępuje on coraz częściej ropę jako surowiec chemiczny oraz zaczyna ją wypierać jako paliwo samochodowe: tańsze i bardziej czyste ekologicznie.

Chociaż buduje się ostatnio pojedyncze elektrownie i ciepłownie opalane gazem małej i średniej mocy to jednak jest wątpliwe czy w dalszej perspektywie będzie to opcja uzasadniona ekonomicznie dla elektrowni o dużej mocy. Ceny gazu przy rosnącym zapotrzebowaniu będą najprawdopodobniej szybko wzrastać i zniweczą ekonomiczne uzasadnienie wyboru takiego wariantu. Gaz – podobnie jak ropa – jest zbyt cennym surowcem chemicznym, żeby używać go jako paliwa w dużych elektrowniach pokrywających obciążenie podstawowe.

Natomiast uzasadnione ekonomicznie będzie użycie gazu w tanich niewielkich turbinowych elektrow-

niach o stosunkowo niewielkiej sprawności, wytwarzających w krótkich okresach czasu drogą energię szczytową. Uzasadniona ekonomicznie może być również budowa tanich inwestycyjnie elektrowni gazowych przeznaczonych do rezerwowania elektrowni wiatrowych i słonecznych.

Dodatkowym argumentem przeciwko użyciu gazu i ropy jako paliwa w elektrowniach jest ograniczoność ich zasobów. Rozsądek nakazuje ostrożną, nie rabunkową, ich eksploatację tak aby zachować ich zasoby również dla następnych pokoleń.

Elektrownie wodne mogą być rozbudowywane na większą skalę jedynie w krajach obfitujących w wodę i mających korzystne położenie geograficzne.

Tzw. odnawialne źródła energii z uwagi na swoje możliwości nie mogą być traktowane, nawet w przyszłości, jako źródła dużej mocy elektrycznych. Ich entuzjaści, po początkowym okresie euforii, zdają sobie chyba już dzisiaj sprawę, że mogą one odegrać jedynie uzupełniającą rolę z uwagi przede wszystkim na ograniczone moce, jakich są w stanie dostarczyć.

Pozostają więc jedynie elektrownie węglowe i jądrowe jako realne źródła dużej mocy elektrycznych pokrywające obciążenie podstawowe systemów elektroenergetycznych. Przyjrzyjmy się bliżej wpływom tych dwóch opcji na środowisko naturalne.

Elektrownie węglowe a środowisko

Elektrownie opalane węglem wywołują szkody ekologiczne w środowisku związane ze:

- spalaniem węgla, w wyniku czego do środowiska dostaje się wiele szkodliwych substancji zawartych w węglu;
- ciepłym zanieczyszczeniem środowiska wodnego;
- procesem wydobywania węgla kamiennego i brunatnego w kopalniach.

Typowa elektrownia węglowa o mocy 1000 MW zużywa rocznie ok. 3,0 mln t rzeczywistego węgla kamiennego. Oznacza to konieczność dostarczenia do niej dziennie 10 pociągów z węglem (z dwudziestoma 50-tonowymi wagonami każdy).

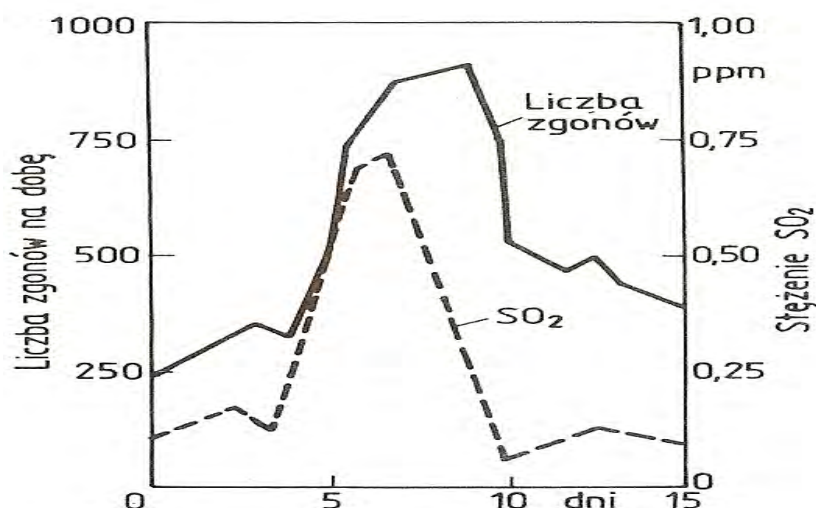
Podczas spalania różnych rodzajów węgla powstają zanieczyszczenia, które kwalifikuje się jako gazowe (SO₂, NO_x, CO₂, węglowodory) albo stałe (żuźle, pyły lotne). Skutki zanieczyszczeń

wprowadzanych przez elektrownie do środowiska są na ogół poznane. Powodują one choroby u ludzi i zwierząt, niszczenie roślinności, gleby, niszczenie budowli (w tym zabytkowych), korozję metali, niszczenie odzieży itp.

Dokonajmy krótkiego przeglądu szkodliwych substancji uwalnianych z węgla w procesie spalania i emitowanych do środowiska oraz ich skutków.

Ditlenek siarki (SO₂)

Węgiel w zależności od pochodzenia zawiera do 4% siarki, która w procesie spalania utlenia się, tworząc związek SO₂, będący najbardziej szkodliwą substancją uwalnianą z elektrowni węglowych. Jest on czynnikiem wywołującym podrażnienia oskrzeli i płuc i prowadzącym do rozwoju - przy przekroczeniu



Rys. 1. Związek między liczbą zgonów a stężeniem SO₂ w powietrzu w kolejnych dniach występowania smogu w Londynie w grudniu 1952 r. [4] (1 ppm SO₂ odpowiada 2.86 mg SO₂/m³ powietrza)

stężen granicznych - przewlekłych nieżytów dróg oddechowych, rozedmy płuc, a w przypadku wystąpienia znacznych stężeń, czemu mogą sprzyjać określone warunki atmosferyczne, do wyraźnego wzrostu liczby zgonów ludzi wskutek schorzeń układu oddechowego i krążenia. Prawdopodobnie wzmacnia on również rakotwórcze działanie innych czynników [1, 2].

Wysoką szkodliwość SO₂ rozpoznano już dawno. W Londynie np. już w średniowieczu czyniono próby skłonienia ludności, z niewielkim zresztą powodzeniem, do zastąpienia spalania węgla spalaniem znacznie droższego drewna [3]. Danych co do ilościowych zależności między zwiększeniem umieralności a stężeniem SO₂ w powietrzu dostarczyły statystyki prowadzone w okresach występowania intensywnego

smogu – gęstej mgły zawierającej domieszki dymu i spalin (dym – SMOke, mgła – foG). Występuje on stosunkowo rzadko w specjalnie niekorzystnych warunkach pogodowych (brak ruchów powietrza, inwersja termiczna), które utrudniają rozproszenie zanieczyszczeń, powodując ich kumulację w przyziemnej warstwie atmosfery. Po raz pierwszy stwierdzono wyraźny wzrost liczby zgonów w okresie występowania smogu w 1930 r. w belgijskim Maastal, później w 1948 r. w śródmieściu Donal (Stany Zjednoczone, Pensylwania). Największa znana katastrofa wywołana smogiem miała miejsce w grudniu 1952 r. w Londynie, gdzie w ciągu dwóch tygodni zmarło ok. 4000 osób więcej niż w innych latach o tej samej porze roku. Zależność między tą liczbą zgonów a stężeniem SO₂ w powietrzu ilustruje rys.1 [4]. Po następ-

nych wystąpieniach smogu w Londynie w latach 1956-1963, które spowodowało ok. 3200 ofiar, podjęto energiczne środki zapobiegające dalszym katastrofom (zmiana systemu ogrzewania). Przypadki takie zarejestrowano również w innych miejscowościach jak np. w grudniu 1962 r. w Zagłębiu Ruhry. Według danych zebranych przez specjalistów w różnych krajach świata [6], szacuje się, że typowa elektrownia węglowa o mocy 1000 MWe powoduje przedwczesną śmierć od 100 do 500 osób rocznie w zależności od zawartości siarki w spalonym węglu, liczby ludności zamieszkałej w pobliżu elektrowni oraz od warunków meteorologicznych.

Osobnym zagadnieniem jest oddziaływanie SO₂ na środowisko. W obecności promieniowania słonecznego i wilgoci z ditlenku siarki i wolnego tlenu powstaje w wyniku kilku reakcji chemicznych kwas siarkowy. Powstający w tych reakcjach ozon (O₃) drażni drogi oddechowe i reaguje z innymi zanieczyszczeniami powietrza, wytwarzając przy tym dodatkowo związki szkodliwe dla zdrowia.

Opadające z wodą deszczową cząstki kwasu siarkowego (i azotowego – powstałe w podobnych procesach z tlenków azotu) tworzą tzw. kwaśne deszcze. Mogą one występować w rejonach odległych setki kilometrów od źródeł emitujących SO₂. Wywołują one ogromne szkody w gospodarce narodowej, zakwaszając gleby i wody powierzchniowe, dewastując ogromne obszary lasów, niszcząc życie w akwenach, powodując korozję konstrukcji metalowych i budynków (zabytki!).

Głównym źródłem emisji SO_2 do atmosfery są elektrownie zawodowe i przemysłowe. W roku 2008 dostarczyły one ok. 64% SO_2 emitowanego w Polsce do atmosfery [9].

Można znacznie ograniczyć emisję SO_2 do atmosfery budując instalacje odsiarczania spalin. Są one jednak kosztowne (stanowią ok. 10-15% kosztów budowy elektrowni) i zużywają znaczne ilości energii. W starych elektrowniach bardzo często możliwości dobudowy instalacji odsiarczania są ograniczone, ponieważ instalacje te wymagają wiele miejsca. W ostatnich latach znacznie ograniczono emisję SO_2 do atmosfery budując w większości elektrowni w Polsce instalacje odsiarczania spalin.

Pomimo to emisja SO_2 jest poważnym problemem w Europie. Zanieczyszczenia przenoszone są z pomocą wiatrów setki kilometrów od źródeł ich emisji ponad granicami państwowymi. W Szwecji zanieczyszczenia przywiane z kontynentu oraz wysp brytyjskich wywołały kwaśne deszcze, które zatrały ok. 20% jezior. Pomiaru opadu siarki (mierzone w mg S na 1 m^2 i miesiąc) wykonane



Rys. 3. Średni opad siarki w Europie w latach 80-tych (w $\text{mg S/m}^2 \cdot \text{miesiąc}$) [6]

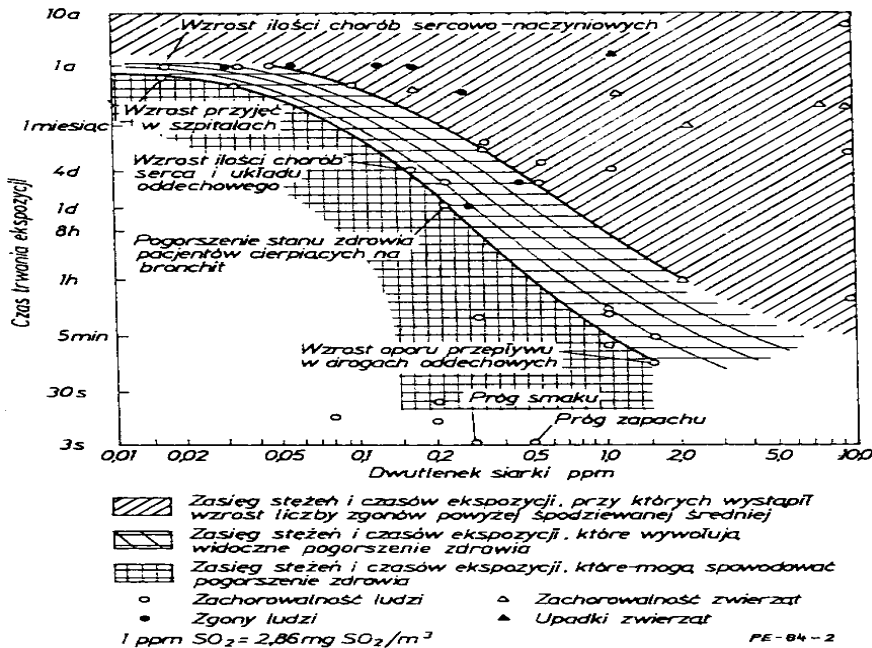
Wałbrzychu średni okres życia był krótszy o 6 lat od średniej krajowej [7, 8]

Tlenki azotu (NO_x)

Tlenki azotu nawet w minimalnych stężeniach działają drażniąco na błonę śluzową dróg oddechowych, wywołując nieżyty i infekcje (nieżyty oskrzeli, zapalenia płuc). W większych stężeniach wywołują choroby serca i choroby nowotworowe.

Tlenki azotu (NO , NO_2 , N_2O) powstają w reakcji azotu z tlenem wszędzie tam, gdzie reakcja spalania przebiega w wysokiej temperaturze, np. w paleniskach kotłowych, w samochodowych silnikach spalinowych itp. W paleniskach domowych tworzą się one jedynie w minimalnym stopniu. W smogu ditlenek azotu reaguje z ozonem i cząsteczkami wody, tworząc agresywny kwas azotowy występujący w postaci aerozolu. Nitrozoaminy – powstałe w reakcjach kwasu azotowego ze związkami organicznymi aminami – są substancjami silnie rakotwórczymi [2].

Przez odpowiednio zorganizowany proces spalania można zmniejszyć intensywność powstawania NO_x , jednak nie można całkowicie zapobiec ich powstawaniu. Neutralizacja tlenków azotu w spalinach jest znacznie trudniejsza niż odsiarczanie spalin. Szacuje się, że wspólny koszt instalacji oczyszczania spalin z SO_2 i NO_x wynosi 15...20% kosztów budowy



Rys.2. Wpływ oddziaływania ditlenku siarki na zdrowie i życie ludzi oraz zwierząt [5].

w latach osiemdziesiątych w Europie wskazują, że spośród trzech rejonów uznanych za najbardziej zanieczyszczone (Zagłębie Donieckie, Górny Śląsk i Płn. Czechy/Rejon Turosszowa) dwa znajdują się całkowicie lub częściowo na terenie Polski (rys. 3). Badania wpływu zanieczyszczeń na populację prowadzone w latach 70-ch na Śląsku wykazywały np. że w

elektrowni, a koszt produkcji energii elektrycznej wzrasta wtedy o 10...15%.

W Polsce [9] emisją tlenków azotu do atmosfery elektrownie „dzielą” się z motoryzacją. Ta wprowadza ok. 42% całkowitej emisji tlenków azotu a energetyka ok. 37%.

Pyły z elektrowni

Węgiel oprócz siarki zawiera w mniejszych lub większych ilościach ok. 60 różnych pierwiastków. Po spaleniu węgla wszystkie one wchodzi w skład popiołu lotnego i żużla. Pyły zatrzymywane są w filtrach elektrostatycznych, które teoretycznie mogą zatrzymać nawet do 99,8% pyłów lotnych. W praktyce ich skuteczność jest niższa. W Polsce w 2008 r. z wytworzonych w elektrowniach żużli i popiołów do atmosfery przeniknęło 33 000 t pyłu lotnego [9]. Jednak głównym „producentem” pyłów lotnych są lokalne kotłownie i paleniska domowe.

Zagrożenie zdrowia pyłami z elektrowni nie jest tak dobrze rozeznane jak zagrożenie SO_2 , jednak specjaliści są zdania, że może być ono nawet większe. Szczególnie niebezpieczne są drobne cząstki o średnicy mniejszej od 2,5 mikrona ($\text{PM}_{2,5}$), łatwo przenikające przez urządzenia odpylające. Frakcje drobnych pyłów stanowią największe zagrożenie dla zdrowia: najdłużej przebywają w atmosferze, a zatem mają największe możliwości przedostania się do organizmu ludzkiego, najmocniej osadzają się w głębokich partiach płuc i najmniej skutecznie są wydalane, zawierają największe ilości toksycznych metali uwalnianych podczas spalania węgla [10]. Wywołują one choroby płuc, chroniczne bronchity, a prawdopodobnie również i nowotwory płuc.

Metale ciężkie

Wśród pierwiastków zawartych w węglu znajduje się wiele pierwiastków, w tym toksycznych, takich jak rtęć, ołów, kadm, arsen. Część z nich pozostaje w żużlu oraz popiołach lotnych zatrzymanych w filtrach, część natomiast przedostaje się do otoczenia w postaci najmniejszych cząstek łatwiej przechodzących przez urządzenia odpylające bądź w postaci par (np. 90% rtęci ze spalonego węgla wydziela się w postaci par [10]). W pyłach lotnych zaobserwowano wyższe stężenie niektórych metali ciężkich i innych pierwiastków niż w żużlu.

Wysoce szkodliwe metale ciężkie, podobnie jak inne pierwiastki przenikające do środowiska, tj. do atmosfery, gleby i wody, ulegają zwykle przemianom biochemicznym, tworząc formy łatwo przyswa-

jalne przez organizmy żywe, a więc i człowieka.

Pierwiastki promieniotwórcze

Węgiel – obok innych pierwiastków zawiera również kilka pierwiastków promieniotwórczych. Są to głównie uran i tor oraz produkty ich rozpadu promieniotwórczego. Największe znaczenie mają izotopy radu Ra-228 i Ra-226 (przeszło 90-procentowy udział w dawkach pochodzących z produktów spalania węgla). Zawartość produktów promieniotwórczych w węglu nie jest na ogół duża, zmienia się przy tym w dużym zakresie w zależności od złoża, jednak po spaleniu ich stężenie w żużlu i w popiołach lotnych może się wielokrotnie zwiększyć. Aktywność Ra-226, Th-232, U-235, U-238 w pyłach lotnych wzrasta 10-krotnie, Pb-210 100-krotnie, a Po-210 200-krotnie w porównaniu z aktywnością właściwą węgla [11]. Dawki wywołane ich obecnością są na ogół małe, chociaż w zależności od pochodzenia węgla mogą znacznie przewyższyć dawki spowodowane przez elektrownie jądrowe [12].

Dytlenek węgla

Poważnym problemem mającym znaczenia dla całej ludzkości, a nie tylko mieszkańców okolic elektrowni, może być stale zwiększająca się zawartość CO_2 w atmosferze Ziemi. Zasadniczym zagrożeniem, które może spowodować zwiększenie jego ilości, jest zakłócenie równowagi promieniowania w atmosferze ziemskiej, wywołujące tzw. efekt szklarniowy albo cieplarniany.

Główną przyczyną zwiększania się zawartości CO_2 w atmosferze jest proces spalania paliw organicznych. Spalenie 1 kg węgla dostarcza 2...4 kg CO_2 (w zależności od zawartości pierwiastka C w spalonym węglu).

Większość klimatologów jest zdania, że dalszy wzrost zawartości CO_2 w atmosferze grozi trudnymi do przewidzenia zmianami klimatycznymi w skali globu ziemskiego już w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat. Pogląd ten zresztą, jest w dalszym ciągu dyskusyjny - również wśród klimatologów.

Zawartość CO_2 w atmosferze wzrosła w ciągu ostatnich 200 lat z 292 ppm do 350 ppm i rośnie w przyspieszonym tempie ok. 1 ppm rocznie (od 314 ppm w roku 1960 wzrosła do 327 ppm w roku 1975 [13]). Wielu klimatologów obawia się, że wzrastające tempo przyrostu zawartości CO_2 w atmosferze może doprowadzić w ciągu najbliższych 30...50 lat do wzrostu jej średniej temperatury o ok. 2° C. Wzrost

taki może spowodować katastrofalne zmiany klimatyczne (stopnienie części lodów polarnych, podniesienie się poziomu mórz o kilka metrów, zmianę linii brzegowych kontynentów, zatopienie większości portów, przesunięcie stref klimatycznych itd.), zwłaszcza jeśli się zważy, że różnica średnich temperatur między okresem dzisiejszym i lodowcowym sprzed 10 000 lat wynosi jedynie 5° C.

Część badaczy zajmujących się prognozowaniem przyszłości z pomocą modelowania prawdopodobnych scenariuszy rozwoju ludzkości ostrzega przed skutkami kontynuacji aktualnej linii rozwoju i wskazuje na konieczność zmiany strategii pokrywania energetycznych potrzeb ludzkości przez ograniczenie spalania węgla i węglowodorów. Waga tego zagrożenia znajduje coraz większe zrozumienie wśród polityków w krajach uprzemysłowionych, które przyczyniają się w największej mierze do emisji CO₂. Zawarto szereg międzynarodowych porozumień mających na celu ograniczenie emisji CO₂. Porozumienia te zostały ratyfikowane przez większość krajów rozwiniętych. Unia Europejska przewiduje zmniejszenie emisji CO₂ do roku 2020 o 20% w stosunku do roku 2003. Przydzielane są poszczególnym krajom roczne limity na emisję CO₂. Wszystko to pociągnie za sobą znaczny wzrost kosztów wytwarzania w elektrowniach węglowych i doprowadzi do zasadniczych zmian relacji kosztów wytwarzania w elektrowniach jądrowych i węglowych na niekorzyść tych ostatnich.

Szkody ekologiczne związane z kopalnictwem węgla

Kopalnictwo węgla kamiennego wywołuje wiele szkód ekologicznych z których najbardziej znane są:

- tzw. szkody górnicze wywołane zapadliskami nieraz dużych obszarów, często zabudowanych,
- zatrucia rzek zasolonymi wodami wypompowywanymi z kopalni,
- zagrożenia chorobami zawodowymi górników (głównie pylicą płuc).

Do tego należy doliczyć wysokie ryzyko zawodowe górników (do niedawna średnio 1 ofiara śmiertelna w wypadkach kopalnianych na 2 mln ton wydobytego węgla).

Kopalnie węgla brunatnego pracują w zupełnie odmiennych warunkach (kopalnie odkrywkowe), powodując innego rodzaju szkody ekologiczne, takie jak:

- wycofywanie z eksploatacji rolniczej tysięcy hek-

tarów ziemi uprawnej, często wysokiej klasy,

- degradacja rolniczych terenów w promieniu kilkudziesięciu kilometrów wokół kopalni w wyniku obniżenia poziomu wód gruntowych (tzw. lej depresyjny),
- zatrucie rzek zasolonymi wodami wypompowywanymi z kopalni,
- szkody związane z degradacją krajobrazu – powstawanie „księżycowego” krajobrazu na dużych połaciach kraju.

Elektrownie wodne a środowisko

Wbrew rozpowszechnionej opinii, praca dużych elektrowni wodnych, liczących się w bilansie energetycznym, nie jest obojętna dla środowiska. Elektrownie te stanowią również realne zagrożenie, z którym należy się liczyć.

Budowie wielkich elektrowni towarzyszy zwykle budowa wielkich tam (jak np. na rzece Parana w Ameryce Płd., rzece Jangcy w Chinach czy Assuanie w Egipcie) i tworzenie ogromnych zalewów. Wymaga to wysiedlenia często setek tysięcy ludzi, powoduje zmianę warunków nawadniania na wielkich obszarach, a wskutek zwiększenia powierzchni parowania zmniejsza się całkowity przepływ wody w rzece. Tam zatrzymuje niesiony przez rzekę muł, który powinien być usuwany, a równocześnie zostaje zredukowane użytkowanie przez muł terenów w dolnym biegu rzeki. Dobrze znane są skutki budowy tamy w Assuanie, która spowodowała gwałtowny spadek produkcji rolnej w delcie Nilu.

Budowa zapór na nizinnych rzekach zanieczyszczonych ściekami powoduje, że ulubione przez miłośników sportów wodnych zalewy zamieniają się stopniowo w cuchnące bagna wydzielające siarkowodor.

Poza tym samo istnienie tamy spiętrzającej ogromne ilości wody stanowi stałe zagrożenie, gdyż jej zerwanie wywołać może powódź o katastrofalnych rozmiarach. Że takie wypadki się zdarzają, wystarczy przypomnieć katastrofę tamy Sout Fork Dam w Pensylwanii w 1889 r., która spowodowała śmierć ponad 2200 osób [6].

Elektrownie jądrowe a środowisko

Elektrownia jądrowa wpływa na otaczające środowisko:

- poprzez uwolnienia substancji promieniotwórczych do otoczenia oraz

- poprzez upusty podgrzanej wody używanej jako woda chłodząca skraplacze pary (jest to tzw. ciepłe zanieczyszczenie środowiska wodnego).

W pracy elektrowni z reaktorem PWR nie można uniknąć uwalniania do otoczenia od czasu do czasu niewielkich ilości substancji promieniotwórczych w postaci gazowej i ciekłej. Wśród kilkunastu a niekiedy kilkudziesięciu tysięcy prętów paliwowych znajdujących się w rdzeniu może znaleźć się niewielka liczba prętów niecałkowicie szczelnych, z których część gazowych produktów rozszczepienia dostaje się do wody chłodzącej rdzeń reaktora. Chodzi tu głównie o izotopy gazów szlachetnych (ksenon, krypton) oraz lotne izotopy jodu. Gazy te po wydostaniu się z wody zbiera się i magazynuje przez jakiś czas, aby krótkożyciowe produkty rozszczepienia uległy rozpadowi, następnie przez komin i filtry (zatrzymujące izotopy jodu) wypuszcza się je stopniowo do atmosfery tak, aby uległy one rozcieńczeniu w otaczającym powietrzu i nie stanowiły zagrożenia dla okolicy.

Obok produktów rozszczepienia dostających się do wody chłodzącej z nieszczelnych prętów paliwowych, może ona zawierać również produkty aktywacji neutronami cząstek powstających wskutek korozji i erozji materiałów konstrukcyjnych obiegu pierwotnego. Pewien problem może stanowić również tryt, powstający w reaktorze PWR jako produkt aktywacji neutronami boru zawartego w wodzie chłodzącej. W wyniku nieszczelności pomp, zaworów itp. w obiegu pierwotnym powstają wycieki wody z zawartością izotopów promieniotwórczych. Przez pewien czas magazynuje się je (aby krótkożyciowe izotopy uległy rozpadowi), a następnie albo rozcieńcza i uwalnia do otoczenia, albo zatęcza i przygotowuje do usunięcia jako odpady promieniotwórcze.

Wielkość uwolnień produktów rozszczepienia z elektrowni jądrowej do otoczenia zależy od wielu czynników takich jak: poziom mocy reaktora, liczba nieszczelnych prętów paliwowych, stopień usunięcia substancji promieniotwórczych z uwalnianych gazów i cieczy itd. Aktywność uwalnianych rocznie gazowych i lotnych izotopów w reaktorze BWR lub PWR jest odpowiednio rzędu $2 \cdot 10^{16}$ i $8 \cdot 10^{13}$ Bq kiurów, podczas gdy ciekłych tylko $4 \cdot 10^{12} \dots 8 \cdot 10^{12}$ Bq [14].

Wieloletnie doświadczenia wskazują, że nie ma trudności w utrzymywaniu ilości uwolnień sub-

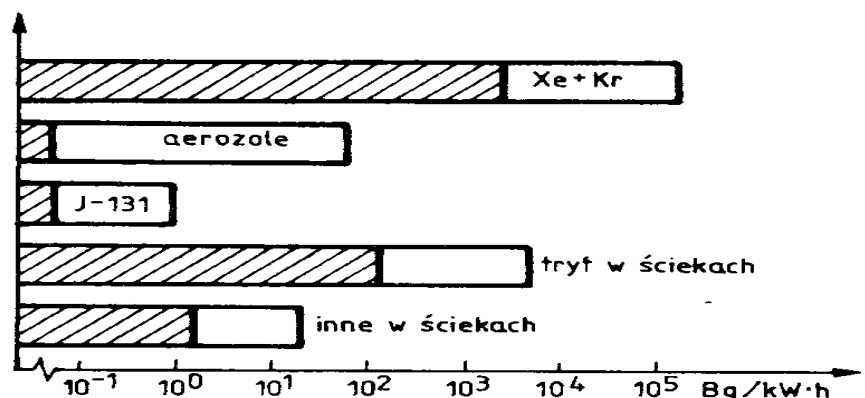
stancji promieniotwórczych na poziomie znacznie niższym od poziomu dopuszczalnego przepisami (rys. 4).

Ilość uwolnień podczas pracy elektrowni jądrowej jest mała i rozcieńczana dużymi ilościami powietrza, dlatego uwolnienia te nie są praktycznie żadnym zagrożeniem dla otoczenia. Innego typu zagrożeniami są zagrożenia powstające w sytuacjach awaryjnych elektrowni.

Energetyka jądrowa została obwarowana tak surowymi normami bezpieczeństwa, że zagrożenie z jej strony dla personelu oraz ludności zamieszkującej w otoczeniu elektrowni jądrowej, również w warunkach awaryjnych ocenia się jako znikome, praktycznie zerowe.

Awaria reaktora w Czarnobylu w 1986 r. była pierwszą awarią cywilnego reaktora energetycznego, która pociągnęła za sobą ofiary w ludziach. Nie można jednak przenosić obaw wywołanych awarią w Czarnobylu na reaktory wodne (PWR i BWR), które są dzisiaj podstawą energetyki jądrowej w świecie i stanowią ponad 80% wszystkich pracujących dzisiaj reaktorów energetycznych. Budowa reaktorów RBMK (typ reaktorów eksploatowanych w Czarnobylu), ich zasady pracy i system bezpieczeństwa różnią się w sposób zasadniczy od reaktorów wodnych moderowanych i chłodzonych lekką wodą. Reaktory RBMK (moderowane grafitem i chłodzone wodą) charakteryzuje znacznie niższy stopień bezpieczeństwa. Tego typu reaktory pracują jedynie na terenach b. ZSRR (Rosja, Ukraina) i nigdy nie eksportowano ich, a nawet nie oferowano na eksport, zdając sobie sprawę, że nie miałyby one szans – z uwagi na swoje charakterystyki bezpieczeństwa – na uzyskanie licencji eksploatacyjnej w żadnym innym kraju.

W reaktorach wodnych nie jest możliwy „rozbieg” mocy i wybuch parowy (co miało miejsce



Rys. 4. Uwolnienia substancji promieniotwórczych z elektrowni jądrowej (elektrownia Stade, PWR, 672 MW, Niemcy); wartości dopuszczalne (pola zakresowane – rzeczywiste uwolnienia w 1974 r.)

w Czarnobylu) z uwagi na samoograniczającą moc reaktora własności dzięki ujemnemu temperaturowemu współczynnikowi reaktywności. Ujemna jego wartość oznacza, że wraz ze wzrostem mocy i temperatury w rdzeniu, samorzutnie, jedynie na zasadzie praw fizyki maleje wytwarzana w nim moc, co z kolei prowadzi do obniżenia temperatury. Reaktory wodne powszechnie dzisiaj stosowane w elektrowniach jądrowych (pracuje ich obecnie 356) należą do najbezpieczniej pracujących urządzeń przemysłowych. W ciągu przeszło 50-u lat ich pracy nie wydarzył się ani jeden śmiertelny wypadek spowodowany napromieniowaniem w wyniku ich awarii. Na podstawie danych zebranych z kilkunastu tysięcy wypracowanych już reaktorów-lat można stwierdzić, że nie ma innej równie bezpiecznej dziedziny przemysłu. Najpoważniejsza awaria tego typu reaktora (stopień rdzenia, całkowite zniszczenie reaktora), jaka wydarzyła się w roku 1979 w elektrowni Three Mile Island (USA), nie pociągnęła za sobą ofiar w ludziach, nikt nie doznał nawet uszczerbku na zdrowiu w wyniku promieniowania.

Pewien niepokój wywołuje w społeczeństwie problem bezpiecznego usuwania odpadów promieniotwórczych. Technologia usuwania odpadów nisko i średnio-aktywnych jest od dawna opanowana i powszechnie stosowana. Poważniejsze problemy stwarza usuwanie odpadów tzw. wysokoaktywnych, tj. odpadów powstających przy przerobieniu paliwa wypalonego w reaktorach jądrowych. Odpady te zawierają ponad 99.9% całkowitej aktywności odpadów, a stanowią jedynie ok. 1% ich objętości. Z paliwa z dużej elektrowni jądrowej (1000 MW) powstaje jedynie ok. 4 m³ tych odpadów rocznie. Odpady wysokoaktywne występujące z reguły w postaci roztworów wodnych, po kilkuletnim przechowywaniu w specjalnych zbiornikach (aktywność ich spada wtedy do ok. 10% początkowej aktywności) przekształca się do stałej postaci zwykle metodą zeskliwiania. Masę szklaną wylewa się następnie do pojemników ze stali nierdzewnej, które po szczelnym zaspawaniu można już usuwać do miejsc ostatecznego składowania. Technologia tych czynności została już dawno przemysłowo opanowana (najwcześniej we Francji).

Obecnie działalność szeregu firm, państwowych i prywatnych w wielu krajach koncentruje się na znalezieniu i wszechstronnym przebadaniu najbardziej odpowiednich lokalizacji na składowiska. Mogą to być formacje skalne lub złoża soli kamiennej, gdzie w specjalnych sztolniach na głębokości kilkuset metrów pod powierzchnią ziemi zasypywane byłyby pojemniki z odpadami. Taka lokalizacja gwarantuje nienaru-

szalność składowiska co najmniej przez kilkaset lat, w których aktywność odpadów spadnie do niewielkiego poziomu.

Ciepłe zanieczyszczenie środowiska wodnego jest uwarunkowane ilością i temperaturą wody odprowadzanej z elektrowni. Chociaż sprawność brutto elektrowni jądrowej jest tylko niewiele niższa od sprawności elektrowni węglowej, to jednak ilość ciepła odprowadzanego z wodą chłodzącą w elektrowni jądrowej jest większa o ok. 40% niż w elektrowni węglowej, gdzie duża część ciepła ulatuje z gazami spalania przez komin do atmosfery.

W otwartych obiegach chłodzenia zanieczyszczenie cieplne wód nie ma zwykle większego znaczenia, gdyż podgrzaną (o 7...14°C) wodę chłodzącą wypuszcza się do dużych akwenów wodnych (morze, jezioro, duża rzeka); daje to zazwyczaj niewielkie (np. 2°C) średnie podgrzanie wody. Nawet tak nieznaczne podgrzanie wody może wywołać pewne zmiany w ekosystemie wodnym. Zahamowany zostaje rozwój pewnych gatunków fauny i flory wodnej, pojawiają się jednocześnie nowe gatunki. Nie można jednoznacznie stwierdzić czy te zmiany są korzystne czy niekorzystne. Z punktu widzenia gospodarczego są one na ogół korzystne – stwarzają możliwość intensyfikacji hodowli ryb (np. trzykrotne skrócenie cyklu hodowlanego karpia), zakładanie ferm hodowlanych nowych gatunków ryb ciepłolubnych (tołpyga). Główną wadą chłodzenia w zamkniętych obiegach wodnych z mokrymi chłodniami kominowymi są znaczne straty wody ulatującej z chłodni w postaci pary. Zjawisko to występuje zarówno w elektrowni węglowej jak i jądrowej, lecz w elektrowni jądrowej straty są ok. 40% wyższe.

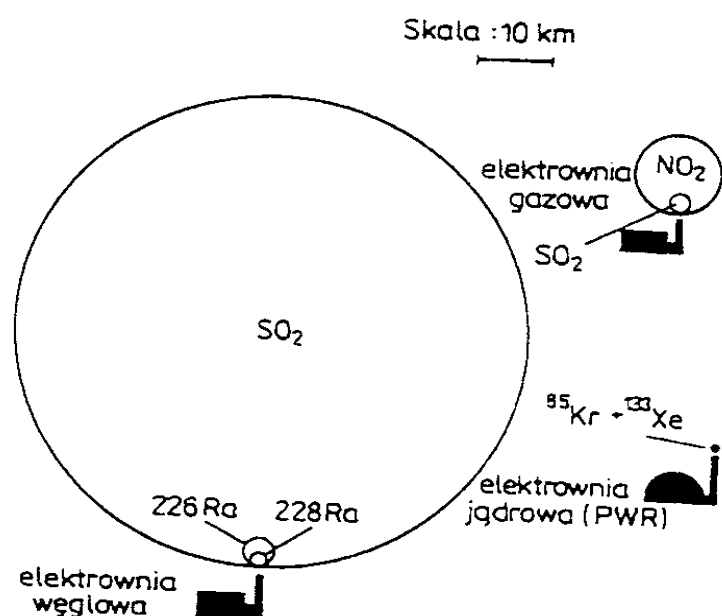
Porównanie szkodliwości dla środowiska elektrowni węglowej i jądrowej

Przy porównywaniu zagrożeń ze strony elektrowni jądrowych i węglowych używa się zazwyczaj wskaźnika wynikającego ze stosunku rzeczywistej ilości lotnych zanieczyszczeń (SO₂, NO_x, pyły lotne, gazowe substancje promieniotwórcze) uwalnianych do atmosfery do ich dopuszczonej przepisami wartości w jednostce objętości powietrza. Stosunek ten wyraża po prostu objętość powietrza potrzebną do rozcieńczenia uwalnianych zanieczyszczeń do poziomu dopuszczonego przepisami.

Elektrownia opalana węglem kamiennym o mocy elektrycznej 1000 MW bez instalacji oczyszczania spalin emituje rocznie do atmosfery ok. 60 000 ton

ditlenku siarki. Do rozcieńczenia ich do poziomu dopuszczanego przez polskie przepisy potrzeba ok. 3×10^6 mld m³ powietrza [15]. Ilość powietrza wymagana do rozcieńczenia emitowanych substancji promieniotwórczych z elektrowni jądrowej do dopuszczalnych przepisami poziomu jest przeszło 100 000 razy mniejsza (rys. 5).

Aktywność pierwiastków promieniotwórczych (głównie Ra-226 i Ra-228) uwalnianych z elektrowni węglowej do otoczenia jest kilkadziesiąt tysięcy razy mniejsza od uwalnianych z elektrowni jądrowej (głównie izotopy gazów szlachetnych Kr-85 – Xe-133), jednak z uwagi na znacznie mniejszą szkodliwość promieniotwórczych gazów szlachetnych do-



Rys. 5. Objętości powietrza potrzebna do rozcieńczenia uwalnianych w ciągu roku lotnych zanieczyszczeń do stężeń dopuszczalnych

puszczalne ich stężenie w powietrzu (mierzone w Bq/m³) są ponad milion razy większe. Ilość powietrza konieczna do rozcieńczenia do poziomów dopuszczalnych substancji promieniotwórczych z elektrowni węglowej jest więc 100...200 razy większa niż z elektrowni jądrowej (por. rys. 5) Zanieczyszczenia atmosfery substancjami promieniotwórczymi powodowane zarówno przez elektrownie jądrowe jak i węglowe nie dają żadnych powodów do obaw, gdyż wywołane nimi zagrożenia radiologiczne są znacznie niższe niż dopuszczają to najostrejsze normy ochrony radiologicznej. W obliczeniach wspartych pomiarami przeprowadzonymi w Niemczech [11] dawkę na całe ciało od elektrowni węglowej określono na $0.7 \cdot 10^{-2}$ mSv/r, a od elektrowni jądrowej 7-krotnie mniej, na $0.1 \cdot 10^{-2}$ mSv/r. Stanowi to w obu przypadkach znacznie mniej niż 1% dawki od naturalnego

promieniowania wynoszącej 2,4 mSv/r.

Porównajmy indywidualne ryzyko śmierci dla ludności zamieszkałej w pobliżu obu typów elektrowni pracujących normalnie (tj. nie w warunkach awaryjnych).

Love [16] ocenia, że zawartość 1 mgSO₂ na 1 m³ powietrza powoduje zwiększenie śmiertelności o 0.039 zgonów na 10 000 osób rocznie, a stężenie pyłów równe 1 mg/m³ powietrza powoduje dodatkowo 0.085 zgonów na 10 000 osób rocznie. Przyjmując obowiązujące w Polsce poziomy dopuszczalnych stężeń (20 µgSO₂/m³ powietrza oraz 40 µgPM₁₀/m³ średniorocznie [17]), należy oczekiwać 78 zgonów na każdy 1 milion osób rocznie w wyniku oddziaływania SO₂ oraz 340 zgonów w wyniku oddziaływania pyłów, w przypadku gdy średnioroczne zanieczyszczenia osiągają wartości dopuszczalne.

Przepisy polskie ustalają graniczne dawki promieniowania dla populacji od źródeł poza naturalnych na 1 mSv rocznie. Jednocześnie przyjęto z dużym zapasem bezpieczeństwa, że indywidualne ryzyko zachorowania na chorobę nowotworową wynosi ok. 10⁻⁵ na 1 mSv. Oznacza to, że w przypadku pochłonięcia granicznej dawki przez każdą osobę z 1 mln mieszkańców należy się liczyć statystycznie ze zgonem 10 osób. W porównaniu do elektrowni węglowej ryzyko to jest przeszło 40 razy mniejsze.

Należy przy tym pamiętać, że dawka 1 mSv/r nie jest dawką dopuszczalną ale dawką graniczną, a uwolnienia substancji promieniotwórczych przez elektrownie jądrowe muszą być zgodnie z przepisami takie, aby dawki w okolicach elektrowni były niższe przynajmniej 4...20 razy od dawek granicznych[18]. Jak wskazuje wieloletnia obserwacja wielu elektrowni, maksymalna dawka mierzona w pobliżu elektrowni nie przekracza na ogół 1/100 wartości dawki granicznej. Jeśli wziąć to pod uwagę, okaże się, że średnie indywidualne ryzyko zgonu dla populacji w pobliżu elektrowni węglowej jest kilka tysięcy razy wyższe niż w pobliżu elektrowni jądrowej.

Wnioski

Kończy się era węgla jako podstawowego surowca energetycznego, ze względu na wyczerpujące się zasoby taniego, łatwego do wydobycia węgla, przede wszystkim zaś z uwagi na wzrastającą wagę problemu ochrony środowiska.

Z realnie możliwych opcji energetycznych pozostaje jedynie energia jądrowa, której szersze upowszechnienie jest uzależnione głównie od przela-

mania oporów społecznych ale również od zmniejszenia kosztów wytwarzania energii w elektrowniach jądrowych.

Zaufanie do energii jądrowej, gwałtownie załamane po szoku czarnobylskim, powraca bardzo powoli. Wolno, ale stale polepszają się notowania energii jądrowej w opinii społecznej. Wiąże się to ze wzrostem zrozumienia, że energia jądrowa jest najczystsza – jeśli chodzi o środowisko – metodą uzyskiwania energii elektrycznej z realnie możliwych opcji energetycznych. Energia jądrowa nawet nie lubiana, będzie głównym źródłem pokrycia rosnącego zapotrzebowania ludzkości na energię elektryczną w drugiej połowie bieżącego stulecia.

Prof. dr hab. Zdzisław Celiński. Autor jest profesorem zwyczajnym na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, wieloletnim przewodniczącym Komitetu Energetyki Jądrowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich (SEP), wiceprezesem Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej (SEREN)

LITERATURA

- [1] Liniecki J.: *Energetyka a zdrowie i środowisko. Wiedza i Życie 1990, z.5*
- [2] WHO (2000). *Air Quality Guidelines for Europe, second edition. WHO Regional Publications, European Series No. 91*
- [3] Blimblecombe P.:...von den spitzen Ecken der Atome. *Umwelt 1979, h.1*
- [4] Borsch P., Wagner H.J.: *Energie und Umwelt. Tatsachen über Kernenergie. Verlag W. Girardet, Essen 1980*
- [5] Jagusiewicz W.: *Powietrze – człowiek – środowisko. Warszawa 1981 LSW*
- [6] Hryniewicz A.: *Energia – najważniejszy problem cywilizacji. Warszawa 1990 WNT*
- [7] *Ochrona środowiska w południowo-zachodnim rejonie Polski. PAN, Sekcja w Legnicy, Legnica 1978*
- [8] Strupczewski A. i inni: *Ocena wpływu wytwarzania energii elektrycznej na zdrowie człowieka i środowisko. Międzynarodowa Konferencja „Ekologiczne Aspekty Wytwarzania Energii Elektrycznej”. Warszawa, 14-16 listopada 2001*
- [9] *Mały Rocznik Statystyczny 2010. Warszawa, 2010 GUS*
- [10] Pacyna J. M.: *Elektrownie węglowe jako źródło skażenia środowiska metalami i radionuklidami. Wrocław 1980, Wyd. Politechniki Wrocławskiej*
- [11] Jacobi i in.: *Comparison of Radiation Exposure from Coal-Fired and Nuclear Power Plants in the FRG. Proc. Of a Symp. “Health Impact of Different Sources of Energy”, IAEA, Vienna 1982*
- [12] Halbritter G. i inni.: *Contribution to a Comparative Environmental Impact Assesment of the Use of Coal and Nuclear Energy for Electricity Generation for Selected Site Conditions in the FRG. Proc.of a Symp. “Health Impact of Different Sources of Energy”. IAEA, Vienna 1982*
- [13] Niehaus F.: *The Problem of Carbon Dioxide. IAEA Bull. v.21, 1979 no.1*
- [14] Lamarsh J. R.: *Introduction to nuclear Engineering. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts 1975*
- [15] *Dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń w powietrzu w Polsce. Dz. U. nr. 87 z dnia 27 czerwca 2002*
- [16] Lave L. B., Freeburg L. C.: *Health Effects of Electricity Generation from Coal, Oil and Nuclear Fuel. Nuclear Safety, v.14, 1973 no.5*
- [17] *Ocena jakości powietrza w Polsce – rok 2009. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2010*
- [18] Celiński Z.: *Energetyka jądrowa a społeczeństwo. Warszawa, 1992 PWN*



Elektrownia Bełchatów – największa w Europie elektrownia ciepłna (kondensacyjna) i największa na świecie elektrownia wytwarzająca energię elektryczną z węgla brunatnego.

Roczna produkcja energii wynosi przeciętnie 27-28 TWh, co stanowi ponad 20% produkcji krajowej. Zaawansowane systemy oczyszczania spalin pozwoliły na znaczną redukcję wytwarzanych zanieczyszczeń, które kształtują się na poziomie: dla ditlenku węgla 1080 kg/MWh, ditlenku siarki 3,54 kg/MWh, tlenków azotu 1,50 kg/MWh, pyłów 0,15 kg/MWh.



Wizualizacja **Elektrowni Olkiluoto** po zakończeniu budowy trzeciego bloku. Budowany na wyspie Olkiluoto trzeci blok elektrowni atomowej będzie pierwszym obiektem wyposażonym w reaktor EPR (Europejski Reaktor Ciśnieniowy), konstrukcji francuskiej firmy Areva. Pierwotnie rozruch Olkiluoto 3 planowano na 2009 rok. Obecnie jego uruchomienie jest zakładane w 2013 roku.

Horse Hollow Wind Energy Center (Nolan County, Texas USA) największa farma wiatrowa z mocą 735,5 MW (2013 r.) Składa się z 291 turbin wiatrowych GE 1,5 MW i 130 Siemens 2,3 MW rozmieszczonych na 190 km². Była przedmiotem jednego z pierwszych pozwów narodu przeciwko uciążliwości farmy wiatrowej. Wygląd i hałas, zaburzenia w środowisku. Pozew oddalono.

Andrzej Grzegorz Chmielewski

ENERGETYKA I ŚRODOWISKO :: POWE

Abstract

Population growth, higher standards of living, increased urbanization and enhanced industrial activities all contribute to the degradation of the environment. Fossil fuels, including coal, natural gas, petroleum, shale oil and bitumen, are the primary source of heat and electrical energy production and are responsible for emitting a large number and amount of pollutants into the atmosphere via exhaust gases from industry, power stations, residential heating systems and vehicles. During the combustion process, different pollutants such as CO₂, SO_x (including SO₂ and SO₃), NO_x (including NO₂, NO and N₂O), fly ash, VOCs and mercury are emitted. These emissions cause big environmental and human health hazard. CO₂, N₂O, some VOCs, CH₄ contribute to the global greenhouse effect, adding a new dimension to the environmental degradation resulting from the burning of fossil fuels. On the other hand some fossil fuels like oil and gas are the raw materials for industries and their reserves will be depleted soon. These problems regarding emissions inventory, their impact on the environment and human health, air pollution control technologies and costs, periods of fossil fuels depletion, role of renewable (including biofuels) and nuclear energy in the further civilization development are briefly discussed. The results of these analysis are not very optimistic.

Key words; fossil fuels, power generation, renewable energy sources, biofuels, nuclear energy, environment degradation.

Streszczenie

Wzrost liczby ludności, wyższe standardy życia, rosnąca urbanizacja i rozwój przemysłu prowadzą do postępującej degradacji środowiska naturalnego. Paliwa kopalne, w tym węgiel, gaz naturalny, ropa, łupki bitumiczne są pierwotnymi nośnikami energii dla wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Jednocześnie podczas ich spalania; w przemyśle, energetyce, piecach domowych i silnikach samochodowych, do atmosfery są emitowane duże ilości zanieczyszczeń. Są to CO₂, SO_x (obejmujące SO₂ i SO₃), NO_x (obejmujące NO₂, NO i N₂O), pył lotny (w tym PM_{2.5}), zanieczyszczenia organiczne (VOC), metale

ciężkie, w tym rtęć. Te związki stanowią zagrożenie dla środowiska naturalnego i zdrowia człowieka. CO₂, N₂O, niektóre VOC, CH₄ mają swój udział w wywoływaniu zjawiska zwanego efektem cieplarnianym, co nadaje nowy wymiar zniszczeniom środowiskowym wywoływanym przez spalanie paliw kopalnych. Z drugiej strony gaz i ropa naftowa są cennymi surowcami dla przemysłu chemicznego, w wyniku prowadzonej przez człowieka gospodarki rabunkowej grozi im szybkie wyczerpanie. Powyższe problemy, dotyczące wielkości emisji zanieczyszczeń, ich efektów zdrowotnych, stosowanych technologii ochrony atmosfery, wyczerpywania złóż paliw kopalnych, roli źródeł odnawialnych (w tym biopaliw) i energetyki jądrowej w dalszym rozwoju cywilizacji, w skrótovej formie, ograniczonej założoną obszernością tekstu, są dyskutowane w niniejszej publikacji. Wnioski wywodzące się z przeprowadzanych analiz nie napawają optymizmem.

Słowa kluczowe: paliwa kopalne, odnawialne źródła energii, biopaliwa, energetyka jądrowa, degradacja środowiska.

WSTĘP

Liczba ludności zamieszkującej nasz glob przekroczyła 6 miliardów. Od dwu wieków to znaczy od lat 1800 – 1850, kiedy wynosiła ona jeden miliard, krzywa przedstawiająca przyrost liczby ludności ma charakter niemalże eksponentialny. Wzrostowi zaludnienia globu towarzyszy wzrost industrializacji. Ludzie chcą żyć w lepszych warunkach, a temu towarzyszy wzrost zapotrzebowania na różne formy energii. Wzrost liczby ludności, wyższe standardy życia, rosnąca urbanizacja i uprzemysłowienie nie są bez znaczenia dla stanu środowiska naturalnego. Problemy związane z ochroną środowiska naturalnego i z wyczerpywaniem zapasów naturalnych stają się zmartwieniem ludzkości. Najtrudniejszym z nich są zagadnienia związane z rozwojem energetyki, jej wpływem na środowisko naturalne i cenami paliw kopalnych. Spalanie węgla, gazu i ropy naftowej związane jest z emisją olbrzymiej ilości zanieczyszczeń do atmosfery. Niestety jak wskazują prognozy, paliwa te będą głównym źródłem energii i w przyszłości [1]. Jedynym rozwiązaniem problemu jest większe wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw oraz energetyki jądrowej.

R SECTOR AND THE ENVIRONMENT

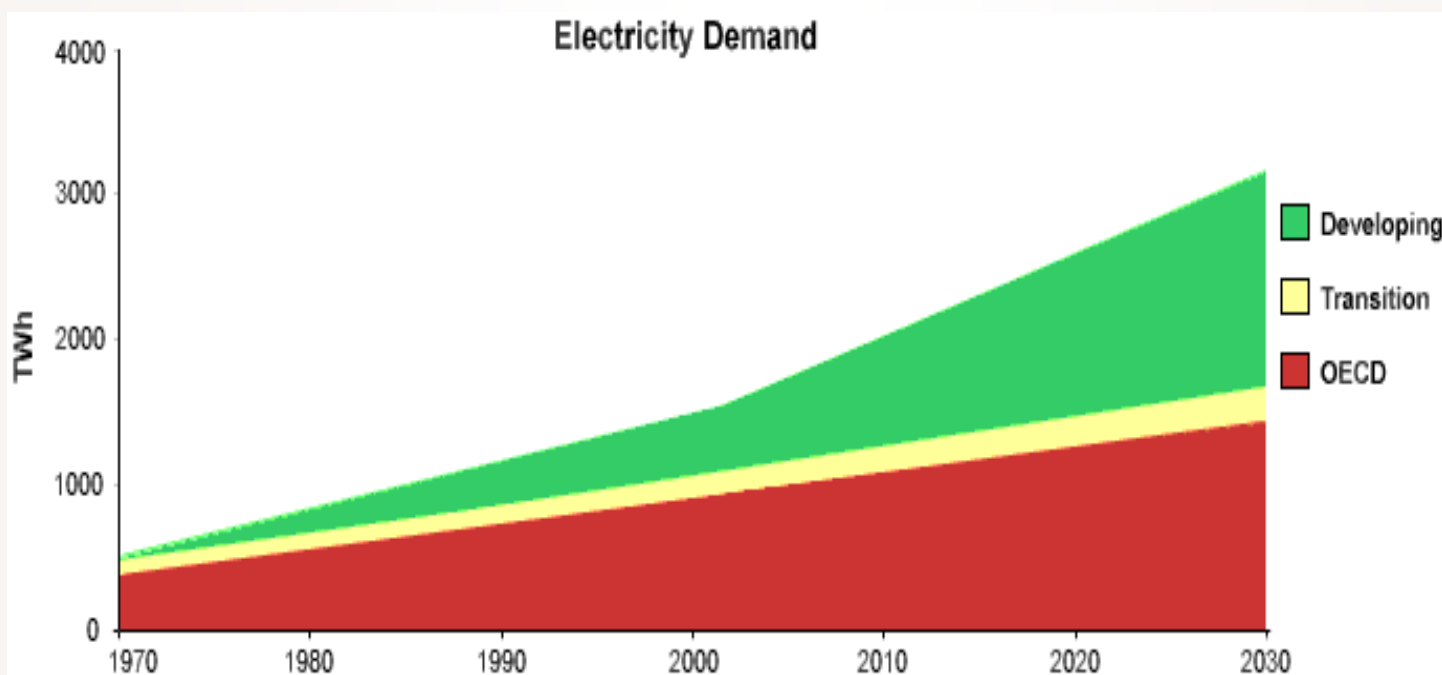
ŚWIATOWE ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ

Zapotrzebowanie energetyczne świata i główne źródła pierwotne stosowane do jej wytwarzania są podane w Tabeli 1 [2]. Udział transportu w ogólnej konsumpcji surowców energetycznych wzrósł z 24,2% w 1973 do ok. 30% w 2001. Światowe zużycie energii wzrasta mimo rosnącej efektywności pojazdów, instalacji przemysłowych i urządzeń domowych. Wzrost ten dotyczy zarówno krajów rozwiniętych, jak i rozwijających się. Tendencja ta zadaje kłam twierdzeniom, że oszczędność energii jest jedynym antidotum na rozwiązanie kryzysu energetycznego. Obserwowane, pozytywne zjawisko wzrostu efektywności wykorzystania energii nie prowadzi do zahamowania zapotrzebowania na nią z uwagi na fakt, że rosnące standardy życia ludności wzmagają jej oczekiwania dotyczące zapewnienia jeszcze lepszych warunków pracy i odpoczynku. Przykładem może być program Euro 2012, popierany przez nas wszystkich, związany jednak z olbrzymimi, energochłonnymi inwestycjami typu stadionów, zaspokajających odwieczną potrzebę człowieka do uczestniczenia w igrzyskach. Dawniej w turniejach gladiatorów, teraz turniejach piłki nożnej. W biednych, rozwijających się krajach, programy elektryfikacji terenów wiejskich i miast, łącznie z rosnącym zapotrzebowaniem przemysłu i transportu, prowadzą do wzrostu zapotrzebowania na źródła energii (Rys. 1).

Mieszkańcy Europy Zachodniej przesiadają się z samochodów na rowery, a mieszkańcy Chin odwrotnie, z rowerów do samochodów. W wielu przypadkach wzrost zapotrzebowania na energię pierwotną jest szybszy od przyrostu ludności. Jednakże dalej około 2,4 miliardów mieszkańców naszego globu wykorzystuje tradycyjnie biomasę do gotowania i ogrzewania mieszkań. Liczba ta wzrośnie do 2,6 miliardów w roku 2030. W krajach rozwijających się, biomasa dalej będzie zaspakajała połowę potrzeb domowych na energię przez następne 30 lat. Jeśli nie nastąpi zmiany w polityce wykorzystania energii, a wszystko na to wskazuje, że tak będzie, zapotrzebowanie na energię będzie stale rosło o około 1,7% rocznie, to znaczy nieco wolniej niż w ciągu ostatnich 30 lat kiedy wzrost ten wynosił 2,1% rocznie. Paliwa kopalne pozostaną głównymi źródłami pierwotnymi energii w następnym trzydziestoleciu i zapotrzebowanie na nie wzrośnie do roku 2030 o ok. 90%.

GLÓWNE PIERWOTNE ŹRÓDŁA DLA PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Technologie produkcji energii elektrycznej wymagają specjalnej uwagi, ponieważ największa część populacji świata żyje w mega miastach i dla zasilania takich metropolii powinny być budowane duże elektrownie zawodowe. W innych przypadkach o wielkości elektrowni decyduje istnienie w pobliżu dużej kopalni odkrywkowej, jak ma to miejsce w przypadku Bełchatowa, czy też Turowa. Wpływ takich elek-

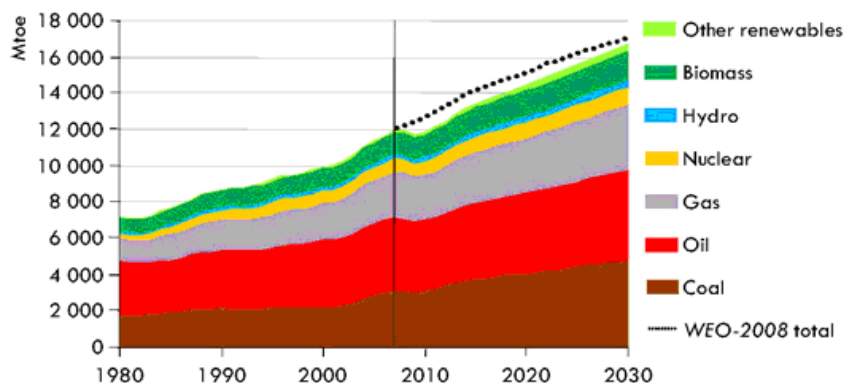


Rys.1. Wzrost zużycia energii elektrycznej w rozwiniętych i rozwijających się krajach świata (wg. OECD/IEA).

trowni, spalających paliwa kopalne, na środowisko naturalne jest przerażający.

W Tabeli 2 przedstawiono, dla wybranych krajów świata, moc zainstalowaną według kategorii stosowanych źródeł pierwotnych energii. W Tabeli 3 podano takie dane dla całego globu. **Rysunek 2**

zaczepnięty z ostatniego raportu Międzynarodowej Agencji Energii przedstawia strukturę pierwotnych źródeł które będą wykorzystywane do wytwarzania energii Około 1,6 miliardów ludzi – jedna czwarta populacji świata – nie ma w ogóle dostępu do elek-



Rys.2. Główne pierwotne źródła wytwarzania energii (wg. OECD/IEA).

tryczności, 80% z nich żyje w Indiach i w Afryce subsaharyjskiej. W ostatnim z tych regionów zaczyna też brakować drewna na opał.

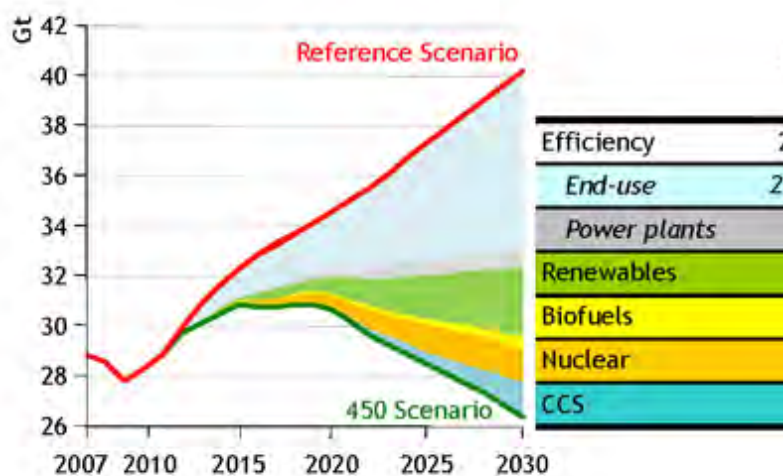
EMISJA ZANIECZYSZCZENIA GAZOWYCH I PYŁÓW

Ditlenek węgla jest emitowanym w największych ilościach antropogennym gazem cieplarnianym, jego emisja od roku 1971 wzrosła o ok. 68%. Przewidywany w skali światowej wzrost emisji ditlenku węgla, związany z wytwarzaniem energii, wyniesie 55% w przedziale czasowym między rokiem 2004 a 2030, co daje ok. 1,7% wzrostu rocznie, jak podaje scenariusz przyjęty przez IEA [2]. Emisja tego gazu wyniesie 40 gigaton w roku 2030, co daje wzrost rzędu 13 - 14 Gt ponad poziom emisji roku 2004 (Tabela 3). Energetyka która jest obecnie odpowiedzialna za około 40 - 50 % emisji całkowitej, będzie miała 50% udziału w tym wzroście (ca. 7 Gt). Emisja ditlenku węgla ze środków transportu będzie odpowiedzialna za 25% tego wzrostu a sektory komunalny, handel i przemysł za pozostały przyrost. Nieco inaczej od trendów obserwowanych w ostatnim

ćwierćwieczu, emisje będą rosły nieco szybciej (o 69%), niż popyt na pierwotne źródła energii (wzrost o 66%) co jest związane ze wzrostem zawartości węgla w surowcach energetycznych w stosunku do zawartości wodoru. Udział emisji ze spalania węgla wynosi ok. 40% począwszy od lat wczesnych siedemdziesiątych, podczas gdy udział emisji ze spalania gazu wzrósł z 14% w 1973 do 20% w 2001, a ze spalania pochodnych ropy naftowej zmalał z 51% do 42%.

Stężenie ditlenku węgla w atmosferze wzrosło od czasów epoki przed przemysłowej z 280 ppm do 379 ppm w roku 2005 i stężenie to przekracza stężenie naturalne obserwowane podczas ostatnich 650 000 lat (wahało się ono w zakresie od 180 do 300 ppm), jak wykazały badania odwiertów lodowcowych. Roczny przyrost stężenia ditlenku węgla w okresie ostatnich 10 lat był większy (średnia 1995 - 2005: 1,9 ppm rocznie), od obserwowanego od chwili rozpoczęcia stałego monitoringu jego stężenia w atmosferze (1960 - 2005: 1,4 ppm rocznie), chociaż należy zaznaczyć, że wartość przyrostu mierzona w różnych latach waha się w pewnym stopniu [3]. Przyjęty program redukcji emisji ditlenku siarki przy zastosowaniu różnych metod przedstawia **rysunek 3**.

Inne zanieczyszczenia gazowe SO_2 i NO_x , odpowiedzialne za występowanie kwaśnych deszczy w Europie, Chinach i Ameryce Północnej, głównie emitowane są podczas spalania węgla i ciężkich frakcji ropy naftowej. Dane dla wybranych krajów są



Rys.3. Przewidywany scenariusz dotyczący ograniczenia emisji ditlenku

podane w Tabelach 4 i 5. Problem ten dotyczy głównie takich krajów jak Polska, w której węgiel pozostaje głównym paliwem dla produkcji elektryczności i energii cieplnej.

Aktualnie rozpoznany problemem, jest emisja cząstek pyłu o wymiarach mniejszych od 2,5 mikrona, tzw. PM 2.5. Duże stężenie tych pyłów w powietrzu wdychanym przez człowieka, prowadzi do przykrych efektów zdrowotnych. W niektórych regionach Europy, np. na Śląsku, średni czas życia mieszkańców jest o kilka miesięcy krótszy od czasu życia przewidywanego dla mieszkańców żyjących w strefach czystych.

Przy spalaniu węgla emitowane są również pewne ilości rtęci. W Stanach Zjednoczonych elektrownie opalane węglem emitują jedną trzecią rtęci emitowanej ze źródeł antropogennych (48 ton) [4]. W całym świecie w roku 1995, emisja rtęci zarówno ze źródeł antropogennych, jak i naturalnych wyniosła ok. 5 500 ton. Obawy dotyczące tej emisji są związane z faktem, że związki rtęci łatwo wbudowują się w łańcuch pokarmowy człowieka.

W końcu, nowym problemem związanym ze spalaniem paliw jest emisja lotnych zanieczyszczeń organicznych w tym wielopierścieniowych związków organicznych. Lista 18 związków o możliwych działaniach kancerogennych została ogłoszona przez EPA i WHO [5].

Emisja zanieczyszczeń gazowych powoduje znaczne straty ekonomiczne, wg danych niemieckich wynosiły one dla każdej wyemitowanej tony SO₂, NO_x i PM2.5 odpowiednio 6000; 5000; 13000 USD (w cenach roku 1990). Straty EU-15 (1990) związane z efektem cieplarnianym wyniosły 4,6 x 10⁹ –

1,7x10¹¹ USD. W Holandii liczba zgonów powodowanych przez PM 10 jest większa od będącej wynikiem wypadków samochodowych [6]. Mapa opublikowana przez EU [7] przedstawia regiony w których przewidywany czas życia jest krótszy o 12 miesięcy w związku z dużymi stężeniami PM 2.5 To są ciche Czarnobyle, które spowodowały utratę większej liczby istnień ludzkich niż ta tra-

giczna w skutkach katastrofa roku 1986.

TECHNOLOGIE OCZYSZCZANIA SPALIN

Usuwanie SO₂, NO_x i odpylanie, lotnych zanieczyszczeń organicznych i Hg, a wreszcie sekwestracja CO₂ wymagają stosowania różnych, skomplikowanych i kosztownych technologii. Odsiarczanie i odazotowanie spalin opiera się głównie na metodach mokrych wapiennych (FGD) i redukcji katalitycznej (SCR). Jednakże rozwijane są nowe zaawansowane technologie [8]. Oceniane koszty ograniczenia emisji NO_x w Europie są trzy razy większe od kosztów ograniczenia emisji SO₂. Sumaryczne koszty usuwania tych obu zanieczyszczeń wynoszą rocznie od 1 do 2% obecnego GDP [9].

Schemat sekwestracji CO₂ obejmuje trzy zasadnicze stadia: wychwycenie CO₂ emitowanego ze źródła wraz z jego oczyszczeniem, osuszeniem i sprężeniem, jego transport do miejsca magazynowania, wpompowania CO₂ w geologiczny zbiornik składowania. Typowy koszt wychwycenia CO₂ z gazów spalinowych elektrowni (przy użyciu najlepiej opatowanej technologii polegającej na absorpcji gazu w roztworze amin) wynosi ok. 40–60 Euro/t [10].

Technologie związane z usuwaniem rtęci polegają głównie na zastosowaniu sorbentów. Z kolei lotne zanieczyszczenia organiczne są emitowane w bardzo małych stężeniach i nie istnieją jeszcze metody ciągłego monitoringu on line. Niezbędne jest stosowanie żmudnych metod polegających na poborze próbek, zateżaniu zanieczyszczeń i analizie opartej o metodę GC/MS [11]. Dlatego też w praktyce ograniczenia dotyczą głównie emisji dioksyn ze spalarni śmieci.

UDOKUMENTOWANE ZASOBY PALIW KOPALNYCH

Wiemy, że zasoby paliw kopalnych są ograniczone [12]. Oceniane zasoby ropy naftowej na dzień 1 stycznia 1997 wynosiły 1018,5-1160,1 miliardów baryłek (7,1x10²¹ J). Średnia konsumpcja roku 1998 wynosiła 74,9 milionów baryłek dziennie (457x10¹⁵ J/dobę, 167x10¹⁸ J/a). Oceniany okres do pełnego wyczerpania zasobów wynosił 42,5 roku. Oceniane zasoby ropy naftowej na dzień 1 stycznia 1999 wynosiły 967,5-1033,2 miliardów baryłek. Średnia konsumpcja roku 1998 to 73 643 milionów baryłek dziennie. Okres wyczerpania zasobów 38,4 roku. Oceniane zasoby gazu ziemnego na dzień 1 stycznia 1997 wynosiły 140 - 146 trylionów m³ (5.37x10²¹ J) Konsumpcja roku 1996 wyniosła 81,9 x 1018 J. Zasoby miały starczyć na 65,5 roku. Od te-

Abatement (Mt CO ₂)		Investment (\$2008 billion)	
2020	2030	2010-2020	2021-2030
2 517	7 880	1 999	5 586
284	7 145	1 933	5 551
233	735	66	35
680	2 741	527	2 260
57	429	27	378
493	1 380	125	491
102	1 410	56	646

węgla (wg. OECD/IEA)

go czasu sytuacja nie zmieniła się wiele i jeszcze w tym wieku zasoby ropy naftowej i gazu ziemnego zostaną całkowicie wyczerpane (Tabela 7). Ponad 68% zasobów ropy naftowej i 67% zasobów gazu naturalnego znajduje się w rejonie Bliskiego Wschodu i w Rosji.

Złóża węgla kamiennego istnieją niemalże w każdym kraju, ich eksploatacja jest możliwa w 70 krajach (Tabela 8) [13]. Przy obecnym poziomie wydobywania zasoby węgla wystarczą na 155 lat.

ASPEKT OCHRONY ZASOBÓW SUROWCOWYCH

Z punktu widzenia nauki i techniki spalanie gazu oraz pochodnych ropy naftowej w dużych kotłach energetycznych jest szkodliwe społecznie. Proceder ten powinien być zakazany prawnie. Kopalne węglowodory są głównymi surowcami dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego (produkcja tworzyw sztucznych, nawozów sztucznych), ponadto stanowią one materiały napędowe dla środków transportu i są podstawowym źródłem ciepła dla gospodarstw domowych. Teoria maksimum Hubberta mówi, że dla danego regionu, dla zasobów od pojedynczego otworu do całości zasobów globalnych, wykres przedstawiający krzywa wydajności produkcji ropy w czasie ma kształt dzwonu. [Association for the Study of Peak Oil and Gas](#) (ASPO) przewiduje, że maksimum na krzywej zostanie osiągnięte w roku 2010 [14]. Charakterystyczny jest fakt, że politycy o ile podnoszą sprawę kryzysu energetycznego, zupełnie zapominają o powiązanim z nim kryzysem surowcowym [15].

ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII

Wielkie oczekiwania wiązała ludzkość z wprowadzeniem odnawialnych źródeł energii, niestety ich rozwój jest wolniejszy od przewidywanego. Pewne czynniki ograniczające ich stosowanie przedstawia lista podana w tabeli 9. Rzeczywistą rolę w produkcji energii opartej o zasoby energii odnawialnej odgrywa energia wodna i produkcja biomasy. W niektórych krajach jednak energia potencjalna rzek została już wykorzystana w 100%. Dlatego też globalny udział odnawialnych źródeł energii (łącznie z hydroenergetyką) w ogólnym bilansie energetycznym świata wynosi ok. 6%.

A zatem pozostaje wykorzystanie biomasy, której produkcja musi jednakże uwzględnić ograniczenia związane z wykorzystaniem gruntów uprawnych i wpływ zużycia pewnych produktów roślinnych na ceny żywności. Dotyczy to głównie produkcji paliw płynnych. Ceny oleju rzepakowego w EU wzrosły w ciągu ostatnich pięciu lat dwukrotnie, co powoduje konflikt między producentami żywności a producentami bioenergii. Pierwsi z nich oskarżają rządy EU, że poprzez politykę akcyzową promują produkcję biopaliw [16]. Problem zrównoważonego rozwoju przemysłu biopaliw przedstawia ostatni raport wydany przez ONZ [17]. Poza zwykłym spalaniem biomasy, takiej jak słoma czy zrębki drewna, można z biosurowców wytwarzać bardziej szlachetne nośniki energii, takie jak biogaz, bioetanol, biobutanol, biodiesel, używać jako biopaliwo oleje roślinne, czy też wytwarzać gaz drzewny. Bioetanol jest dodatkiem do paliwa w wielu krajach, w Brazylii wymagane jest aby silniki samochodowe mogły spalać mieszankę zawierającą do 25% etanolu, a w niektórych stanach USA do 10%. Trzeba pamiętać jednak, że ciepło spalania etanolu (19,6 MJ/L) jest o 34% niższe od ciepła spalania benzyny (32 MJ/L). Wyższą wartość ciepła spalania ma biodiesel (33 MJ/L), ale też będąca o 9% niższą od ciepła spalania normalnego paliwa do silników diesla, produkowanego z ropy naftowej. Rynek biopaliw zaczyna się rozwijać i w Polsce [18]. Ważne jest, że do technologii biopaliw mogą mieć dostęp kraje o różnym stopniu rozwoju, a koszty inwestycyjne związane z rozwojem tej gałęzi przemysłu nie są wysokie [19].

ENERGETYKA JĄDROWA

Energetyka jądrowa, sprawdzona technologia dla bazowej produkcji energii elektrycznej, zaczyna odgrywać z powrotem bardzo ważną rolę. Dalszy jej rozwój zależy od akceptacji społecznej i poparcia rządowego. Polska będzie uczestniczyła w budowie elektrowni jądrowej na Litwie i rozważa budowę własnej elektrowni. Brak energetyki jądrowej w Polsce jest tragicznym skutkiem zatrzymania budowy EJ w Żarnowcu, mimo dużego stopnia jej zaawansowania. Podobny reaktor został zbudowany w Paks na Węgrzech i pracuje do dnia dzisiejszego.

Nowa elektrownia jądrowa może produkować energię za cenę mniejszą od 5 centów US za kWh, jeśli koszty budowy i eksploatacji są dobrze zaplanowane i utrzymane przez inwestora. Przy tej cenie będzie ona tańsza od produkowanej w elektrowni gazowej (\$ 4,70 na MBtu) i dalej droższa od produkowanej w elektrowni węglowej (przy cenie węgla \$ 70 za tonę). Będzie jednak tańsza od produkowanej w elektrowni węglowej, jeśli

zostaną wprowadzone opłaty za emisję CO₂. Przewiduje się, że moc zainstalowana w elektrowniach jądrowych w świecie wzrośnie z 348 GW w roku 1995 do 378 GW w roku 2020 i 416 GW w roku 2030. Jednakże w ogólnym bilansie udział energetyki jądrowej zmaleje z uwagi na fakt, że co prawda zostaną wybudowane nowe reaktory, ale szereg starszych zostanie zamkniętych. Koszty inwestycyjne w przypadku EJ są bardzo wysokie, budowa reaktora kosztuje od 2 do 3,5 miliardów USD. Z drugiej strony koszty produkcji są niższe z uwagi na niższe ceny paliwa. Ponadto zasoby uranu są duże i szeroko rozprzestrzenione w świecie. W przypadku zastosowania reaktorów powielających, starczy go na więcej niż 1000 lat. A zatem jeśli zostaną rozwiązane zagadnienia związane z bezpieczeństwem pracy reaktora, składowaniem odpadów i ryzykiem proliferacji, energetyka jądrowa stanie się znaczącym źródłem energii [2].

PODSUMOWANIE

Spółeczeństwa, politycy i przemysł powinien traktować problematykę dotyczącą bezpieczeństwa energetycznego i ochrony środowiska bardzo poważnie. Przemysłowy i cywilizacyjny rozwój świata doprowadził do wielkiej degradacji środowiska naturalnego, wyczerpania zasobów naturalnych i pogorszenia zdrowia ludności, mimo wydłużenia czasu życia człowieka, będącego wynikiem rozwoju medycyny oraz pokoju światowego panującego przez ostatnie półwiecze.

Zasoby ropy naftowej i gazu zostaną wyczerpane w ciągu następnych 60 lat. Przyszłe pokolenia będą produkowały węglowodory z CO₂ i wody, powstałych ze spalania węglowodorów kopalnych. Jest to tak szalony scenariusz, że mógł go napisać tylko człowiek.

Zgodnie z raportem IPCC, która to organizacja otrzymała nagrodę Nobla w roku 2007, populacja globu osiągnie rekordową liczbę 8,7 miliarda w połowie wieku XXI, aby następnie zmaleć do 7,1 miliarda po roku 2100. Czy będzie to kara, czy nagroda za działania naszego pokolenia?

LITERATURA

Chmielewski A. G., *Environmental effects of fossil fuel combustion, in Environmental and Ecological Sciences, Engineering and Technology Resources, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2004, [http://www.eolss.net].*

International Energy Agency, *World Energy Outlook 2006*, <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/table12.html>

Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP

http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/pollutioncontrols/overview_mercurycontrols.html

Stephen H., *Safe, Hazard and Risk Assessment of Chemical Mixtures Using the Toxic Equivalency, Environ.Health.Perspect., 1998, 106 (suppl.4), 1051 – 1058.*

Brunkreef B.; Holgate S.T. *Air pollution and health, The Lancet, 2002, 360 (9341), 1233-1242*

http://ec.europa.eu/environment/news/efe/20/article_2434_pl.htm

Chmielewski A.G., *Application of ionizing radiation to environment protection. , Nukleonika, 2005, 50, Suppl. 3, s17-s24 .*

Van Harmelen T., Bakker J., De Vries B., Van Vuuren D, Elzen M., Mayerhofer P. , *Long-term reductions in costs of controlling regional air pollution in Europe due to climate policy, Environmental Science & Policy 2002, 5, 349–365*

Damen K.,Faaij A.van Bergen F.,Gale J.,Lysen E., *Identification of early opportunities for CO₂ sequestration—worldwide screening for CO₂-EOR and CO₂-ECBM projects, Energy, 2005, 30(10), pp.1931-1952*

Chmielewski A.G., Ostapczuk A., Licki J., Kubica K., *Emisja lotnych związków organicznych z kotła energetycznego opalanego pyłem węglowym (Emission of volatile organic compounds (VOCs) from a coal-fired power station boiler). Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, 2003, 37, pp. 142-147.*

Oil and Natural Gas Proven Reserves, Energy Information Administration, January 9, 2007

Coal Facts 2006 Edition with 2005 data, www.worldcoal.org

Association for the Study of Peak Oil and Gas, IV Workshop on Oil and Gas Depletion, 19-20 May 2005, Lisbon, Portugal

Swieboda P., The EU's Strategic Challenge Shaping the External Dimension of Energy Policy, demos EUROPA, Warsaw, 2006

El Amin A., Food industry calls for a more balanced biofuel policy, FoodProductionDaily.com,, 05 Feb 2007

Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers, UN Energy, April 2007

Krajowa Izba Biopaliw, www.kib.pl

Society of Chemical Industry, *Global Biopact on Biofuels can Bring Benefits to Both Rich and Poor Nations, February 20, 2008*, <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/02/080220091427.htm>

Niniejsza wersja referatu została przygotowana w ramach projektu EU PlasTep "Dissemination and fostering of plasma based technological innovation for environment protection in BSR". www.plastep.eu

TABELA 1. Światowe zapotrzebowanie na pierwotne źródła energii. (Miliony ton ekwiwalentu olejowego)

	1971	2002	2010	2020	2030
Węgiel	1 407	2 389	2 763	3 193	3 601
Ropa naftowa	2 413	3 676	4 308	5 074	5 766
Gaz	892	2 190	2 703	3 451	4 130
EJ	29	692	778	776	764
Hydro	104	224	276	321	365
Biomasa i odpady	687	1 119	1 264	1 428	1 605
Inne odnawialne	4	55	101	162	256
Razem	5 536	10 345	12 194	14 404	16 487

TABELA 2. Produkcja energii elektrycznej [GWh] w wybranych krajach wg Interanational Energy Agency

Kraj	USA	D	F	PL	ChRL	IND	IRAN	SAU
Węgiel	2082782	314209	29744	142592	1514897	432799	0	0
Ropa naftowa	137560	4712	8673	2456	57417	29084	24415	82021
Gaz	670191	58505	17143	2425	5575	72802	117056	70979
Biomasa	46029	4468	1760	454	2472	1877	0	0
Odpady	24644	8884	3285	286	0	0	0	0
EJ	787818	165060	441070	0	43342	17780	0	0
Hydro	305724	24440	64338	3294	283681	75339	11098	0
Geotermia	14870	0	0	0	0	0	0	0
Słoneczna Volt	2	333	8	0	0	4	0	0
Słoneczna	548	0	0	0	0	0	0	0
Inne źródła	11300	18859	881	124	0	3590	0	0
Razem	4081468	599470	566902	151631	1907384	633275	152569	153000

TABELA 3. Moc zainstalowana z podziałem na źródła produkcji energii elektrycznej.

Paliwo	Moc (GW)		
	Zainstalowana w 1995	Ocena dla roku 2020	Wzrost netto
Węgiel	870	1836	966
Gaz	435	1296	861
Ropa naftowa	435	648	213
Hydro	667	1026	359
EJ	348	378	30
Inne	145	216	71
Razem	2900	5400	2500

TABELA 4. Światowa emisja ditlenku węgla z energetyki.

	1980	1990	2000	2004	2030
(Miliardy Ton)	18 333,26	21 426,12	23 851,46	27 043,57	40 000

TABELA 5. Emisja SO₂ w roku 2003, w wybranych krajach.

Kraj	SO ₂ [1000 t]	Kraj	SO ₂ [1000 t]
USA	10646	Polska	1564
Niemcy	616	Turcja	1346
Francja	492	EU-15	5420

TABELA 6. Emisja NO_x w roku 2003, w wybranych krajach

Kraj	NO _x [1000 t]	Kraj	NO _x [1000 t]
USA	4532	Polska	1220
Niemcy	1428	Turcja	951
Francja	805	EU-15	9269

TABELA 7. Udokumentowane zapasy ropy naftowej i gazu.

Rok		1997	1998	2005	2006	2007
Ropa naftowa	Miliardy baryłek	1,018 - 1,160	967 - 1033	1,119 - 1,201		1,317
Gaz	Tryliony, m ³	140 - 146		176 - 180	181	175

TABELA 8. Możliwe do eksploatacji zasoby węgla kopalnego .

	Antracyt i bitumen	Węgiel brunatny	Razem
Miliony Ton	479781	425155	904936

TABELA 9 Obecny status odnawialnych źródeł energii i EJ

	Ogniwa fotowoltaiczne	Energia wiatrowa	EJ
Wymagany obszar pod budowę	20 m ² /kW 130 km ² /1000 MW	500 m ² dla dwu jednostek 250 kW (wysokość 30 m, średnica śmigła 28 m)	0,4 km ² /1000MW
Roczne wykorzystanie mocy zainstalowanej	ca.12% brak generacji w nocy	20 – 25% Prędkość wiatru > 6 m/s	ca.80%

W związku z przyjętym w Polsce programem rozwoju energetyki jądrowej, problem powstających w elektrowni odpadów promieniotwórczych, budzi zainteresowanie fachowców i strach przed zagrożeniem, jakie mogą one stwarzać wśród społeczeństwa.

W ramach systemu zabezpieczeń (safeguard), w ciągu siedmiu lat kontrolowałem elektrownie jądrowe w Belgii, Holandii, ówczesnej RFN (Niemiecka Republika Federalna) i we Włoszech. Były to elektrownie z reaktorami z wodą pod ciśnieniem (PWR). Kilkadziesiąt reaktorów lekkowodnych (LWR) i kilka z wrzącą wodą (BWR). Nie słyszałem nigdy o **problemie** odpadów promieniotwórczych. Niewielkie ilości ciekłych i stałych odpadów (waste), z jakimi się stykałem były niskoaktywne. Może średnioaktywne były niektóre zużyte wkłady filtrujące. Gazowe były uwolnienia (**effluents**) powstające w czasie normalnej pracy,

Wypalone paliwo jądrowe nie było deklarowane, jako odpad. Było uznane jako materiał do wykorzystania i po „schłodzeniu” odsyłane do stacji przerobu wypalonego paliwa do Francji. Przed odesłaniem paliwo było schładzane przez szereg lat w basenie (spent fuel pond) na terenie elektrowni. Prawdopodobnie we Francji „martwiono się” co robić z wysoko aktywnymi odpadami powstającymi przy przerobie paliwa. W RFN zaczynały się tylko, w końcu lat osiemdziesiątych, pewne problemy z „zielonymi” protestującymi przy transporcie wypalonego paliwa.

W krajach ówczesnego „bloku wschodniego”, dostawca świeżego paliwa (ZSRR) zastrzegł sobie zwrot wypalonego paliwa po schłodzeniu. Zwrot paliwa był oficjalnie uzasadniony troską o przestrzeganie Układu o Nierozprzestrzenianiu Broni Jądrowej (NPT). Nie wykluczone, że myślano o wykorzystaniu odzyskanego plutonu do innych ce-

łów.

W Stanach Zjednoczonych Ameryki (USA) wypalone paliwo jest traktowane jak odpad i składowane w „mogielnikach”, w Rosji, Francji, Zjednoczonym Królestwie (UK), Japonii i Indiach jest poddawane procesowi przerabiania*).

Miałem ostatnio przyjemność wysłuchania odczytu, p. mgr. Andrzeja Chwasa radcy ministra w Departamencie Energetyki Jądrowej Ministerstwa Gospodarki, pt. „Realizacja Programu Polskiej Energetyki Jądrowej”. Po odczycie rozmawiałem z p. mgr Chwasem o często poruszonym w Polsce problemie odpadów. Na moje pytanie, jakie przewiduje się u nas postępowanie z wypalonym paliwem padła odpowiedź, że nie ma jeszcze ustalonego programu.

Zawartość uranu w wydobytych rudy wynosi 0,035 do 3 % . Uran naturalny oraz użyteczny dla energetyki jądrowej U^{235} do U^{238} określa stopień wzbogacenia. Wiedniej ilości uranu potrzebnej do uruchomienia reaktora jądrowego wymaga więc przerobu ogromnej ilości rudy. Pozbawiony uranu urobek jest wykorzystywany do innych celów.

Krzysztof Rzymkowski

PALIWO DLA ELEKTROENERGETYKI

Ponieważ rudy uranu naturalnego nie należą do silnie radioaktywnych, wymagania dotyczące ochrony środowiska przy projektowaniu, budowie i eksploatacji są identyczne jak dla innych gałęzi przemysłu górnictwa. Ostrzejsze są jedynie wymagania dotyczące usuwania i pomiaru stężenia radonu w kopalniach podziemnych i zakładach wzbogacania rudy, oraz wymagania dotyczące usuwania i neutralizacji pyłów. .

W celu uniknięcia kosztownego transportu rudy zakłady przerobu – wzbogacania rudy budowane są w pobliżu kopalń. Zakłady przerobu rudy uranowej są zakładami chemicznymi, w których uzyskuje się od 85% do 95 % zawartości uranu w urobku. Proces

wzbogacania rudy wymaga oprócz obróbki mechanicznej (zgniatania, mielenia) złożonych procesów chemicznych (wytrawiania, wymywania, wytrącania) wykorzystujących różne substancje toksyczne. Powstające w wyniku tych procesów odpady wymagają unieszkodliwiania. Hałdy odpadów stałych mogą zawierać pierwiastki promieniotwórcze, w celu zapobiegania pyleniu lub wyciekaniu czy wymywaniu izotopów bywają zraszane wodą lub oblewane np. asfaltem. Substancje ciekłe są zbierane w specjalnych odstojnikach i unieszkodliwiane. Wymagania dotyczące ochrony środowiska przy projektowaniu kompleksu przemysłowego kopalnia – zakłady przerobu muszą uwzględniać prawdopodobieństwo

wzrost w wycenianych obecnie rudach wynosi od 10 do 20%. Główny składnik to izotop U^{238} energetyki jądrowej U^{235} . Stosunek izotopu U^{235} do U^{238} wzbogacenia uranu. Uzyskanie odpowiedniej ilości metrów sześciennych uranu wykorzystywany do rekultywacji terenu.

WZBOGACENIE URANU

wystąpienia zjawisk destrukcyjnych (silnych wiatrów, opadów) rozkład cieków wodnych, sposobów dostarczania energii, składowania odpadów toksycznych oraz spełniać warunki bezpieczeństwa stosowane w przemyśle chemicznym i górnictwie. Niski poziom promieniowania, zbliżony do tła naturalnego, wymaga jedynie monitorowania. Toksyczne działanie tlenków uranu jest podobne do oddziaływania tlenków ołowiu i wymaga analogicznych zabezpieczeń. Dalszym krokiem cyklu paliwowego jest wzbogacenie uranu, czyli przetworzenie go do postaci dogodnej do produkcji paliwa. Uzyskiwany w zakładach wzbogacania rudy tlenek uranu U_3O_8 dostarczany jest do zakładów wzbogacania. Zakłady wzbogacania, podobnie jak i zakłady produkcji pali-

wa są zakładami chemicznymi. Ich lokalizacja nie jest ograniczona żadnymi specjalnymi wymaganiami, ale ze względu na specyfikę używanych materiałów zalecane jest stosowanie kryteriów bezpieczeństwa podobnych do zaleceń stosowanych dla zakładów azotowych lub rafinerii. Zagrożenie stanowi tu toksyczność ulatniających w czasie awarii substancji. Jak już wspomniano, stosunek izotopu U^{235} do U^{238} określa stopień wzbogacenia uranu. Zasadnicze znaczenie dla energetyki jądrowej ma uran rozszczepialny U^{235} . Najczęściej stopień wzbogacenia wymaganego dla funkcjonowania reaktorów energetycznych nie przekracza 5,5%. Dla porównania, stopień wzbogacenia uzyskiwanego dla celów doświadczalnych lub wojskowych może wynosić 40% - 90%. Opracowano kilka technologii wzbogacania, z których najwydajniejsza jest metoda wykorzystująca związki lotne uranu. W trzech powszechnie obecnie stosowanych metodach wzbogacania (wirówkowej, dyfuzyjnej, dyszowej) wykorzystywany jest sześciopluorek uranu UF_6 , którego zaletą jest właściwość sublimacji w niskiej temperaturze (około 600 °C) oraz fakt, że fluor nie posiada izotopów (umożliwia to rozróżnienie $U^{238}F_6$ od $U^{235}F_6$), natomiast istotną wadą jest toksyczność i aktywność chemiczna (właściwości żrące) oraz konieczność prowadzenia procesów wzbogacania w wysokiej próżni. Najwydajniejszym i najmniej energochłonnym jest obecnie system wzbogacania wirówkowego. Wszystkie procesy produkcyjne w zakładach wzbogacania są przeprowadzane w hermetyzowanych pomieszczeniach, w których wymiana powietrza dokonywana jest przez zespoły urządzeń filtrujących. Wszystkie pomieszczenia w zakładach przemysłu jądrowego są wzajemnie izolowane i monitorowane przez systemy czujników gazowych, detektorów promieniowania, ciśnienia, temperatury oraz cały system obserwacyjno rejestrujący (kamery) kontrolujący nie tylko procesy technologiczne, ale i pracowników. Każde wejście i wyjście z jednego pomieszczenia do innego jest poprzedzone sprawdzeniem, czy pracownik lub przenoszony przedmiot nie jest zanieczyszczony odpadami promieniotwórczymi.

Po wzbogacaniu uran przetransportowywany jest do zakładów produkcji paliwa w postaci sproszkowanego tlenku uranu UO_2 z którego wytwarzane są tzw.

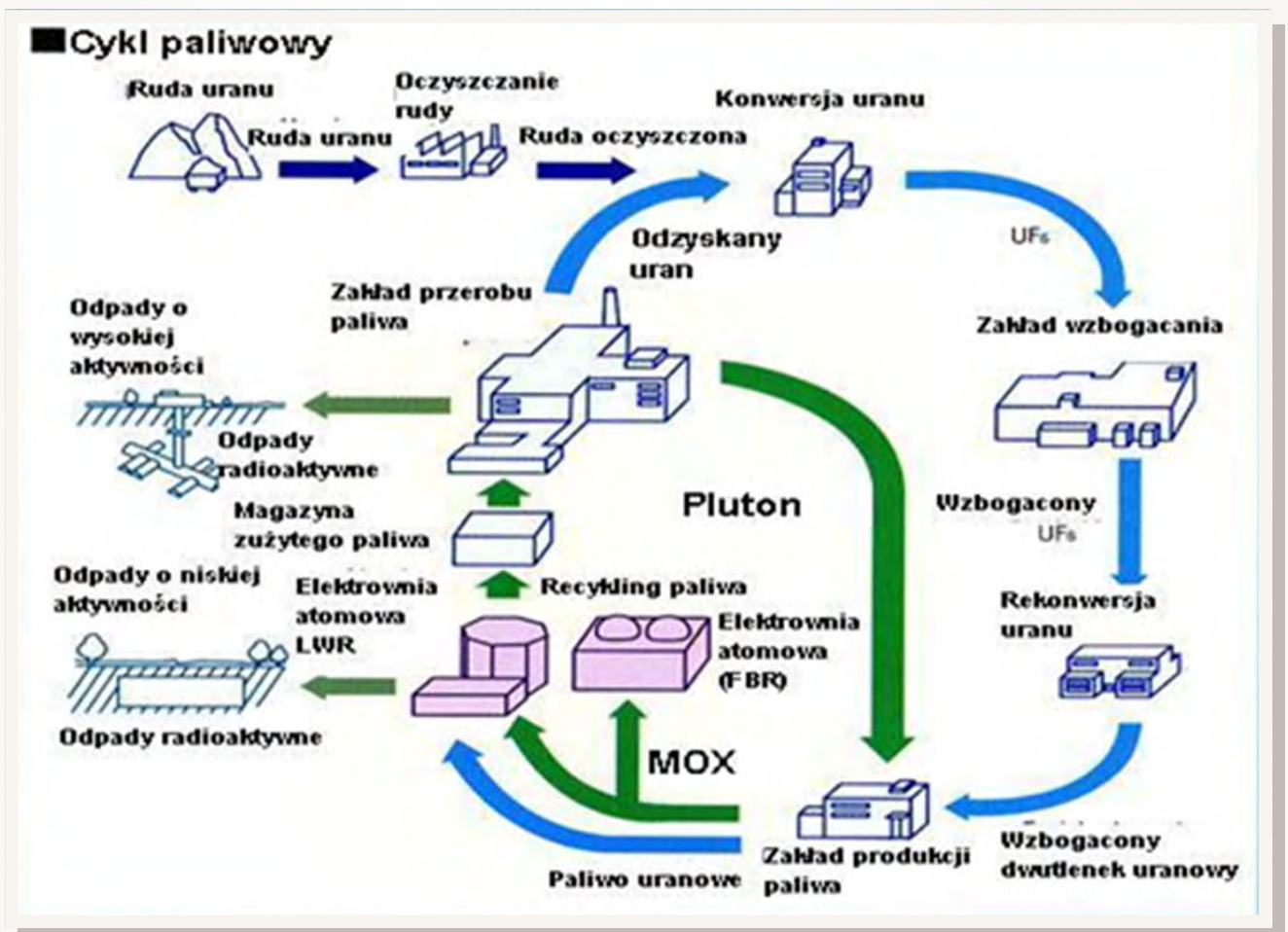
pastylki umieszczone w cyrkonowych rurkach (koszulkach). Stanowią one pręty paliwowe będące elementami zestawów paliwowych. Cały proces produkcyjny jest całkowicie zautomatyzowany (spiekanie pastylek, obróbka mechaniczna, ładowanie do rurek cyrkonowych) i przeprowadzany w zamkniętych komorach. Wzbogacenie uranu jest małe, ze względu na możliwość podwyższonego poziomu promieniowania (t.j. wystąpienia stanu krytycznego) unika się zagęszczenia elementów uranowych poprzez ograniczenia masy i zachowanie odległości. Działanie promieniowania na zewnątrz zakładu jest niezauważalne. Promieniowanie gotowych zestawów paliwowych również nie uważa się za wysokie. Wyprodukowane świeże paliwo jest dostarczane do elektrowni w specjalnych opancerzonych pojemnikach.

Krzysztof Rzymkowski

Jacek T. Kaniewski

WYPALONE PALIWO JĄDROWE

Pytanie sformułowane w tytule jest nieco przewrotne, jak to bowiem zostanie ukazane dalej – wypalone paliwo jądrowe jest zarówno jednym jak i drugim. Ale to od nas będzie zależało, według której z tych cech będziemy je traktować w dalszym postępowaniu po wyładowaniu z reaktora. Jednak w różnych publicznych wystąpieniach przeciwników energetyki jądrowej główną monetą przetargową używaną w sporach z jej zwolennikami jest wypalone paliwo jądrowe traktowane jako zużyte, nie przedstawiające żadnej wartości a jedynie sprawiające ogromne kłopoty ze względu na jego wysoką aktywność promieniotwórczą, groźną na tysiąclecia. Pokazuje się w ten sposób jedynie awers tej monety – wysoką aktywność promieniotwórczą „zużytego” paliwa jądrowego. Ukrywa się natomiast, miejmy nadzieję że w wielu przypadkach nieświadomie, jej rewers, a mianowicie zawarty w nim olbrzymi potencjał ener-



... GROŹNE ODPADY CZY CENNY SUROWIEC ENERGETYCZNY?

tyczny.

W ramach programu polskiej energetyki jądrowej trzeba przeanalizować zalety i wady różnych możliwości w postępowaniu z wypalonym paliwem. W największym skrócie można te możliwości sprowadzić albo do uznania, że wypalone paliwo to długożyciowe, wysokoaktywne odpady, które po jakimś czasie trzeba będzie poddać ostatecznemu składowaniu w głębokich warstwach geologicznych, albo do uznania że prędzej czy później powinno ono zostać poddane przerobowi w celu odzyskania zawartych w nim cennych materiałów rozszczepialnych i paliworodnych. W tym drugim przypadku pozostaje do określenia na jakim etapie eksploatacji elektrowni jądrowych w Polsce będzie to najbardziej celowe: w powiązaniu z recyklingiem plutonu (a może także i uranu) w cyklu paliwowym reaktorów **lekkowodnych** (od których ma się zacząć polska energetyka jądrowa), czy też później, kiedy wystąpi zapotrzebowanie na pluton do rozruchu reaktorów powielających na neutronach prędkich IV generacji. Dodatkowym kryterium dla podjęcia właściwej decyzji będzie możliwość wydzielenia w procesie przerobu tzw. pomniejszych aktywności i najbardziej aktywnych oraz długożyciowych produktów rozszczepienia. Wydzielenie odpowiednich pierwiastków należących do tych dwóch grup miałyby na celu ich późniejszą przemianę w reaktorze na neutronach prędkich w bezpieczne, stabilne nuklidy lub (co najmniej) objętościowe ograniczenie długożyciowych i najbardziej aktywnych odpadów przed ich ostatecznym składowaniem. Celem tego artykułu jest udostępnienie w możliwie przystępny sposób, zarówno zwolennikom jak i przeciwnikom energetyki jądrowej, podstawowej wiedzy dotyczącej samej istoty wypalonego paliwa: co ono zawiera i czym się charakteryzuje. Bez takiej wiedzy trudno oczekiwać rzeczowej dyskusji na jego temat.

Charakterystyka wypalonego paliwa jądrowego z reaktorów lekkowodnych

Paliwem reaktorów lekkowodnych, w których przeważająca część energii otrzymywana jest w wyniku rozszczepienia ciężkich jąder bombardującymi je neutronami spowolnionymi do energii termicznych, jest uran niskowzbożony, tj. uran o kilkuprocentowej zawartości izotopu rozszczepialnego U-235 występującego w uranie naturalnym w ilości około 0,71% masy. Mówiąc tu o izotopach rozszczepialnych, w tym przypadku U-235, mamy na myśli izotopy podlegające rozszczepieniom przez neutrony termiczne. Paliwo eksploatowanych obecnie reaktorów lekkowodnych II generacji zawiera do 4,5% U-235 i jest w nich poddawane **wypaleniu** maksymalnie do 45 000 MWd/tU. W procesie wypalania takiego paliwa około 80% zawartego w nim izotopu U-235 podlega **rozszczepieniu** wyzwalając energię i jednocześnie powodując nagromadzenie się produktów rozszczepienia. Każde rozszczepienie prowadzi do powstania dwóch jąder o odpowiednio mniejszych masach. Rozszczepieniom podlegają także transuranowce powstałe w reaktorze w wyniku przemian jądrowych, szczególnie izotopy plutonu Pu-239 i Pu-241, jak również niewielka część U-238 ulegającego rozszczepieniom przez neutrony o wysokich energiach, które nie zdołały ulec spowolnieniu w moderatorze. W wyniku rozszczepienia jąder tych izotopów powstają **produkty rozszczepienia**, w większości (około 97%) promieniotwórcze.

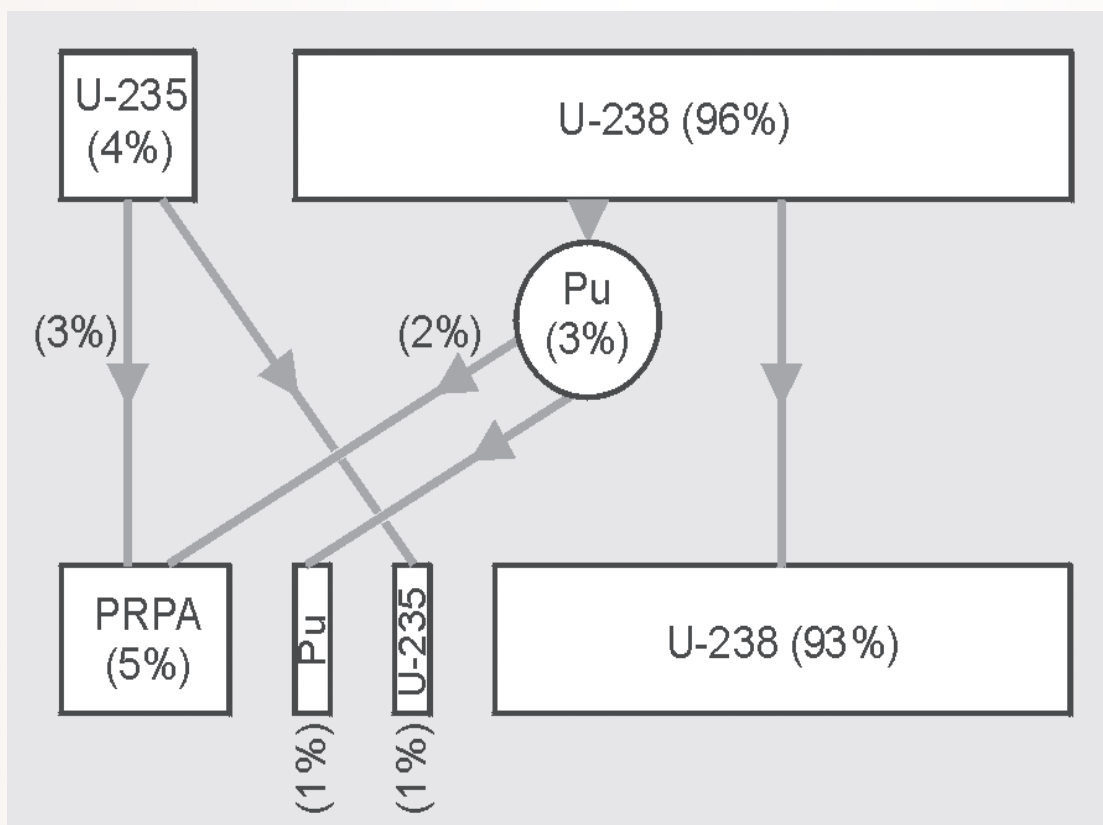
Drugim procesem zachodzącym w reaktorze są **przemiany jądrowe w wyniku pochłonięcia neutronu**, po których może, ale nie musi nastąpić także rozpad promieniotwórczy (patrz dalej). Dotyczy to głównie izotopów uranu i pierwiastków z grupy transuranowców. Ich skutkiem są następujące produkty przemiany: izotopy U-234 i U-236 powstałe z U-235 (pierwszy w wyniku pochłonięcia neutronu i emisji dwóch neutronów, drugi w wyniku pochłonięcia neutronu), wszystkie izotopy plutonu powstałe w wyniku pochłonięcia neutronu, począwszy od przemiany U-238 w izotop Pu-239 i kolejno Pu-240, Pu-241, Pu-242 oraz Pu-243, a także pomniejsze aktywnowce. Są to jedynie najbardziej prawdopodobne, dominujące rodzaje takich przemian.

Trzecim procesem zachodzącym zarówno w reaktorze jak i w usuniętym z niego wypalonym paliwie są **przemiany jądrowe w drodze rozpadu promieniotwórczego** izotopów niestabilnych, zarówno transuranowców jak i produktów rozszczepienia. Może to mieć miejsce wskutek spontanicznej emisji cząstek: n , α lub β .

Rozpadowi w wyniku spontanicznej emisji neutronu (n) podlegają głównie izotopy cięższe od neptunu. Szczególnie duże znaczenie ma to tylko w przypadku parzystych izotopów plutonu (Pu-238, Pu-240 i

padu 6,75 dni) U-237, oraz izotopy Cm-242, Cm-243 i Cm-245. Rozpad β krótkożyciowego (6,7 dni) izotopu U-237 prowadzi do powstania długożyciowego izotopu Np-237 (2,1 mln. lat) należącego do grupy pomniejszych aktywności. Jego obecność w paliwie z recyklingu jest niepożądana ponieważ jest on silnym pochłaniaczem neutronów.

Bilans przemian jądrowych zachodzących w reaktorze w paliwie uranowym, przy przykładowym wypaleniu 45 000 MWd/tU i wzbogaceniu początkowym uranu do 4% zawartości U-235, można w uproszczeniu przedstawić następująco (**rys.1**).



Schemat przemian jądrowych w reaktorze lektwodnym załadowanym paliwem uranowym o 4%-wym wzbogaceniu w U-235 (górną część rysunku). Z U-238 powstaje w reaktorze około 3% Pu, który w 2/3 ulega rozszczepieniom lub przemianom w wyniku pochłonięcia neutronu. Dół rysunku pokazuje przybliżony skład wypalonego paliwa. Skrót PRPA oznacza produkty rozszczepienia i pomniejsze aktywności. (Na podstawie: Mixed Oxide (MOX) fuel. World Nuclear Association (WNA), updated March 2009. <http://www.world-nuclear.org/info/inf.29.html>).

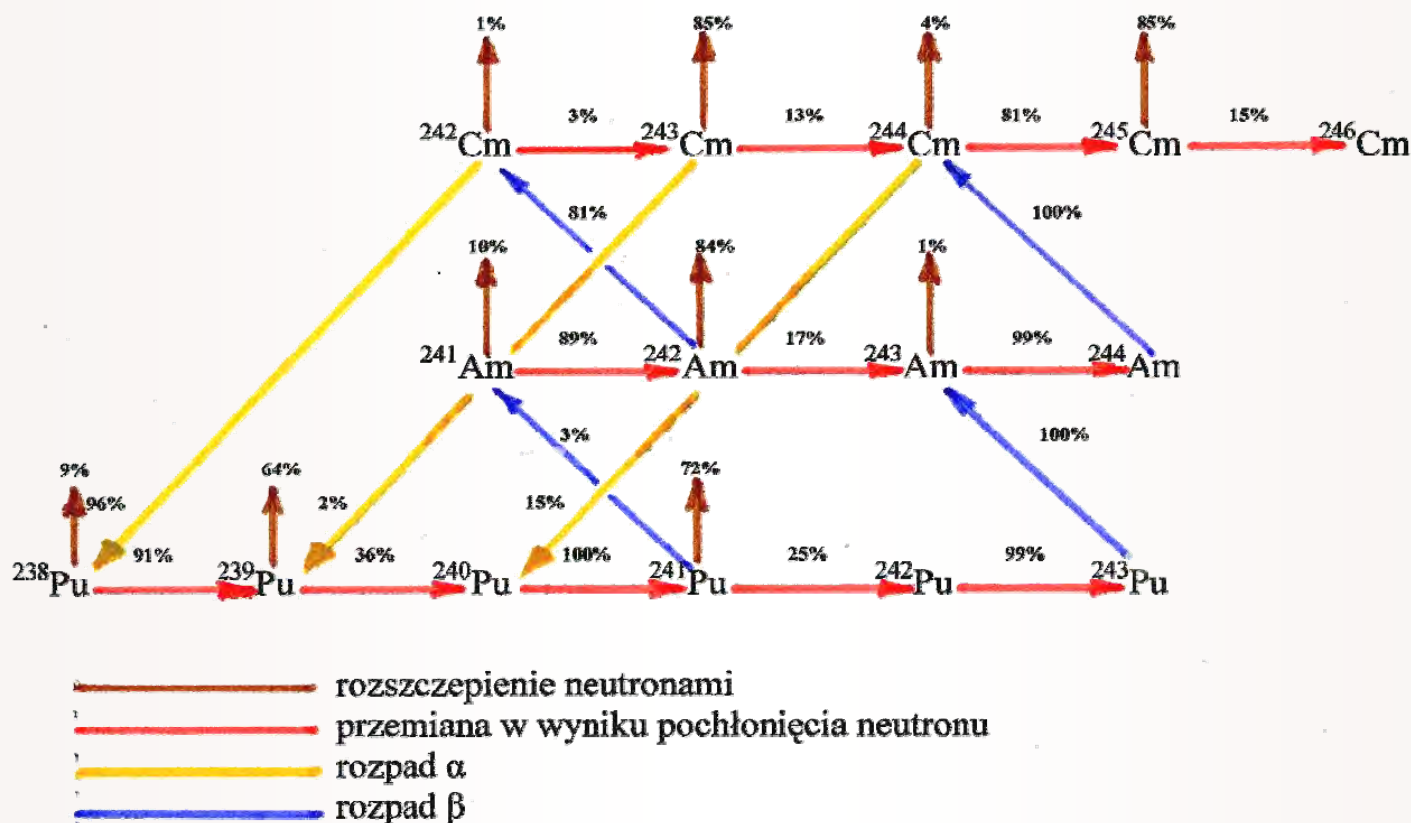
Pu-242) oraz izotopu kiuru Cm-244. Rozpadowi α podlegają: izotopy plutonu, głównie Pu-238 o stosunkowo krótkim (86 lat) okresie połowicznego zaniku (półrozpadu), z którego powstaje izotop uranu U-234, będący początkiem ścieżki przemiany w izotop U-235, U-236 i krótkożyciowego (półokres roz-

padu 6,75 dni) U-237, oraz izotopy Cm-242, Cm-243 i Cm-245. Rozpad β krótkożyciowego (6,7 dni) izotopu U-237 prowadzi do powstania długożyciowego izotopu Np-237 (2,1 mln. lat) należącego do grupy pomniejszych aktywności. Jego obecność w paliwie z recyklingu jest niepożądana ponieważ jest on silnym pochłaniaczem neutronów.

W czasie pracy reaktora w paliwie takim powstaje około 3% plutonu, przy czym jego izotopy Pu-239 i Pu-241 podlegają następnie rozszczepieniom. W rezultacie procesów rozszczepienia i przemian w wypalonym paliwie pozostaje nieco poniżej 1% U-235, ok. 93% U-238 plus niewielkie ilości innych izotopów uranu, oraz około 1% Pu (z czego ok. 2/3 stanowią Pu-239 i Pu-241 a 1/3 – nierozszczepialne dla neutronów termicznych izotopy parzyste plutonu), zaś reszta w ilości około 5% to produkty rozszczepienia i pomniejsze aktywności. Po wyładowaniu wypalonego paliwa z reaktora zachodzą w nim dalsze przemiany jądrowe głównie w wyniku rozpadu promieniotwórczego.

Pomniejsze aktywności zawarte są w wypalonym paliwie uranowym w stosunkowo niewielkiej ilości, ale mają bardzo duże znaczenie z powodu ich wysokiej aktywności oraz, w przypadku niektórych izotopów, bardzo długiego okresu półrozpadu. Należącymi do tej grupy izotopami długoży-

WYPALONE PALIWO JĄDROWE



Główne ścieżki przemian transuranowców prowadzące do powstania pomniejszych aktywności w reaktorze przy dużych wypaleniach paliwa jądrowego, rzędu 60 MWd/tU. (Na podstawie: Sasahara, Akihiro; Matsumara, Tetsuo; Nicolaou, Giorgos; Papaioannou, Dimitri (April 2004). „Neutron and Gamma Ray Source Evaluation of LWR High Burn-up UO₂ and MOX Spent Fuels”. Journal of Nuclear Science and Technology 41 (4): 448-456. <http://www.jstage.jst.go.jp/article/jnst/41/4/448/pdf>).

ciowymi, będącymi z tego tytułu przedmiotem naszego szczególnego zainteresowania, są neptun Np-237 (2,1x10⁶ lat), ameryk Am-241 (432,2 lat) i Am-243 (7370 lat) oraz kiur Cm-244 (18,1 lat) i Cm-245 (8500 lat). Inne izotopy z tej grupy biorą udział w procesie ich powstawania, charakteryzując się stosunkowo krótkimi okresami półrozpadu.

Obraz najważniejszych przemian transuranowców w paliwie uranowym, które wiodą do powstania pomniejszych aktywności z wyjątkiem Np.-237, przedstawia rys. 2. Nie pokazano na nim rozpadu α izotopów plutonu, któremu podlegają Pu-238, Pu-239, Pu-240 i Pu-242, ani też ścieżki przemian uranu, jak również przemian mających tylko nieznaczny wpływ na skład izotopowy wypalonego paliwa i jego aktywność promieniotwórczą. Zawartość pomniejszych aktywności w wypalonym paliwie jest na poziomie ułamka procentu, rosnąc w miarę wzrostu jego wypalenia. Spośród nich najbardziej aktywny jest Am-241 ulegający rozpadowi α . W początkowym okresie po wyładunku wypalonego paliwa z reaktora ilość tego izotopu początkowo szybko wzrasta, ponieważ powstaje on w wyniku rozpadu β izotopu Pu-241 o krótkim okresie półrozpadu (14 lat). Po obniżeniu wpływu Am-241 i Am-243 na aktywność wypalonego paliwa w wyniku rozpadu tych izotopów, o jej wysokości decydować będzie głównie długożyciowy Np-237. Pomniejsze aktywności charakteryzują się przekrojami czynnymi na rozszczepienie przez neutrony prędkie porównywalnymi z Pu-239, Pu-241 oraz U-235, co pokazuje tabela 1. Stwarza to możliwość ich wypalenia w reaktorach prędkich.

GROŹNE ODPADY CZY CENNY SUROWIEC ENERGETYCZNY?

Izotop	$T_{1/2}$	σ_{nf}	σ_{nf}	σ_{nf}	σ_{nf}
		Max.avg	res.int.	fst avg	14 MeV
U-234	2,46E5a	0,4068	0,6175	1,215	2,059
U-235	7,04E8a	504,4	271,6	1,219	2,060
U-236	2,34E7a	0,417E-1	4,382	0,582	1,628
U-238	4,47E9a	0,105E-4	0,216E-2	0,2998	1,130
Pu-238	87,7a	14,74	22,70	1,968	2,702
Pu-239	2,41E4a	698,0	289,5	1,800	2,333
Pu-240	6,57E3a	0,613E-1	3,736	1,349	2,122
Pu-241	14,35a	945,2	570,8	1,626	2,182
Pu-242	3,73E5a	0,130E-1	0,9418	1,123	1,991
Np-237	2,14E6a	0,157E-1	0,2066	1,290	2,111
Am-241	4,32E2a	2,924	9,774	1,323	2,391
Am-242m	141a	6687	1630	1,842	2,470
Cm-244	18,1a	0,9132	11,91	1,608	2,990
Cm-245	8,5E3a	1797	748,5	1,979	2,464

Tabela 1. Przekroje czynne dla wybranych średnio- i długożyciowych aktywności zawartych w wypalonym paliwie reaktorów lekkowodnych (tłustym drukiem zaznaczono izotopy U i Pu rozszczepialne przez neutrony termiczne)

Objaśnienia do tabeli 1:

$T_{1/2}$ okres półrozpadu

σ_{nf} przekrój czynny na rozszczepienie

σ_{ny} przekrój czynny na reakcję n, γ (przemiana w drodze pochłonięcia neutronu)

Skróty zawarte w drugim rzędzie pod symbolami przekrojów czynnych określają sposób wyznaczenia ich wartości oraz energię lub zakres energii neutronów, dla których je wyznaczono:

Max.avg. wartość średnia maxwellowska dla neutronów termicznych (zakres 1,0E-05 do 10eV)

res.int. wartość liczona jako całka obszaru rezonansu (zakres 0,5eV do 100keV)

fst avg. wartość średnia dla widma neutronów prędkich (1keV do 20MeV)

14 MeV wartość charakterystyczna dla energii neutronów rozszczepieniowych

Promieniotwórcze produkty rozszczepienia

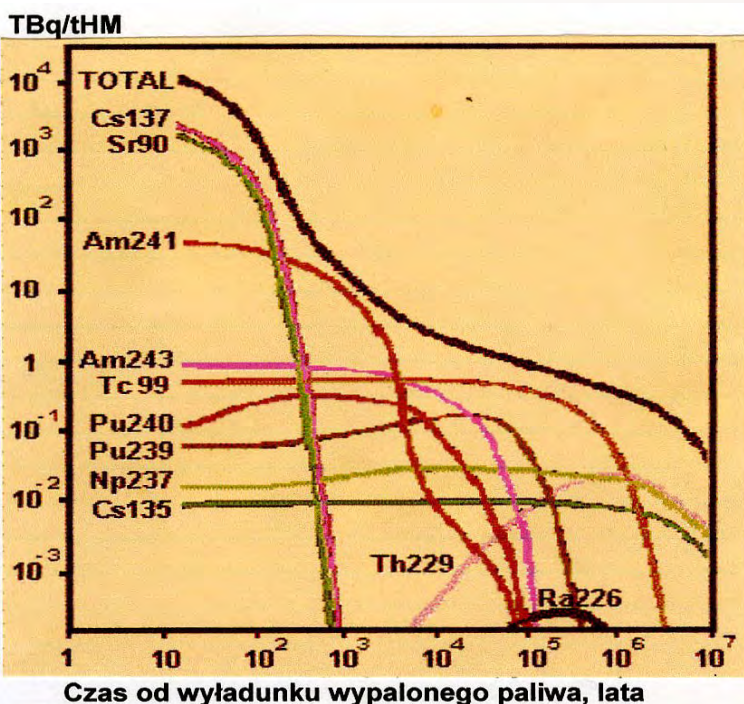
stanowią grupę ponad 200 izotopów, z czego tylko nieco powyżej 10 charakteryzuje się okresem półrozpadu dłuższym od 10 lat ale dla 8 z nich okres ten (podany dalej w nawiasach) jest bardzo długi: Se-79 ($2,95 \times 10^5$ lat), Rb-87 ($4,75 \times 10^{10}$ lat), Zr-93 ($1,53 \times 10^6$ lat), Tc-99 ($2,1 \times 10^5$ lat), Pd-107 ($6,5 \times 10^6$ lat), Sn-126 (1×10^5 lat), I-129 ($1,6 \times 10^7$ lat), Cs-135 ($1,6 \times 10^7$ lat). Istotne znaczenie ma jedynie pięć z tych izotopów ponieważ Se-79, Sn-126 i Pd-107 występują w bardzo małych ilościach. W ciągu pierwszych 100 lat schładzania wyładowanego z reaktora wypalonego paliwa jego aktywność będzie zdominowana obecnością radioaktywnych produktów rozszczepie-

nia. Ich aktywność spada o rząd wielkości już w ciągu pierwszych 10 lat głównie dzięki rozpadowi Ru-106, Cs-134 i Pr-144. Po tym okresie dalszy spadek o trzy rzędy wielkości aktywności produktów rozszczepienia następuje w okresie niecałego tysiąca lat dzięki rozpadowi izotopów średniożyciowych Cs-137 (30,1 lat) i Sr-90 (29 lat). W nieco dłuższym czasie rozpada się Sm-151 (90 lat), ale występuje on w stosunkowo niewielkich ilościach ponieważ łatwo ulega przemianom w czasie pracy reaktora. W dalszym okresie o aktywności wypalonego paliwa będą decydowały aktywności (izotopy plutonu i pomniejsze aktywności) oraz produkty rozszczepienia Tc-99 i Cs-135. Udział Tc-99 w aktywności wypalonego pa-

liwa jest wprowadzie ponad tysiąckrotnie niższy od początkowego udziału Cs-137 i Sr-90, poza tym emituje on jedynie promieniowanie β , za to jest długożyciowym produktem rozszczepienia występującym w większej ilości.

Na **rys.3** pokazano aktywność promieniotwórczą i jej zmianę w czasie dla najbardziej aktywnych promieniotwórczo aktywnowców (plutonu i pomniejszych aktywnowców) oraz produktów rozszczepienia wchodzących w skład wypalonego paliwa po dziesięciu latach schładzania od czasu jego wyładowania z reaktora. W przypadku przerobu wypalonego paliwa można obniżyć aktywność odpadów o ponad dwa rzędy wielkości przez wydzielenie izotopów Cs-137 i Sr-90. Aktualnie jest to możliwe w zakładach przerobu wypalonego paliwa w Sellafield (Zjednoczone Królestwo WB). Wydzielenie tych izotopów będzie wymagało ich oddzielnego składowania w okresie kilkuset lat, co uzasadniałoby składowanie wraz z nimi innych odpadów wysokoaktywnych o porównywalnych okresach półrozpadu.

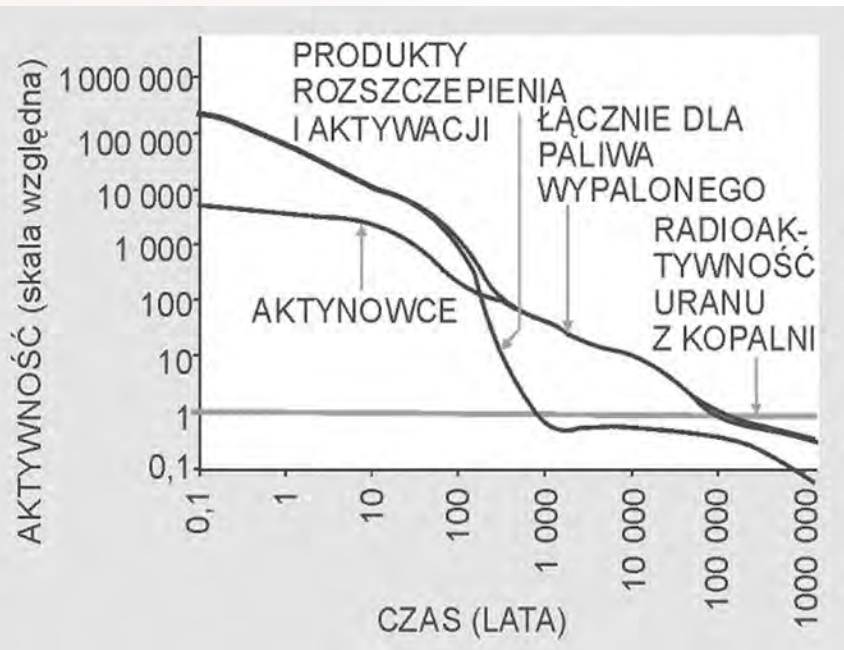
Nowe technologie przerobu wypalonego paliwa umożliwią wydzielenie długożyciowego izotopu Tc-99 w celu poddania go przemianie w reaktorze na neutronach prędkich. Może ona prowadzić do przekształcenia tego izotopu w stabilny (nieaktywny promieniotwórczo) izotop Ru-100. Sumaryczny wpływ poszczególnych grup izotopów promieniotwórczych na ogólną aktywność wypalonego paliwa pokazuje **rys.4**.



Rys.3. Spadek w czasie podanej w skali bezwzględnej aktywności promieniotwórczej najbardziej aktywnych izotopów zawartych w wypalonym paliwie jądrowym reaktorów lekkowodnych. Aktywność podana jest w terabekerelach (TBq) na tonę ciężkiego metalu (tHM) paliwa jądrowego. (Źródło: <http://www.ricin.com/nuke/bg/hlw.html>).

Jeden bekerel oznacza jeden rozpad na sekundę. Terabekerel = 1012 bekereli. Dawniej używano jednostki kiur (1 Ci). Jest ona równa 37 gigabekereli (GBq).

W fachowej terminologii anglosaskiej używa się terminu „heavy metal” (w skrócie HM) określającego wyłącznie całość aktywnowców (uran, pluton, pomniejsze aktywnowce) składających się na paliwo jądrowe, tj. bez elementów struktur paliwa.



Rys.4. Względna aktywność promieniotwórcza wypalonego paliwa o wypaleniu 38 000 MWd/tU odniesiona do aktywności uranu wydobytego z kopalni. W ciągu pierwszych 100 lat przeważa aktywność produktów rozszczepienia, zaś po upływie tego czasu dominują aktywnowce i pochodne ich rozpadu. (Na podstawie: R.C. Ewing, Nuclear Fuel Cycle: Environmental Impact. MRS Bulletin, Vol. 33, April 2008 r.).

Przedstawiono wyżej jedynie informacje dotyczące aktywności promieniotwórczej wypalonego paliwa w dłuższym okresie czasu i decydujących o niej zawartych w tym paliwie głównych izotopów. Niebezpieczne dla zdrowia ludzkiego izotopy krótkożyciowe, np. izotop jodu I-131 (okres półrozpadu 8,04 dni) mogą mieć znaczenie głównie w przypadku gdyby doszło do rozszczelnienia wypalonego paliwa na terenie elektrowni i niekontrolowanego przedostania się uwolnionego w ten sposób jodu do atmosfery. Miało to ostatnio miejsce w przypadku awarii w Fukushima. Długożyciowy izotop jodu I-129 wymaga zachowania szczególnej ostrożności w przypadku przerobu wypalonego paliwa.

Z punktu widzenia postępowania z wypalonym paliwem największe znaczenie mają: rozpad w wyniku spontanicznej emisji neutronów (n) oraz cząstek α w przypadku niektórych transuranowców (niektórych izotopów plutonu i kiuru), oraz rozpad β w przypadku części najbardziej aktywnych produktów rozszczepienia. Rozpadowi towarzyszy promieniowanie γ .

W artykule nie uwzględniono aktywności struktur konstrukcyjnych wypalonego paliwa, które podlegają aktywacji pod wpływem bombardujących je neutronów stają się promieniotwórcze. W przypadku przerobu wypalonego paliwa napromienione struktury kwalifikują się jednak tylko jako odpady średnio-aktywne i z punktu widzenia tego artykułu mają znaczenie drugorzędne.

W przedstawionym wyżej bilansie przemian izotopowych ukazane zostały dane dla paliwa reaktorów II generacji, o wypaleniu 38 - 45 tysięcy MWd/tU, jednak reaktory III generacji będą pracować na paliwie uranowym wzbogaconym do 5% w U-235 z wydłużonym okresem między przeładunkami (18 - 22 miesięcy) co będzie skutkowało jego głębszym wypaleniem, sięgającym 60 000 MWd/tU. Proporcje w składzie izotopowym takiego paliwa będą nieco inne, wzrośnie m.in. udział parzystych izotopów plutonu oraz pomniejszych aktynowców, ale dla naszych dalszych rozważań nie ma to istotnego znaczenia.

Wartość energetyczna plutonu i uranu zawartego w wypalonym paliwie

Przyjmując z wystarczającym dla naszych rozważań

przybliżeniem, że 1 kg czystego materiału rozszczepialnego, jakim są U-235 oraz długożyciowe nieparzyste izotopy plutonu (Pu-239 i Pu-241), może być źródłem energii $8,2 \text{ Jx}10^{13}$ (dżuli), można policzyć, że w przypadku przerobu 1 tony paliwa wypalonego w reaktorze lekkowodnym do 45 000 MWd/tU zawarta w nim ilość 10 kg U-235 i łącznie 6,5 kg Pu-239 oraz Pu-241 (przy 10 kg całkowitego Pu) mogłaby, w przypadku ich recyklingu również do reaktora lekkowodnego, stać się źródłem około 135 GWh energii elektrycznej. Gdyby jednak odzyskane z wypalonego paliwa uran i pluton zostały wykorzystane w reaktorze powielającym na neutronach prędkich, wówczas odpowiedni uzysk energii wyniósłby około 8 600 GWh energii elektrycznej, zatem byłby przeszło 60 razy większy. Decyduje o tym głównie potencjał energetyczny zawartych w jednej tonie wypalonego paliwa 930 kilogramów U-238, który częściowo może ulec rozszczepieniu neutronami prędkimi, a częściowo zostać przekształcony w reaktorze prędkim w rozszczepialny, a także podlegający przemianom izotop Pu-239.

Obliczenie przeprowadzone w przypadku recyklingu do reaktora lekkowodnego ma charakter czysto teoretyczny, w praktyce jednak uzysk energetyczny będzie mniejszy o około 20% ponieważ część jąder rozszczepialnych nie ulegnie rozszczepieniu przy tylko jednym recyklingu. Recykling wielokrotny, który będzie stosowany w przypadku reaktorów prędkich IV generacji, spowoduje nawet 80-krotny wzrost energii uzyskanej z tej samej ilości wypalonego paliwa w porównaniu do jednorazowego recyklingu w reaktorach lekkowodnych.

Korzyści z odzysku plutonu w przypadku jego recyklingu w reaktorach lekkowodnych

Poniższe uproszczone obliczenia wykonano dla 1 tony paliwa o wzbogaceniu początkowym 5% (zawierającego 50 kg U-235), jakie może być stosowane w reaktorach lekkowodnych III generacji, wypalonego do 60 000 MWd/tU. Po takim wypaleniu będzie ono zawierało około 1,2% czyli 12 kg plutonu całkowitego, na co składa się 0,62% czyli 7,44 kg izotopów rozszczepialnych Pu-239 i Pu-241 łącznie, oznaczanych dalej symbolem Pu_f. (Indeks „f” pochodzi od *fissionable* czyli rozszczepialne).

Ekwiwalentem dla jednej tony świeżego paliwa uranowego (oznaczanego UOX od *uranium oxides*) o zawartości 5% U-235 (50 kg) jest paliwo uranowo-plutonowe (oznaczane skrótem MOX od *mixed oxides*) zawierające uran naturalny oraz około 1,2 razy więcej izotopów rozszczepialnych plutonu Pu, niż wynosi zawartość U-235 w przypadku paliwa uranowego, tj. $1,2 \times 5\% = 6\%$ całej masy paliwa. Zastosowany tu mnożnik 1,2 wprowadzono ze względu na fakt, że oprócz izotopów rozszczepialnych pluton za-

równoważne paliwu uranowemu o 5%-wym wzbogaceniu. Z kolei do uzyskania tej ilości plutonu potrzeba $(1t/1,2\%) \times 100\% = 83,33$ ton wypalonego paliwa. Łatwo dalej policzyć, że przerób 83,33 ton wypalonego paliwa może pozwolić na wytworzenie 10,33 ton świeżego paliwa MOX, a stosunek tych dwóch liczb równy 8,07 oznacza, że 8 zespołów (kaset) wypalonego paliwa dostarczy ilości plutonu niezbędnej do wytworzenia jednej kasety paliwa MOX. Możliwość wytworzenia jednego świeżego zespołu paliwowego przez wykorzystanie izotopów

1 tona paliwa UOX		1 tona paliwa MOX
0,2% U-235 w <i>tails</i>	0,35 U-235 w <i>tails</i>	
9,41 tNU	12,92 tNU	903 kg NU
8,86 tSWU	6,62 tSWU	96,8 kg Pu

Tabela 2. Ilości uranu naturalnego, plutonu oraz pracy rozdzielania niezbędne do wyprodukowania jednej tony świeżego paliwa UOX i MOX

wiera także izotopy parzyste pochłaniające neutrony, a jego rozszczepialne izotopy 239 i 241 charakteryzują się około dwa razy większym stosunkiem przekroju czynnego na pochłanianie neutronów do przekroju czynnego na rozszczepienie, niż ma to miejsce w przypadku U-235. Takie paliwo powinno więc zawierać $6/0,62 \approx 9,68\%$ plutonu i 90,32% uranu naturalnego. Tabela 2 pokazuje ilości uranu naturalnego (NU) i pracy rozdzielania niezbędne do wyprodukowania jednej tony świeżego paliwa uranowego (UOX) oraz ilości uranu naturalnego i plutonu niezbędne do wytworzenia równoważnego mu paliwa MOX. Nie uwzględniono niewielkich strat uranu w procesach technologicznych.

Objaśnienia do tabeli 2: W nawiasach podano zawartość U-235 w uranie zubożonym, powstałym jako pozostałość (*tails*) w procesie wzbogacania izotopowego, wskazującą na stopień wykorzystania uranu naturalnego będącego materiałem wejściowym procesu wzbogacania. Z tabeli 2 wynika, że wykorzystanie 1 tony plutonu w paliwie MOX może dać oszczędność pracy rozdzielania potrzebnej dla takiej samej ilości równoważnego paliwa uranowego równą 68,38 do 91,52 tSWU, oraz oszczędność na uranie naturalnym (po odliczeniu uranu potrzebnego do paliwa MOX) w ilości, odpowiednio, od 96,3 do 132,56 t uranu naturalnego.

Dysponując jedną toną plutonu można wytworzyć $(1000:96,8) = 10,33$ ton paliwa MOX, które byłoby

rozszczepialnych pochodzących z ośmiu wypalonych zespołów oznacza **możliwość zwiększenia energetycznego wykorzystania uranu pierwotnego w przybliżeniu o 1/8 czyli o 12,5%**.

W obecnie eksploatowanych reaktorach lekkowodnych istnieje ograniczenie dopuszczalnej ilości paliwa zawierającego pluton. Wynika to stąd, że w przypadku rozszczepienia izotopów plutonu Pu-239 i Pu-241 powstaje mniej neutronów opóźnionych (0,26%) niż w przypadku rozszczepienia izotopu U-235 (0,71%), podczas gdy powstawanie neutronów opóźnionych jest podstawowym warunkiem sterowalności reaktora. Normalnie dopuszczalny jest załadunek reaktora lekkowodnego paliwem MOX jedynie do 1/3 pojemności rdzenia.

Korzyści z odzysku uranu w przypadku jego recyklingu w reaktorach lekkowodnych

Przerób jednej tony wypalonego paliwa, o którym była mowa wyżej, może dostarczyć około 940 kg uranu, oznaczanego w fachowej literaturze anglosaskiej skrótem RepU (od *reprocessed U*). Dla wypalenia większego od 45 000 MWd/tU będzie miał on zawartość U-235 poniżej 1%. Gdyby tę ilość uranu pochodzącego z przerobu referencyjnego paliwa wzbogacić do 5% zawartości U-235 przy założeniu 0,8% zawartości U-235 w RepU i 0,2% U-235 w po-

zostałościach z procesu wzbogacania (w uranie zubożonym) to otrzymalibyśmy 118 kg docelowego uranu niskowzbogaconego (LEU). Ilość ta stanowi ok. 12% ilości LEU w paliwie wyjściowym. Oznacza to, że **przez wykorzystanie w drodze recyklingu uranu pochodzącego z przerobu wypalonego paliwa (RepU) można zwiększyć wykorzystanie energetyczne uranu pierwotnego o 12%. Łącznie z recyklingiem plutonu daje to prawie 25%**. Wartość RepU jako paliwa jest w rzeczywistości niższa niż uranu naturalnego. Jest to spowodowane obecnością, w ilości 0,4 - 0,7%, izotopu U-236 powstałego w reaktorze w wyniku wychwytu neutronów przez U-235. Izotop U-236 charakteryzuje się prawie dwukrotnie wyższym przekrojem czynnym na pochłanianie neutronów niż U-238, a jego przemiana w wyniku absorpcji neutronu prowadzi do powstania niepożądanego Np-237 o około 65 razy większym przekroju czynnym na pochłanianie neutronów, niż dla U-238. Powoduje to pewne pogorszenie bilansu neutronów w rdzeniu reaktora. RepU zawiera także powstały w reaktorze silnie radioaktywny izotop U-234, stwarzający konieczność stosowania większych środków ostrożności w postępowaniu z tym materiałem.

Mimo swoich wad RepU może zostać wykorzystany w paliwie uranowo-plutonowym typu MOX, może też być poddany wzbogacaniu izotopowemu z przeznaczeniem do paliwa uranowego, lub przekazany do przechowania do czasu, gdy znajdzie się na niego odpowiednie zapotrzebowanie, np. do wytwarzania paliwa uranowo-plutonowego dla reaktorów na neutronach prędkich IV generacji. Wzbogacanie izotopowe RepU jest obecnie możliwe tylko z wykorzystaniem technologii ultrawirówkowych, a w przyszłości zapewne także technologii laserowych, jeżeli zostaną one wdrożone na skalę przemysłową. Przy dużych wypaleniach w reaktorze pozyskiwany z przerobu wypalonego paliwa RepU zawiera zbyt dużo U-236 i raczej nie kwalifikuje się do wzbogacania lecz bardziej do produkcji paliwa do reaktorów na neutronach prędkich.

Uwagi końcowe

Reaktory lekkowodne, które pracują na neutronach termicznych, zużywają tylko około 4% potencjału energetycznego ich paliwa. Częściowe spożytkowanie wypalonego paliwa jądrowego w drodze jego przerobu i recyklingu plutonu i uranu w zamkniętym

cyklu paliwowym, zwiększające wykorzystanie uranu pierwotnego w stosunku do cyklu otwartego, jak to zostało policzone w tym artykule, maksymalnie o 25% - czyli do 5% potencjału energetycznego tego paliwa, jest możliwe i stosowane od lat w reaktorach lekkowodnych w kilku krajach, szczególnie we Francji, Japonii i w Rosji (na ogół jednak bez recyklingu uranu). Obserwowany obecnie renesans energetyki jądrowej w świecie spowoduje znaczący wzrost zapotrzebowania na uran, co wydaje się już skutkować wzrostem jego cen. Może to spowodować wzrost opłacalności przerobu wypalonego paliwa z reaktorów lekkowodnych, które obecnie w skali światowej jest przerabiane tylko w 15%. Uznanie celowości przerobu wypalonego paliwa z reaktorów, które będą budowane w Polsce, a w następstwie recykling co najmniej plutonu, powinny być oparte przede wszystkim o kalkulacje ekonomiczne. Efektem dodatkowym przerobu wypalonego paliwa w przypadku reaktorów lekkowodnych jest zmniejszenie ilości (objętości) długożyciowych odpadów wysokoaktywnych związanych z wypalonym paliwem oraz generacji ciepła w tych odpadach, co ułatwia ich przechowywanie i podobnie ułatwi późniejsze składowanie. Możliwe jest wdrożenie w niedługim czasie nowych technologii przerobu wypalonego paliwa uranowego pozwalających na wydzielenie oprócz plutonu i uranu także pomniejszych aktywności oraz niektórych długożyciowych produktów rozszczepienia w celu ich przekształcenia w izotopy stabilne lub izotopy o znacznie krótszym okresie półrozpadu.

Po wprowadzeniu do eksploatacji reaktorów prędkich, co w połowie tego stulecia rozpocznie się nieuchronnie na masową skalę, wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych będzie musiało zapewnić im pierwsze wsady paliwa, po czym reaktor stanie się prawie samowystarczalny dzięki powielaniu w nim paliwa plutonowego z U-238. Tego ostatniego będzie pod dostatkiem, jako pozostałości po wzbogacaniu izotopowym uranu przeznaczonego do paliwa reaktorów lekkowodnych. W ten sposób potencjał energetyczny paliwa załadowanego pierwotnie do reaktorów lekkowodnych zostanie ostatecznie wykorzystany w prawie 100 procentach.

Uruchamiając program energetyki jądrowej w Polsce należy brać pod uwagę, że za około 40 - 50 lat można będzie spodziewać się wielkiego zapotrzebowania na pluton niezbędny do uruchamiania rosnącej liczby re-

aktorów powielających na neutronach prędkich. Wówczas wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych może stać się poszukiwanym towarem. Mając powyższe na uwadze, decydując się na zamknięty cykl paliwowy reaktorów lekkowodnych należy pamiętać, że do wyprodukowania plutonu w ilości potrzebnej do zapewnienia dwóch pierwszych wsadów reaktora prędkiego o mocy 1000 MW(e) potrzebne będzie wypalone paliwo nagromadzone w ciągu ponad 25 lat pracy dwóch reaktorów LWR o mocy 1000 MW(e) każdy.

W przypadku zastosowania reaktorów prędkich IV generacji pracujących na paliwie metalicznym, oraz nowej technologii przerobu tego paliwa opartej na dwóch procesach – *electrorefiningu* i *pyroprocessingu* - będzie możliwe praktycznie całkowite wypalenie aktywności, a także niektórych długożyciowych produktów rozszczepienia (zwłaszcza Tc-99) pocho-

dzących z wypalonego paliwa reaktorów lekkowodnych. Będzie to możliwe zarówno w stosunku do tych składników wypalonego paliwa, które zostaną wyizolowane w cyklu zamkniętym LWR, jak i pozostających w wypalonym paliwie do czasu jego przerobu na wsad do reaktorów prędkich. Będzie także technologicznie racjonalny i ekonomicznie uzasadniony przerób wypalonego paliwa MOX. Stopniowe przedstawienie energetyki jądrowej z reaktorów termicznych (lekkowodnych) na prędkie spowoduje znaczne skrócenie okresu niebezpiecznej dla otoczenia aktywności promieniotwórczej odpadów pochodzących z wypalonego paliwa, nawet do około stu lat. Więcej na ten temat - w kolejnych artykułach. Będą one poświęcone możliwym sposobom postępowania z wypalonym paliwem jądrowym z perspektywy nowych technologii jego przerobu, a także postępom w oparowaniu technologii reaktorów prędkich IV generacji.

Wykaz skrótów używanych w tekście

- LWR reaktor lekkowodny (*light water reactor*)
 BWR reaktor (lekkowodny) z wodą wrzącą (*boiling water reactor*)
 PWR reaktor (lekkowodny) z wodą pod ciśnieniem, inaczej wodnociśnieniowy, (*pressurized water reactor*)
 FBR reaktor powielający na neutronach prędkich (*fast breeder reactor*)
 IFR zintegrowany reaktor na neutronach prędkich (*integrated fast reactor*)
 HM ciężki metal (*heavy metal*), wyłącznie całość aktywności (uran, pluton, pomniejsze aktywności) składających się na paliwo jądrowe, tj. bez elementów struktur paliwa.
 LEU uran niskowzbożony, uran o niskim wzbogaceniu w izotop U-235, poniżej 20% zawartości tego izotopu (*low enriched uranium*)
 NU uran naturalny (*natural uranium*)
 UOX paliwo tlenkowo-uranowe zawierające uran w postaci UO_2 (*uranium oxide*)
 MOX paliwo tlenkowe uranowo-plutonowe zawierające mieszaninę UO_2 i PuO_2 (MOX)
 RepU uran pochodzący z przerobu wypalonego paliwa (*reprocessed uranium*)
 GBq gigabekerel, jednostka aktywności promieniotwórczej równa 10^9 bekereli; jeden bekerel jest równy jednemu rozpadowi na sekundę
 TBq terabekerel równy 10^{12} bekereli
 SWU jednostka pracy rozdzielania stosowana do określenia wysiłku włożonego w rozdzielanie izotopów uranu w procesie jego wzbogacania izotopowego (więcej w przypisie 19)
 MWd/tU, MWd/tHM – jednostki określające głębokość wypalenia paliwa jądrowego.

STOWIARZYSTWO EKOLOGÓW NA RZECZ ENERGII JĄDROWEJ



GEN III
ZAAWANSOWANE

GENERACJA I WCZESNE PROTOTYPY

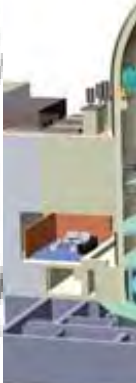


- Shippingport
- Drezno
- Magnox

GENERACJA II ZASTOSOWANIA KOMERCYJNE

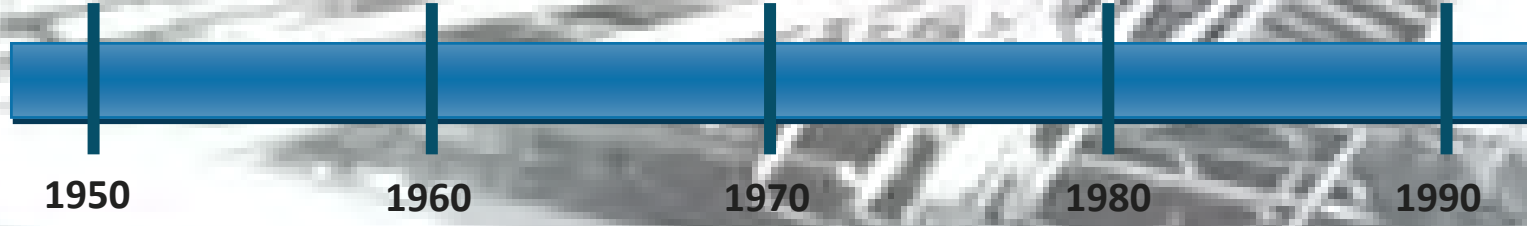


- PWR
- BWR
- CANDU



GEN I

GEN II

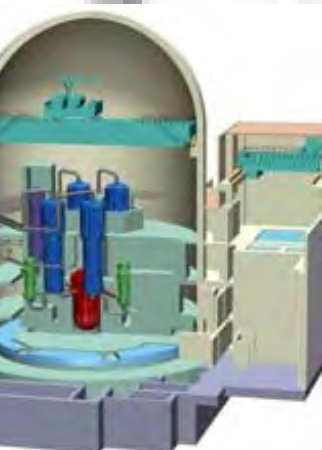


ZOBACZ
KONSTRUKCJE

**GENERACJA IV
PROJEKTY REWOLUCYJNE**

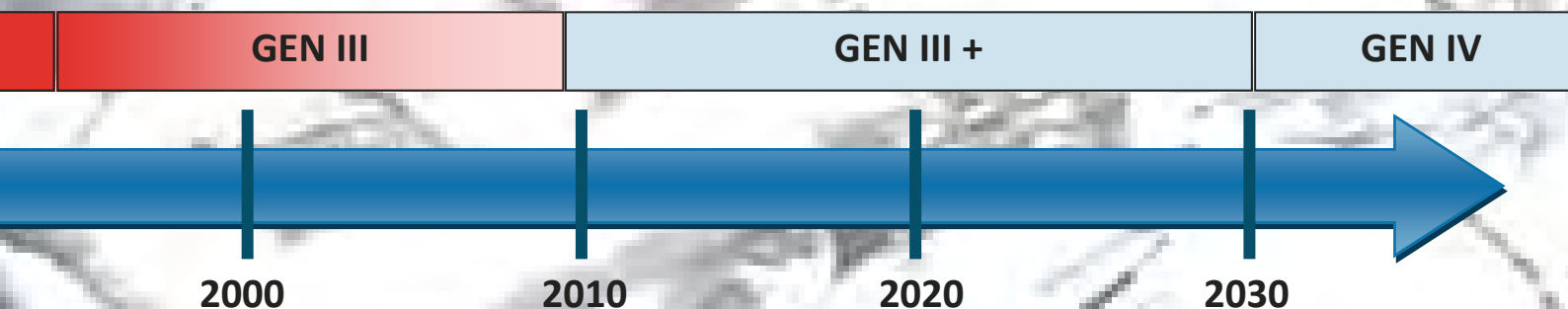
**GENERACJA III+
PROJEKTY EWOLUCYJNE**

**GENERACJA III
WANSOWAE LWR**



- ABWR
- ACR 1000
- AP 1000
- APWR
- EPR
- ESBWR

- BEZPIECZNIEJSZE
- STABILNIEJSZE
- TAŃSZE
- APWR
- EPR
- ESBWR



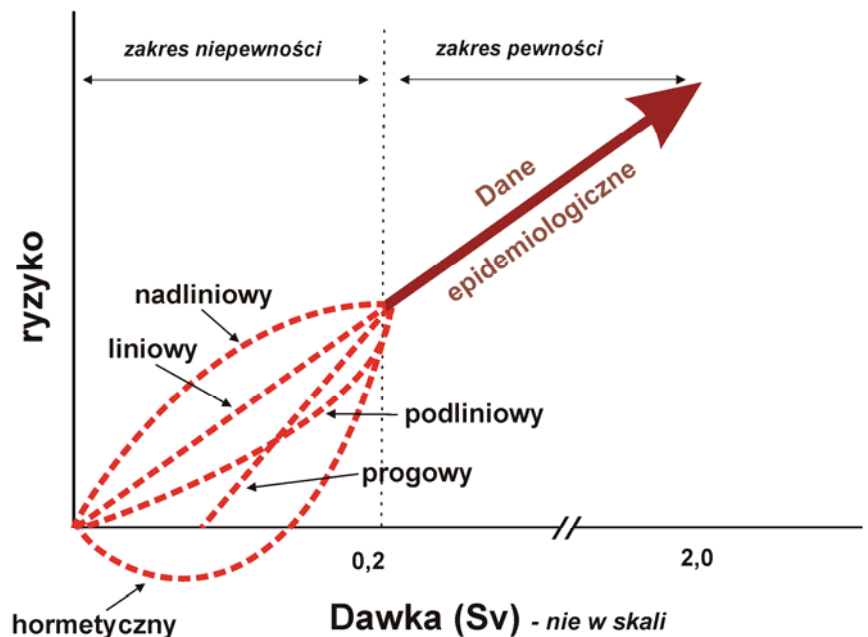
Andrzej Wójcik

Energetyka jądrowa, promieniowanie jonizujące i zdrowie człowieka

Artykuł wstępny do serii artykułów dotyczących problemu działania promieniowania jonizującego na zdrowie człowieka w kontekście energetyki jądrowej

Lęk przed energetyką jądrową jest zjawiskiem powszechnym na całym świecie. Można być przekonanym, że lęk ten jest nieuzasadniony, ale, jak słusznie napisał prof. Hrynkiwicz w książce „Energia - wyzwanie XXI wieku” (Hrynkiwicz 2002) nie należy mu się dziwić, ponieważ wynika on z naturalnej obawy przed rzeczami złożonymi, nad którymi przeciętny obywatel nie ma kontroli. Dodatkowo, energetyka jądrowa kojarzy się z promieniowaniem jonizującym, które bez wątpienia może być niebezpieczne dla zdrowia i wymaga zachowania ostrożności. Jedynym sposobem na przełamanie lęku jest informowanie. Informacja i edukacja musi być pełna i rzetelna, ponieważ wtedy jej odbiorca nie tylko będzie w stanie wyrobić swoje własne zdanie, ale nabierze również zaufania do źródła informacji. Zaufanie to jest podstawą budowania kapitału społecznego, który w społeczeństwach demokratycznych, jest niezwykle ważny dla podejmowanie decyzji, na przykład w sprawach związanych z energetyką jądrową. Dlatego, obok korzyści wynikających z wykorzystania energii jądrowej warto pokazać i tłumaczyć również jej zagrożenia dla zdrowia i środowiska, nawet jeśli przy poprawnym działaniu elektrowni jądrowej są one znikomo małe. Celem takiego działania nie jest niepotrzebne straszenie, lecz wręcz przeciwnie – pokazanie, że zagrożenia są rozpoznane i kontrolowane. Nowoczesna medycyna nie może się obejść bez promieniowania jonizującego. Wykorzystywane jest ono przed wszystkim dla celów diagnostycznych, ale też dla celów terapeutycznych. O tym nikogo nie trzeba przekonywać. Mniej osób zdaje sobie sprawę z szerokiego wykorzystania promieniowania jonizującego

w przemyśle, gdzie służy ono nie tylko dla celów diagnostycznych surowców i produktów, lecz jest wykorzystywane przy produkcji, przede wszystkim tworzyw sztucznych. W energetyce jądrowej promieniowanie jonizujące wydaje się być niejako produktem ubocznym, które jest raczej źródłem kosztów niż zysku. Jednak wiele izotopów, będących produktami procesu rozszczepienia uranu, jest



Modele zależności dawka-efekt dla ryzyka chorób nowotworowych i zmian genetycznych w zakresie dawek promieniowania jonizującego, gdzie wyniki badań epidemiologicznych nie pozwalają na jednoznaczne określenie poziomu ryzyka (zakres niepewności). Poziom ryzyka jest dobrze określony w zakresie dawek powyżej 200 mSv (zakres pewności).

niezbędnym elementem procedur medycznych oraz technologii przemysłowych i naukowych. Promieniowanie powstające w elektrowniach jądrowych nie jest więc tylko uciążliwym efektem ubocznym. O tym też należy pamiętać i informować. Narażenie człowieka na promieniowanie jonizujące wiąże się z ryzykiem dla zdrowia. To wiemy. Ale o jakiego typu ryzyku mówimy? Jak jest ono duże, szczególnie w porównaniu z zagrożeniami wynikającymi z innych technologii przemysłowych? Czy efekty dla zdrowia są takie same po działaniu pro-

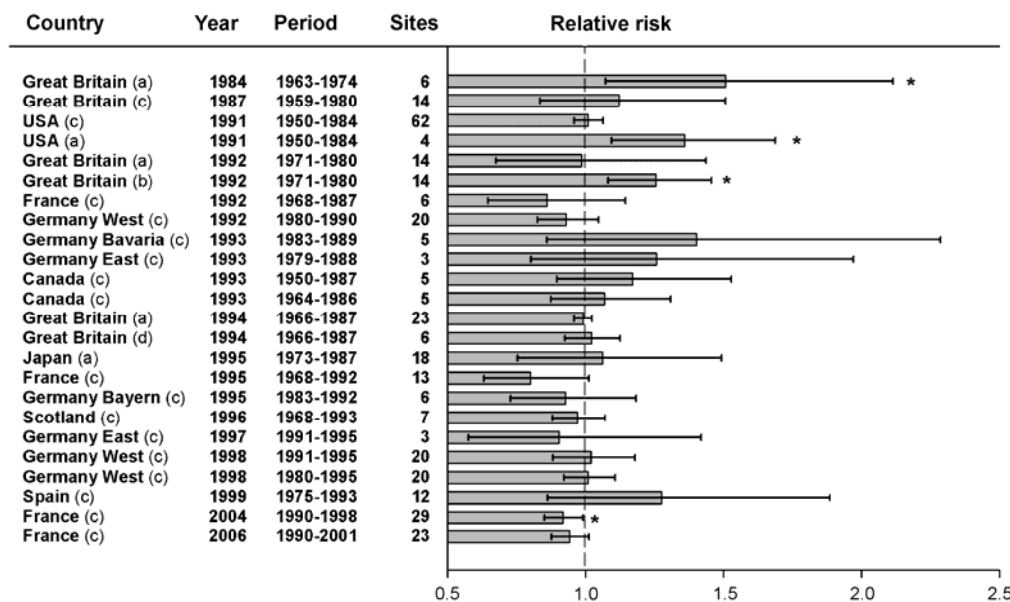
mieniowania w zakresie niskich i wysokich dawek promieniowania? Co to jest wysoka i niska dawka promieniowania? Czy promieniowanie sztuczne działa na organizm tak samo jak promieniowanie naturalne? Na jakie dawki promieniowania narażeni są ludzie mieszkający w okolicy elektrowni jądrowych, a na jakie ludzie mieszkający na terenach o wysokim, naturalnym tle promieniowania? Jaki wpływ ma promieniowanie na środowisko? Te i inne pytania będą przedmiotem serii artykułów, które ukażą się w ramach niniejszego czasopisma. Ich celem będzie informowanie społeczeństwa o tym co wiemy i czego nie wiemy na temat działania promieniowania jonizującego oraz o zaletach i zagrożeniach wynikających z eksploatacji energii jądrowej.

Chociaż promieniowanie jonizujące znane jest od ponad 110 lat, wiele aspektów jego działania na organizm nadal jest przedmiotem badań. Dotyczy to przede wszystkim oceny poziomu ryzyka narażenia na niskie dawki promieniowania, na przykład na poziomie zawodowym. Krótco po odkryciu promieniowania wydawało się, że podobnie jak dla wielu czynników chemicznych, istnieje próg dawki, poniżej którego promieniowania jonizujące nie szkodzi zdrowiu. Uważano nawet, że niskie dawki promieniowania mają działanie pozytywne dla zdrowia. Namawiano ludzi do picia wody radioaktywnej wierząc, że ma ona działanie stymulujące dla procesów biochemicznych. Wiara w pozytywne, tzw. hormetyczne działanie promieniowania przetrwała do dziś, podsycana wynikami badań eksperymentalnych, rzeczywiście wskazujących na stymulację mechanizmów obronnych komórek i organizmów przez niskie dawki promieniowania (Wójcik 2003, Wójcik i wsp. 2006). Równocześnie istnieją dane wskazujące nie tylko na brak progu, ale wręcz na groźniejsze od oczekiwanego działanie niskich dawek promieniowania. W sytuacji, kiedy wyniki badań naukowych są sprzeczne i nie pozwalają na dokładne określenie poziomu ryzyka (Brenner i wsp. 2003), najbardziej rozsądnym rozwiązaniem jest ekstrapolacja ryzyka z zakresu wysokich dawek promieniowania, gdzie skutki promieniowania są dobrze znane (rycina 1). Na tej zasadzie opiera się, przyjęta we wszystkich krajach, filozofia ochrony radiologicznej. Czy jest ona słuszna? Badania prowadzone są dalej. W 2010 roku ruszył duży projekt finansowany przez Unię Europejską, którego celem jest nie tylko analiza biologicznego działania niskich dawek promieniowania, ale też koordynacja przyszłych badań w krajach

Unii (www.doremi-noe.net).

Problemowi oceny ryzyka niskich dawek promieniowania poświęcony będzie odrębny artykuł.

Innym tematem budzącym wiele emocji są białaczki dziecięce występujące ze zwiększoną częstością w okolicach niektórych elektrowni jądrowych (rycina 2). Wiadomo, że nie wynikają one z narażenia na promieniowanie, bo narażenie to jest na poziomie naturalnym. Więc co jest przyczyną? Czy wzrost zapadalności na białaczki dziecięce obserwuje się też w okolicy innych obiektów



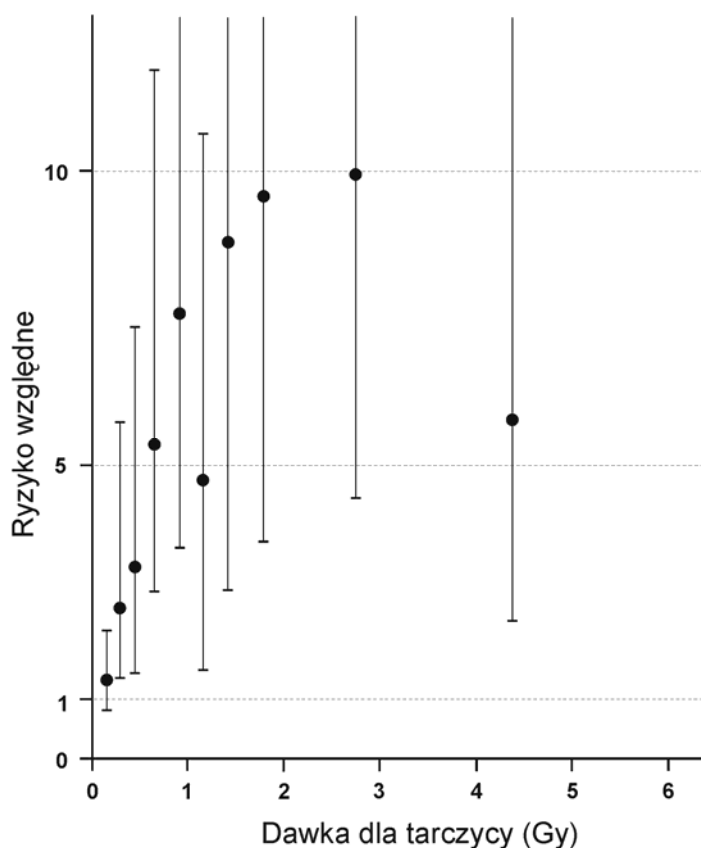
Badania ryzyka białaczek dziecięcych w okolicy elektrowni jądrowych i jednostkach przemysłu jądrowego. Słupki błędów oznaczają 95% przedziały ufności. a: elektrownie jądrowe (EJ); b: inne jednostki, c: EJ i inne jednostki; d: planowane EJ; *: poziom ryzyka znacząco różny od 1. Year: rok publikacji; Period: okres obserwacji; Sites: liczba badanych obiektów; Relative risk: poziom ryzyka względnego.

Na podstawie Laurier i wsp. 2008

przemysłowych? Po publikacji dużego badania epidemiologicznego w Niemczech w 2008 roku (Kaatsch i WSP. 2008), które wykazało podwyższoną zapadalność na białaczki wokół niemieckich elektrowni jądrowych, wiele krajów europejskich prowadzi obecnie podobne badania. Ich wynikiem, oraz hipotezom tłumaczącym występowanie białaczek dziecięcych w okolicy elektrowni jądrowych również poświęcimy specjalny artykuł.

Przy poprawnym funkcjonowaniu, ani elektrownie jądrowe, ani instalacje przerabiające paliwo nie są źródłem promieniotwórczości lub promieniowania przedostającego się do środowiska powyżej ilości wydzielanych przez źródła naturalne lub inne obiekty przemysłowe. Zdarzają się jednak awarie, których skutkiem jest narażenie ludzi na dawki promieniowania przekraczające dopuszczalne limity dawek. Co się wtedy dzieje z ofiarami wypadków? Jak ocenić dawki, na które byli narażeni? Co można zrobić, gdy dojdzie do wchłonięcia izotopów promieniotwórczych? A co gdy doszło do narażenia na dawki zewnętrzne? I, co najważniejsze – co zrobić, żeby unikać wypadków radiacyjnych?

W tym roku mija 25 lat od katastrofy czarnobylskiej. Takie rocznice zawsze skłaniają do refleksji i podsumowania tego, co wiemy o przyczynach i skutkach. Przyczyny awarii są dobrze znane, natomiast skutki – mniej. Problem polega między innymi na tym, że karcenogenne efekty promieniowania, których



Ryzyko względne nowotworów tarczycy u osób narażonych w wieku 0-18 lat na jod w wyniku katastrofy czarnobylskiej, jako funkcja dawki dla tarczycy. Słupki błędów symbolizują 95% korytarz ufności. Na podstawie WHO 2005.

się tu najbardziej obawiamy, pojawiają się z dużym opóźnieniem czasowym. Z wyników badań nad ofiarami, które przeżyły wybuchy bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki wiemy, że tzw. czas utajenia dla białaczek to około 10 lat. Dlatego nie należy oczekiwać wzrostu zapadalności na tego typu choroby nowotworowe. Inaczej sprawa wygląda dla tzw. nowotworów litych, gdzie czas utajenia to 20-30 lat, a ryzyko choroby wzrasta w sposób ciągły wraz z wiekiem. Z raportu WHO opublikowanego w 2005 roku (WHO 2005) wynika, że w ostatnich latach pojawił się trend wzrostu nowotworów piersi wśród kobiet mieszkających na terenach o podwyższonym skażeniu. Czy ten trend się utrzymał? Poza tym, czy dalej obserwuje się na Białorusi i Ukrainie wzrost zapadalności na nowotwory tarczycy u osób narażonych na jod w wieku dziecięcym (rycina 3)? Niedawno ukazał się opóźniony raport UNSCEAR na temat skutków Czarnobyla (UNSCEAR 2008). Jest też szereg nowych publikacji opisujących najnowsze wyniki badań epidemiologicznych. Oddzielny artykuł będzie poświęcony tej tematyce. Stosunkowo nowym zagadnieniem w dziedzinie badań radiacyjnych jest wpływ promieniowania jonizującego na środowisko (www.icrp.org – patrz „committee 5”). Celem badań jest między innymi określenie tzw. względnej skuteczności biologicznej promieniowania dla zwierząt i roślin (czy jest ona taka sama jak dla człowieka?) oraz próba ustalenia dawki dla zwierząt i roślin na jednostkę czasu dla nuklidów przebywających w środowisku. Inaczej niż w przypadku zasad ochrony radiologicznej dla czło-

wieka, gdzie podstawowym celem jest ochrona jednostki, system ochrony radiologicznej środowiska stara się chronić gatunek. Jak promieniowanie jonizujące wpływa na środowisko? Czy istnieje próg dawki, poniżej którego nie obserwuje się żadnych efektów?

Na te i inne pytania postaramy się odpowiedzieć w kolejnych numerach czasopisma.

Piśmiennictwo

Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, Lubin JH, Preston DL, Preston RJ, Puskin JS, Ron E, Sachs RS, Samet JM, Setlow RB, Zaider M. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 100: 13761–13766, 2003.

Hrynkiewicz A. Energia: wyzwanie XXI wieku. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 2002.

Kaatsch P, Spix C, Schulze-Rath R, Schmiedel S, Blettner M. Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. International Journal of Cancer 122:721-726, 2008.

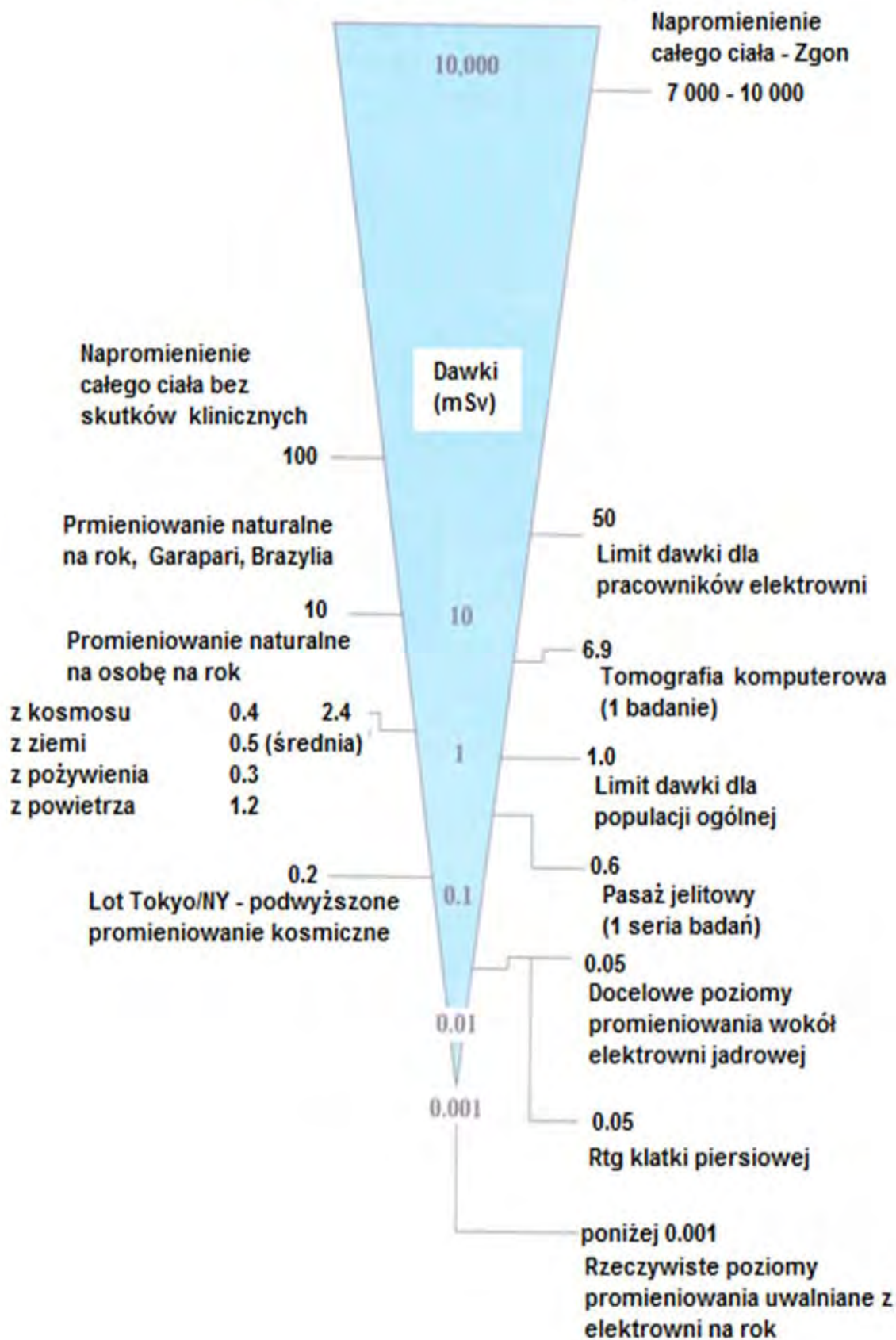
Laurier D, Jacob S, Bernier MO, Leuraud K, Metz C, Samson E, and Laloi P. Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review. Radiation Protection Dosimetry 132:182-190, 2008.

WHO 2005. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH). World Health Organization, 2005.

Wójcik A, Szumiel I, Liniński J. Hormeza: czy jest to zjawisko powszechne i powszechnie nieznanne? Postępy Techniki Jądrowej 49 (2): 34-39, 2006.

Wójcik A. Radon, rad i zdrowie – historia bez końca. Postępy Techniki Jądrowej, 46(4):17-21, 2003

Dawki promieniowania i ich oddziaływanie



Za: "Report of United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation 2000", "ICRP Pub 103" etc

Krzysztof Wojciech Fornalski

Narażenie pracowników przemysłu jądrowego na promieniowanie jonizujące.

Streszczenie

Pracownicy przemysłu jądrowego, w szczególności operatorzy elektrowni jądrowych, są grupą zawodowo narażoną na promieniowanie jonizujące. Na przykładzie wybranych wyników przedstawiono jakie jest ryzyko zachorowalności i umieralności na choroby nowotworowe wśród tej grupy.

Wstęp

Wpływ promieniowania jonizującego na organizmy żywe stanowi temat intensywnych badań od wielu lat [1]. O ile wyniki prezentujące liniowy wzrost ryzyka zachorowania na nowotwór wraz z dawką są bezsprzeczne dla dużych dawek, o tyle dla dawek małych sprawa zdaje się wyglądać inaczej [1][2]. Wielu badaczy postuluje istnienie progu dawki, poniżej którego promieniowanie nie jest w ogóle szkodliwe dla zdrowia lub nawet może przynosić pozytywne efekty [3].

W przypadku pracowników przemysłu jądrowego mówi się w zasadzie o dawkach niskich [4], które można ogólnie zdefiniować, jako dawki nieprzekraczające 150 mSv rocznie [1][5][6]. Mowa tu oczywiście o chronicznym narażeniu na promieniowanie przy niskich mocach dawek.

Praktycznie wszystkie publikacje naukowe z tej dziedziny pokazują brak wzrostu zachorowalności bądź śmiertelności na nowotwory wśród pracowników przemysłu jądrowego narażonych na niskie dawki promieniowania.

Ryzyko nowotworowe

Aby zbadać wpływ promieniowania jonizującego na pracowników przemysłu jądrowego używa się dwóch grup. Tak zwana grupa (bądź kohorta) narażona składa się z tych osób, które są poddane badaniu, czyli są narażone na promieniowanie. Mogą to być osoby ogólnie objęte kontrolą dozymetryczną, bądź osoby, które mają zarejestrowane niezerowe dawki na swoich dozymetrach osobistych. Drugą grupą jest tzw. grupa kontrolna, czyli osoby, które nie są narażone na promieniowanie. Stosuje się tutaj dwie techniki: porównanie z grupą wewnętrzną (pracowników tego samego zakładu), bądź grupą zewnętrzną (porównanie z mieszkańcami okolicznych terenów bądź nawet średnią krajową). Różnice między oboma technikami zostaną opisane dalej.

Gdy mamy już grupę narażoną i grupę kontrolną, porównujemy jedną z drugą. W ten sposób otrzymujemy współczynnik mówiący o potencjalnym wzroście ryzyka (gdy współczynnik jest większy od jedności) lub jego spadku. W sytuacji, gdy współczynnik jest równy 1, grupa narażona nie różni się od grupy kontrolnej. Oczywiście aby wynik był znaczący statystycznie, obie grupy muszą być odpowiednio liczne, przynajmniej kilka tysięcy osób. Ponadto należy zwrócić uwagę na to, co jest mierzone: czy zachorowalności na nowotwory, czy jedynie śmierci nowotworowe. Te drugie są o tyle mylące, gdyż wraz z postępem medycyny wyleczalność się zwiększa. Niemniej jednak nie zawsze w rejestrach medycznych uwzględnia się zachorowalności, natomiast śmiertelności – praktycznie zawsze.

Tego typu badania kohort pracowniczych prowadzone są na całym świecie od wielu lat [1][3]. W Tabeli 1 zaprezentowano zestawione wyniki badań dla kilku wybranych grup [7]. Wyniki przedstawione są w postaci standardowych wskaźników umieralności SMR (ang. *Standard Mortality Ratio*), którego średnia wartość dla wszystkich analizowanych przypadków wynosi $(67 \pm 13) \%$. Wynik ten pokazuje spadek umieralności nowotworowej wśród pracowników przemysłu jądrowego aż o $\sim 33\%$. Grupą kontrolną byli pracownicy tych samych zakładów nie narażeni na promieniowanie jonizujące.

Tabela 1. Przykładowe wskaźniki umieralności nowotworowych dla pracowników przemysłu jądrowego wybranych zakładów na świecie [3][7].

Kohorta	Liczba pracowników	Liczba zgonów na 1000 osób		SMR*
		Pracownicy narażeni	Pracownicy nie-narażeni (grupa kontrolna)	
Stoczniovcy	72 356	9.8	13.4	0.73 ± 0.04
Hanford Oak Ridge Rocky Flats	44 100 8 318 6 897	20.8	34.8	0.60 ± 0.04
Los Alamos	14 280	17.7	20.5	0.86 ± 0.08
Kanada	8 944	20.3	23.7	0.86 ± 0.11
Wielka Brytania **	95 217	2.8	9.9	0.28 ± 0.03
średnia				0.67 ± 0.13

* SMR (*Standard Mortality Ratio*) – standardowy współczynnik umieralności; wynik dzielenia liczby zgonów wśród osób narażonych do liczby zgonów z grupy kontrolnej

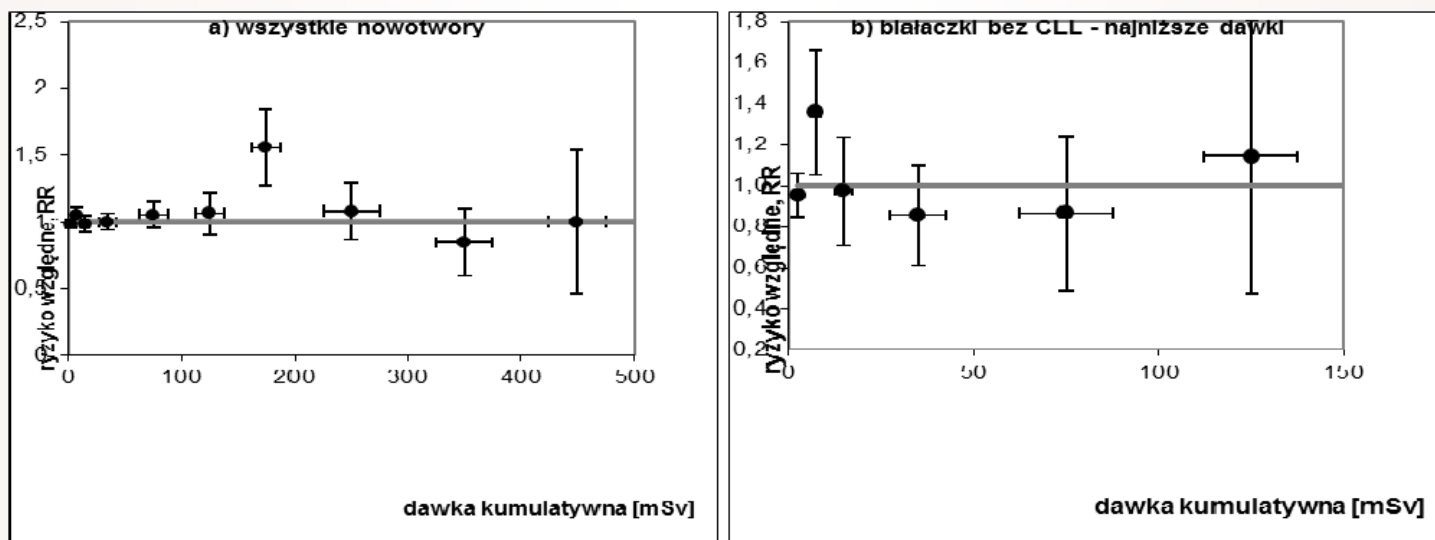
** wynik SMR=0,28 wydaje się mało wiarygodny

Pracownicy z 15 krajów

Jak dotąd najliczniejszą analizowaną grupą byli pracownicy przemysłu jądrowego z 15 różnych krajów świata. W 2007 roku grupa badaczy z Międzynarodowego Instytutu Badań nad Nowotworami (IARC) przeanalizowała dane dotyczące śmiertelności wśród około 600 000 pracowników z 19 różnych zakładów bądź instytutów [8]. Z powodów formalnych i statystycznych rzeczywistej analizie poddano jedynie 400 000 osób, z czego tylko 24 000 weszło ostatecznie do analizowanej kohorty (z racji zgonów). Widać, iż z olbrzymiej liczby 600 000 przypadków końcowe wnioski bazują jedynie na 24 000 osobach, co niestety rzutuje na większe niepewności otrzymanych wyników. Publikacje IARC były szeroko komentowane i reanalizowane w wielu publikacjach naukowych [7][9], także w Polsce [10][11].

Dane z 19 zakładów jądrowych z 15 różnych krajów świata analizowano na dwa różne sposoby. W pierwszym przypadku spośród 24 000 zmarłych pracowników wyodrębniono grupę kontrolną i grupę narażoną, przy czym nie są ściśle określone kryteria na podstawie których zrobiono rozdział. W dalszej kolejności grupę narażoną podzielono na odpowiednie kategorie z racji otrzymanych dawek całkowitych, po czym analizowano tzw. ryzyko względne (RR, ang. *relative risk*) śmierci nowotworowej w zależności od dawki w odniesieniu do grupy kontrolnej. Wyniki zobrazowano na Rys. 1 [12].

Rysunek 1. Ryzyko względne (RR) w zależności od dawki skumulowanej a) dla wszystkich typów nowotworów (dane powyżej 500 mSv zostały pominięte ze względu na pojedyncze przypadki i niską wiarygodność statystyczną) b) dla białaczek bez CLL w przedziale dla najniższych dawek. Na podstawie [8][12].



Analizując Rysunek 1a w obszarze niskich dawek łatwo dojść do wniosku, iż hipoteza o liniowym wzroście ryzyka wraz z dawką opiera się tylko na jednym punkcie doświadczalnym (dla ok. 175 mSv). Powyżej 500 mSv zanotowano pojedyncze przypadki zgonów, co jest niewystarczające do postawienia jakichkolwiek znaczących statystycznie wniosków.

Pojedynczy pik dla 175 mSv pojawia się prawie we wszystkich trendach zależnych od dawki w publikacjach IARC [8]: zgonach ze wszystkich przyczyn, zgonach nowotworowych, białaczkach, rakach stałych, śmierci nienowotworowych (!!!) etc. W związku z powyższym oraz tym, iż dane dla dawek większych leżą na prostej $RR=1$, można wysnuć przypuszczenie, iż lokalne ekstremum dla 175 mSv może być spowodowane błędem grubym przy analizie danych. Niemniej jednak ograniczając się do dawek niskich (do 150 mSv) można z całą pewnością stwierdzić, iż dane IARC pokazują brak zależności między otrzymaną dawką a ryzykiem śmierci nowotworowej.

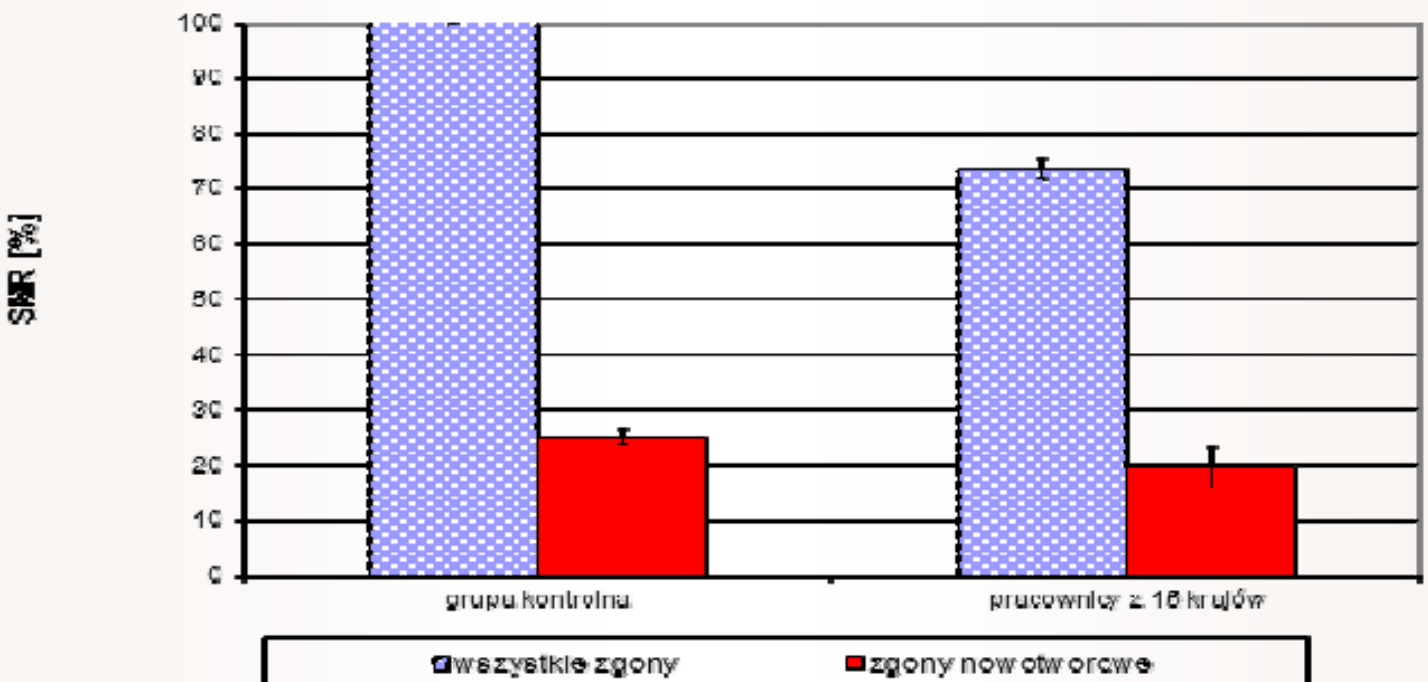
Osobnego komentarza wymaga Rysunek 1b, na którym pokazano ryzyko względne śmierci na pewną odmianę białaczki [8] w zależności od dawki (do 150 mSv). Podobnie jak w przypadku Rys. 1a, także tutaj zaobserwować można znaczący wzrost ryzyka scharakteryzowany przez jeden punkt pomiarowy (tutaj dla 7,5 mSv). Co ciekawe, analogicznie jak w Rys. 1a, ten pik jest powtarzalny także w innych zależnościach. Przyjmując nawet poprawność otrzymanych wyników nie sposób zauważyć, iż o tak gwałtownym wzroście umieralności nowotworowej (blisko 40% dla 7,5 mSv!) nie może być mowy. Jest to nawet sprzeczne z najbardziej rygorystycznymi przepisami ochrony radiologicznej.

Jak więc wytłumaczyć U-kształtny trend z Rysunku 1b? Odpowiedzi może być wiele: od błędu grubego, niedoszacowania niepewności, po hormetyczny charakter zależności ryzyka względnego od dawki [3]. Na razie każda z tych hipotez może być co najwyżej domysłem.

Dane z 15 krajów opracowane przez IARC zostały zaprezentowane także w formie standardowych wskaźników umieralności (SMR), gdzie grupy narażone składały się z pracowników poszczególnych 19 zakładów, a grupy kontrolne stanowiły dane z lokalnego rejestru krajowego [8]. Niestety wyniki posiadają olbrzymi rozrzut – wartości SMR dla nowotworów wahają się między 40% a 85%, a maksymalna dawka wyniosła 5,3 mSv na rok. Jedynym rozsądnym rozwiązaniem z punktu widzenia statystycznej analizy danych [9] jest znalezienie średniej wartości. I tak dla ryzyka śmierci nowotworowej wskaźnik SMR wyniósł $(74 \pm 13) \%$, co daje spadek umieralności na nowotwory o ok. 26% w stosunku do umieralności z ogółu populacji [7]. Wynik ten jest podobny do średniej z Tabeli 1.

Analizując umieralność nowotworową SMR w stosunku do umieralności ze wszystkich przyczyn otrzymujemy $SMR=19\%$ (dla populacji ogólnej $SMR \approx 25\%$), co przedstawiono na Rysunku 2.

Rysunek 2. Porównanie bezwzględnej umieralności w grupie narażonej z 15 krajów (słupki z prawej) z grupą kontrolną z populacji zewnętrznej (słupki z lewej). Na podstawie [8][7].

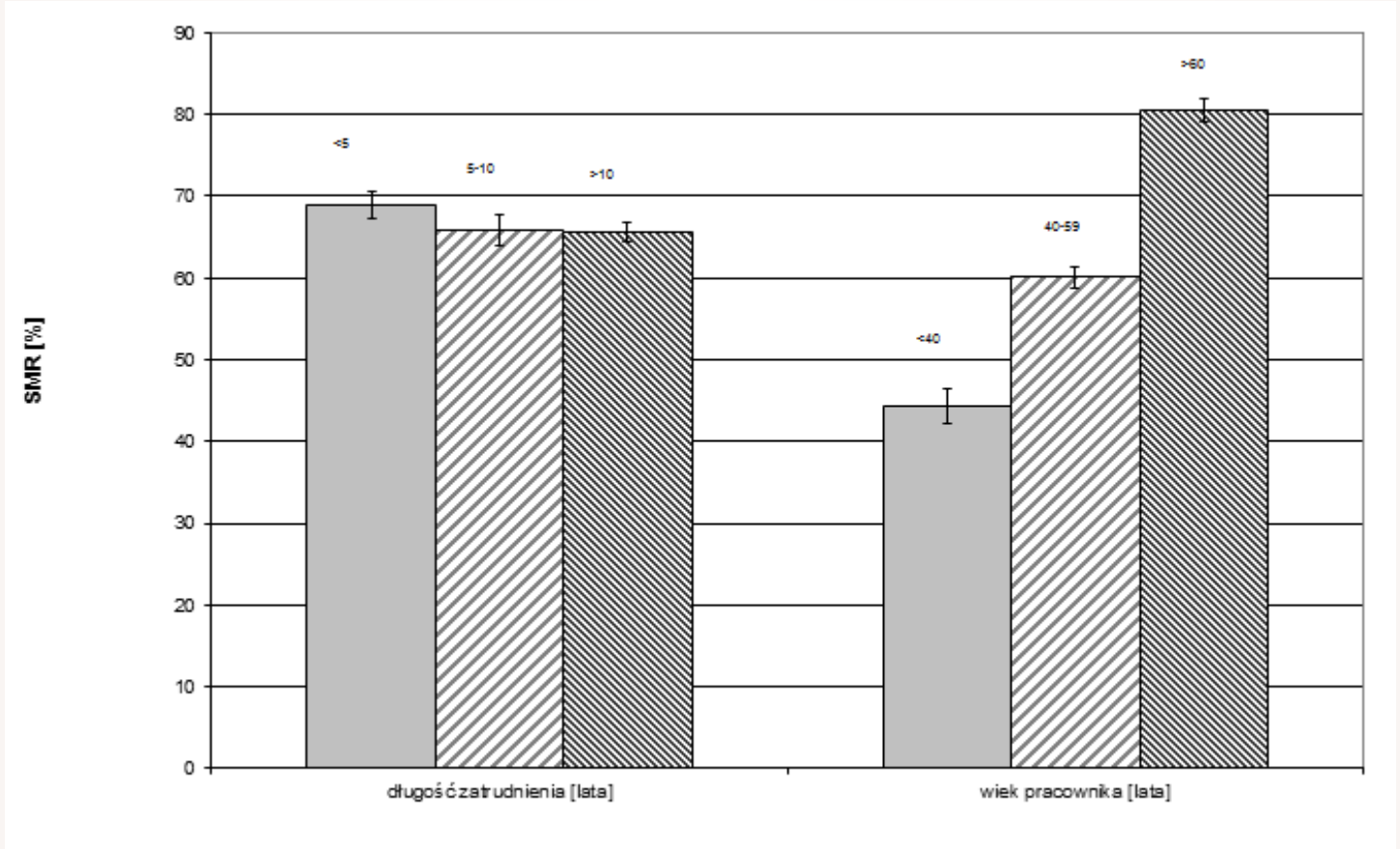


Kolejne ważne informacje o umiERALNOŚCIACH nowotworowych można znaleźć analizując wskaźniki SMR w zależności od wieku pracownika oraz długości zatrudnienia (Rysunek 3). Okazuje się, iż wraz z wiekiem ryzyko śmierci nowotworowej rośnie, co odpowiada naturalnemu trendowi biologicznemu. Z

tłumaczony jest tzw. efektem zdrowego pracownika.

Efekt zdrowego pracownika

Efekt zdrowego pracownika (w skrócie HWE, ang. *healthy worker effect*) został wprowadzony około 40 lat temu jako anomalia statystyczna, aby wyjaśnić



Rysunek 3. Standardowy wskaźnik umieralności SMR w zależności od długości zatrudnienia (lewy) oraz średniego wieku pracownika (prawy). Przedziały nad wykresami podane w latach. Wartości SMR podane, jako średnie ważone. Na podstawie [8][7].

kolei wartości SMR prawie się nie zmieniają w zależności od ilości przepracowanych lat. To pokazuje, iż promieniowanie jonizujące nie zwiększa ryzyka zgonu nowotworowego wraz ze stażem pracy [9].

Dane IARC [8] stanowią dobrze udokumentowane studium przypadków śmierci nowotworowych wśród pracowników przemysłu jądrowego. Analizować je można na dwa sposoby: jako ryzyko względem populacji wewnętrznej (RR), oraz jako ryzyko względem populacji zewnętrznej (SMR). W pierwszym przypadku widać, iż dla niskich dawek $RR=1$, czyli brak jest wzrostu ryzyka śmierci nowotworowej. W przypadku analizy bazującej na grupie kontrolnej z zewnątrz, ryzyko wydaje się być mniejsze od średniego i również nie zależy od dawki. W wielu publikacjach taki znaczny spadek wartości SMR

spadek zachorowalności wśród kohort pracowniczych [12][13]. Używa się go w sytuacji, gdy brak jest jakiegokolwiek innego racjonalnego wyjaśnienia spadku wartości SMR. Niestety tego typu rozumowanie rodzi podejrzenie o manipulowanie danymi [14].

Podstawowym założeniem HWE jest fakt, iż do pracy przyjmowani są ludzie zdrowi, a eliminowani chorzy już na wstępnym etapie selekcji. Dzięki temu ogół pracowników cieszy się średnio dużo lepszym zdrowiem niż populacja zewnętrzna. Efekt ten jest bez wątpienia obecny i spójny logicznie. Nie istnieje jednoznaczna wartość spadku SMR, w różnych publikacjach spotyka się wartości od 5% do nawet 50% [13][14][15][16]. Czy za mniejsze wartości SMR wśród pracowników przemysłu jądrowego nie jest odpowiedzialne hipotetyczne pozytywne działanie promieniowania, lecz właśnie HWE?

Przed wszystkim efekt zdrowego pracownika HWE może zaistnieć tylko w przypadku porównania grupy narażonej z zewnętrzną, pozapracowniczą, grupą kontrolną. W przypadku Tabeli 1 grupa kontrolna była dobrana wśród pracowników tych samych zakładów, więc z definicji o HWE mowy w tym przypadku być nie może.

Po drugie HWE zakłada, iż wartości SMR powinny się zmieniać w zależności od lat pracy. Związane jest to z odchodzeniem z pracy ludzi chorowitych, a także możliwością zrównania się wartości SMR po długim czasie pracy. W przypadku pracowników z 15 krajów wartości SMR są praktycznie niezależne od czasu zatrudnienia, co pokazał Rysunek 3.

Po trzecie HWE występuje w sytuacji, gdy dane schorzenie jest wykrywalne klasycznym wywiadem medycznym, bądź też jawnie doskwiera kandydatowi do pracy. W przypadku chorób nowotworowych, gdzie ich pojawienie się jest niezauważalne na wczesnym etapie a średni okres inkubacji nowotworu wynosi 10 lat, istnienie HWE jest praktycznie niemożliwe, lub zredukowane do kilku procent przypadków. W czasie badania medycznego kandydatów do pracy pracodawca nie dysponuje zaawansowanymi technikami wykrywania nowotworów, nie robione są badania tomograficzne czy badania krwi na obecność markerów. W związku z tym efekt zdrowego pracownika nie dotyczy chorób nowotworowych, a pod tym głównie kątem są robione badania wpływu promieniowania jonizującego na zdrowie [9][12].

Niestety efekt zdrowego pracownika HWE jest bardzo często podawany jako jedyne i dogmatyczne wytłumaczenie spadku zachorowalności. Co więcej poziom HWE przyjmowany jest *post factum*, czyli odgórnie dobierany do otrzymanego wcześniej wyniku. Przykładowo, gdy otrzymuje się wartość $SMR=70\%$, tłumaczy się to istnieniem HWE na poziomie 30%. Gdy $SMR=80\%$, wówczas stwierdza się, iż HWE na pewno wynosi 20%. Gdy okazuje się, iż $SMR=100\%$, z niewyjaśnionych przyczyn HWE nagle znika. Może więc warto dla SMR większych od 100% wprowadzić efekt niezdrowego pracownika [17], aby ostateczne wyniki przypadkiem nie odbiegały od odgórnych założeń? Niestety w większości prac efekt zdrowego pracownika jest używany jedynie jako niczym nie poparty pewnik, w zależności od tego jaki wynik chcemy otrzymać. Czy tego typu rozumowanie nie jest ślepą ścieżką, drogą do nikąd, lub czymś, co można zakwalifikować, jako „Zombie Science” [18]?

Koncepcja HWE dla nowotworów miałyby jeszcze pewne podstawy do obrony, gdyby wyniki były spójne. W wielu opracowaniach wskazuje się na

olbrzymie rozbieżności w wartościach SMR, nawet uwzględniając takie czynniki jak płeć, wiek, status ekonomiczny i tym podobne [19]. Oscylacje umieralności w przedziale 40% do 110% praktycznie unieumożliwiają postawienie jednoznacznego wniosku, gdyż jedna podgrupa w kohorcie wykazywałaby HWE na poziomie 60% (!), a druga, różniąca się np. tylko płcią, nie wykazywałaby HWE w ogóle.

Dodatkową kwestią jest stwierdzenie Monson'a [15], iż HWE nie można stosować w przypadku badań epidemiologicznych. To śmiałe założenie zdaje się burzyć uproszczony schemat myślenia o efekcie zdrowego pracownika. Reasumując należy stwierdzić, iż wystąpienie HWE dla nowotworów jest praktycznie niemożliwe. Jeśli jednak w jakimś stopniu zjawisko to występuje, jest ono na tyle małe, że nie może służyć, jako jedyne wytłumaczenie znaczącego spadku wartości SMR.

Pracownicy ośrodka jądrowego w Świerku

W perspektywie planów budowy w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej niezwykle ważne są wyniki rodzimych badań na temat wpływu promieniowania na zdrowie ludzi. Największą tego typu kohortą są pracownicy ośrodka jądrowego w Świerku pod Warszawą, który pracuje nieprzerwanie od 1956 roku. Przez ten okres około 5000 osób było objętych indywidualną kontrolą dozymetryczną.

W roku 1984 ówczesny Instytut Badań Jądrowych (IBJ) został podzielony na mniejsze jednostki, z których dwie największe wciąż mieszczą się w Świerku. Są to Instytut Problemów Jądrowych (IPJ) oraz Instytut Energii Atomowej (IEA).

W 2010 roku przeprowadzono gruntowny spis wszystkich otrzymanych dawek przez wszystkie lata narażenia osób poddanych indywidualnej kontroli dozymetrycznej [20]. Spisano około 5000 kart dozymetrycznych pracowników IBJ, IPJ oraz IEA.

W przypadku osób, które pracowały tylko w Instytucie Problemów Jądrowych (po roku 1984), oraz osób, które pracowały w Instytucie Badań Jądrowych a następnie przeszły do IPJ, zanotowano 544 przypadki.

Spośród 544 osób objętych indywidualną kontrolą dozymetryczną IPJ, 61 z nich stanowią kobiety. Ponadto 338 osób nie ma zarejestrowanej żadnej znaczącej dawki. Pozostałe 206 osób otrzymało dawki sumaryczne od 0,1 mSv do 570,5 mSv w ciągu całego okresu pracy. Analizowano okres od 1956 do 2001 roku.

Statystyczny przeciętny pracownik urodził się

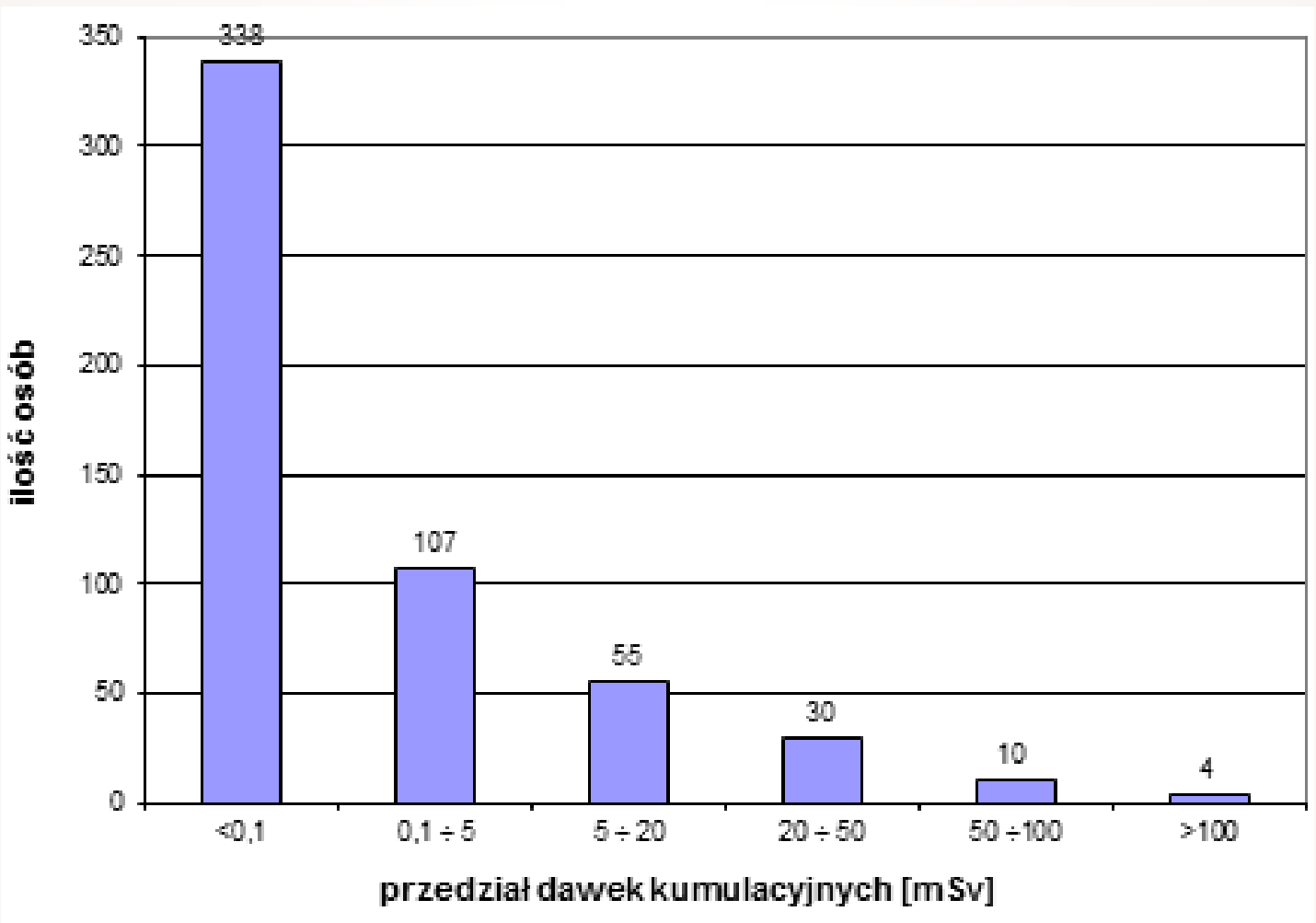
w 1946 roku, miał prowadzoną indywidualną kontrolę dozymetryczną przez 16 lat, a w roku 1975 otrzymał maksymalną zarejestrowaną dawkę równą 8,5 mSv (liczona dla 206 osób, które otrzymały dawki większe do tła). Ponadto pracownicy IPJ przepracowali 8760 osobołat indywidualnej kontroli dozymetrycznej, w przeciągu, której otrzymali sumaryczną dawkę kolektywną równą 3706,7 mSv (w tym 206 osób przepracowało 778 osobołat narażenia większego od tła, średnio 4 lata na osobę).

Rysunek 4 przedstawia rozkład dawek kumulacyjnych dla pracowników IPJ – dla odpowiedniego

przedziału dawek podano liczbę pracowników którzy je otrzymali.

Dane dozymetryczne pracowników IBJ (tylko do 1984 r.) oraz IEA są w trakcie opracowywania. Stanowią one bardzo interesującą kohortę, gdyż jest ich kilkakrotnie więcej niż w przypadku IPJ.

Wszystkie dane dozymetryczne pracowników ośrodka jądrowego w Świerku, wraz z analizą ryzyka zachorowania na nowotwory, zostaną opublikowane najprawdopodobniej pod koniec 2011 roku [20]. Dzięki temu poznamy odpowiedź na pytanie jak wpływa promieniowanie jonizujące na pracowników największego w Polsce zakładu jądrowego.



Rysunek 4. Rozkład dawek dla pracowników Instytutu Problemów Jądrowych w Świerku. Liczby nad słupkami mówią o ilości osób, które otrzymały kumulacyjną dawkę z przedziału podanego na osi poziomej [20].

Literatura:


- [1] Charles L. Sanders, "Radiation Hormesis and the Linear-No-Threshold Assumption", Heidelberg 2010
- [2] B.L. Cohen, "Cancer Risk from Low-Level Radiation", A.J.R. 179 (November 2002)
- [3] T. D. Luckey, "Radiation Hormesis Overview", RSO Magazine 8, p. 22-39, 2008
- [4] doc. inż. Andrzej Strupczewski, „Nie bójmy się energetyki jądrowej!”, 2010
- [5] raport UNSCEAR 2000, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, pp. 1220. United Nations (ONZ)
- [6] Wade Allison, "Radiation and reason", York, 2009
- [7] K.W. Fornalski i L. Dobrzyński, *Ionizing radiation and health of nuclear industry workers*, Int. J. of Low Radiation, vol. 6, no 1, 2009, pp. 57-78
- [8] M. Vrijheid et al., *The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Design, Epidemiological Methods and Descriptive Results*, Rad. Res. 167 (2007) 361-379; oraz I. Thierry-Chef et al., *The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Study of Errors in Dosimetry*, Rad. Res. 167 (2007) 380-395; oraz E. Cardis et al., *The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks*, Rad. Res. 167 (2007) 396-416
- [9] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, 'The healthy worker effect and nuclear industry workers', Dose-Response, vol. 8, no. 2, 2010, pp. 125-147
- [10] A. Wójcik, J. Liniecki, „Ryzyko śmierci nowotworowej wśród pracowników przemysłu jądrowego z terenu 15 krajów”, Postępy Techniki Jądrowej vol. 50/3/2007 r.
- [11] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, 'Pracownicy przemysłu jądrowego a promieniowanie jonizujące', Postępy Techniki Jądrowej, vol. 52, Z.2, 2009
- [12] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, 'Efekt Zdrowego Pracownika w przemyśle jądrowym', Biuletyn PAA Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna, 3 (77), 2009, pp. 46-52
- [13] A.J. McMichael, *Standardized Mortality Ratios and the Healthy Worker Effect: scratching beneath the surface*, J. Occup. Med. 18(3)/1976, p. 165-168
- [14] C.P. Wen et al, *Anatomy of the Healthy Worker Effect: a critical review*, J. of Occup. Med., 25(4)/1983, p. 283-289
- [15] R.R. Monson, *Observations on the healthy worker effect*, J.Occup.Med 28 (1986) 425-433
- [16] C.-Y. Li, F.-C. Sung, *A review of the healthy worker effect in occupational epidemiology*, Occup. Med. 49/4 (1999) 225-229
- [17] A.L. Brooks et al, *Very large amounts of radiation are required to produce cancer*, Dose Response 5: 263-274; 2007
- [18] B.G. Charlton, *Zombie science: A sinister consequence of evaluating scientific theories purely on the basis of enlightened self-interest*, *Medical Hypotheses* 71(2008) issue 3, p. 327-32
- [19] J.M.M. Meijers et al, *Occupational cohort studies : the influence of design characteristics on the healthy worker effect*, Int. J. of Epidemiology, 18(4)/1989, p. 970-975
- [20] K.W. Fornalski, "Statystyka dawek zarejestrowanych w kontroli osobistej pracowników Instytutu Problemów Jądrowych", raport wewnętrzny Działu Szkolenia i Doradztwa IPJ w Świerku (2010 r.); dane dotyczące narażenia wszystkich pracowników ośrodka jądrowego w Świerku (IBJ, IPJ, IEA) zostaną oficjalnie opublikowane pod koniec 2011 roku

mgr inż. Krzysztof Wojciech Fornalski

doktorant w Instytucie Problemów


Jądrowych w Świerku Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

fizyk jądra i cząstek elementarnych



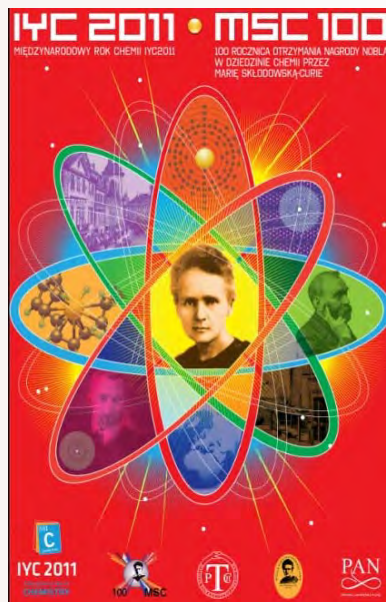
André-Marie
AMPÈRE
1775-1836

Międzynarodowy Dzień Elektryki
Bezpieczeństwo energetyczne
z uwzględnieniem energetyki jądrowej



9 czerwca 2011 r.





Rok 2011 Rokiem Marii Skłodowskiej - Curie

Urodziła się powiadającego się fizyka francuskiego, który po kil-
w Warszawie, przy
wieloletniej znajomości prosi Marię o rękę. To
ul. Freta 16,
dzinę, starzejącego się ojca, a nade wszystko opuścić
dnia 7 listopada 1867 ro-
ku. Matka, Bronisława z
k r a j ...
Za rok, w lipcu 1895 roku, będzie już Madame Curie.

Nie wyrzeknie się jednak nigdy polskich korzeni, pol-
skiego pochodzenia, swojej ojczyzny ani nazwiska.
Będzie podpisywać się francuskim zwyczajem: Mada-
me Pierre Curie, Madame Marie Curie, Madame Curie
-Skłodowska. Na dyplomie noblowskim z roku 1903
kiedy to otrzymała nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki
wraz Piotrem Curie i Henrykiem Becquerellem, figuru-
je jako Marie Curie, ale w roku 1911, kiedy samo-
dzielnie otrzymała nagrodę Nobla w dziedzinie chemii,
dyplom wypisany jest na nazwisko Marie Skłodo-
wska-Curie. Cały czas utrzymuje kontakty z Polską,
przyjeżdża tu wielokrotnie, są to zarówno przyjazdy
związane z pracą, jak i całkiem prywatne, jak np. w
roku 1899 kiedy to przyjeżdża wraz z Piotrem aby po-
kazać mu Warszawę, Zakopane, wchodzą na najwyż-
szy szczyt w polskich Tatrach- Rysy czy w 1911, kie-
dy wędruje po górach z córkami. Tatry są zresztą dla
Marii uosobieniem niezależności, dopiero tu wśród
wysokich szczytów może odetchnąć nieskrępowaną
wolnością, w kraju, który przecież nie istnieje na żad-
nej mapie. Kocha je Maria na tyle, że będzie tu przy-
jeżdżać wielokrotnie, także z córkami, tu właśnie mała
Ewa Curie będzie uczyła się jeździć konno.

uczył fizyki i matematyki w szkołach średnich.
Oprócz najmłodszej Marii państwo Skłodowscy mieli
jeszcze czworo dzieci: Zofię, która zmarła w wieku
kilkunastu lat, Bronisławę (później Dłuską, lekarza,
twórczynię sanatorium dla chorych na gruźlicę w Za-
kopanem), Józefa (lekarza, ordynatora jednego z war-
szawskich szpitali), Helenę później Szalay, nauczy-
cielkę). Od roku 1878 dzieci wychowuje ojciec, po-
nieważ Bronisława umiera na gruźlicę płuc. W rodzi-
nie kultywowane są tradycje patriotyczne, najpierw
romantyczne, potem pozytywistyczne. Młodzi Skło-
dowscy wzrastają wychowywani na poezji A. Mickie-
wicza, J. Słowackiego, Z. Krasińskiego. Potem wzora-
mi ideowymi Marii będą E. Orzeszkowa, B. Prus, A.
Świętochowski oraz pozytywistyczna praca organicz-
na i praca u podstaw. W listopadzie 1891 r. spełniają
się jej marzenia. Wyjeżdża do Paryża i zapisuje się na
wydział matematyczno przyrodniczy Sorbony. Jest
jedną z nielicznych dziewcząt na tym ścisłym kierun-
ku. Mieszka początkowo u siostry Bronisławy i jej
męża Kazimierza Dłuskich. Utrzymują oni bliski kon-
takt z Polakami mieszkającymi w Paryżu, przyjaźnią
się z początkującym wówczas pianistą, późniejszym
wirtuozem i premierem Rzeczypospolitej Polskiej –
Ignacym Janem Paderewskim.

Maria uczestniczy w jego pierwszych paryskich
koncertach, bierze także udział w polskich
przedstawieniach patriotycznych. Od 1892 r.
mieszka i utrzymuje się już samodzielnie. Rok
później kończy studia, otrzymuje licencjat nauk
fizycznych, z oceną „bardzo dobrze”, a za rok
otrzyma licencjat nauk matematycznych, z oce-
ną „dość dobrze”. Jeszcze przed ukończeniem
studiów pracuje dla Towarzystwa Popierania
Przemysłu Krajowego we Francji, wykonując
badania z zakresu magnetyzmu stali.

W roku 1894 poznaje Piotra Curie, świetnie za-

W roku 1897 na świat przychodzi pierwsza córka
uczonych, Irena, która także zostanie naukowcem, a w
1935 roku otrzyma wraz z mężem, Fryderykiem Joliot
Curie, nagrodę Nobla w dziedzinie chemii za odkrycie
zjawiska sztucznej promieniotwórczości. Po siedmiu
latach rodzina powiększy się o kolejną córkę, Ewę;
pianistkę, autorkę biografii matki, korespondentkę
w o j e n n ą .
Państwo Curie pracują razem w laboratorium przero-
bionym ze starej szopy, użyczonym im przez władze

Zapraszamy do Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie

Od czerwca do sierpnia Muzeum otwarte dłużej!

- we wtorki w godzinach 8.30 - 16.30
- od środy do piątku w godzinach 9.30 - 17.00
- w soboty w godzinach 10.00 - 17.30
- w niedziele w godzinach 10.00 - 17.00



Z zasobów Muzeum Marii Skłodowskiej –Curie

**"W jaki sposób Maria Skłodowska-Curie wydzieliła polon i rad z
blendy uranowej?". Odkrycie widziane oczyma chemika:**

Pobierz plik PolonIRadZBlendy.ppt

Szkoły Fizyki i Chemii Przemysłowej, w której pracuje Piotr. Maria wybiera temat pracy doktorskiej, która dotyczy będzie promieniowania uranu badanego wcześniej przez H. Becquerela. W lipcu 1898 r. odkrywają pierwszy pierwiastek promieniotwórczy, nazwany na cześć ojczyzny Marii- polonem, w grudniu zaś informują świat o odkryciu radu. Zaczyna się nowa era, świat oszalał, rad staje się cudownym lekiem, jak informują reklamy przedłuża młodość, zapewnia długie życie. Uczni, którzy nie opatentowali odkrycia, zajmują się dalszym badaniem jego właściwości, próbują otrzymać go w stanie czystym, stoją zupełnie z dala od tego „ radowego szaleństwa” . W 1903 roku Maria broni pracę doktorską, w grudniu zaś małżonkowie Curie i H. Becquerel otrzymują nagrodę Nobla. Maria staje się pierwszą kobietą uhonorowaną tą najwyższą naukową nagrodą.

Do dziś jest jedyną, która posiada dwie nagrody Nobla w dwóch różnych dziedzinach naukowych. Wspólna praca, życie z Piotrem daje Marii ogromną satysfakcję i radość. Niestety 19 kwietnia 1906 roku ginie on w wypadku ulicznym, pozostawiając ją z dwiema małymi córkami. Po chwilach załamania Maria staje na nogi, jest bardziej milcząca, zamyślona, trochę nieobecna, ale pracuje dalej w laboratorium, dba o dzieci. Przejmuje także katedrę po zmarłym mężu stając się pierwszą kobietą wykładającą na Sorbonie, a po dwóch latach w roku 1908 zostanie pierwszą kobietą, profesorem tej szacownej uczelni. W roku 1911 znowu przyjeżdża do Polski, do Zakopanego gdzie zbiera siły po nagonce jaka wybuchła w Paryżu po ujawnieniu jej związku z Paulem Langevinem, w grudniu tego roku jedzie do Sztokholmu po odbiór drugiej nagrody Nobla. Za dwa lata przyjedzie do Polski aby otworzyć pierwszą kraju pracownię radiologiczną, której zostaje dyrektorem, na miejscu placówkę prowadzi jej uczeń prof. L. Wertenstein. W Paryżu Maria buduje Instytut Radowy, nowoczesną placówkę medyczną i badawczą, z prawdziwym, doskonale wyposażonym laboratorium. Wybuch I wojny światowej, ogłoszona zostaje mobilizacja, Maria zdaje sobie sprawę, że musi zamknąć instytut, ukryć rad, co robi osobiście wywożąc go do Bordeaux. Nie może pozostać jednak bierna, to wbrew jej naturze. Dzięki swojemu uporowi zdobywa samochody, wyposaża je w aparaturę rentgenowską i organizuje ruchome stacje rentgenowskie, dostaje się na front, granicę belgijsko- francuską i szkoli personel medyczny, jak robić prześwietlenia. Dzięki jej pracy tysiące żołnierzy przechodzi operacje wyciągnięcia odłamków, nie tracą rąk ani nóg. Praca ta jednak pozostawi w jej organizmie zmiany chorobowe nie do usunięcia. Po

wojnie wraca do Paryża, Instytut Radowy zaczyna działać normalnie, do laboratorium Marii przyjeżdżają stypendyści z całego świata, ona sama dba o to by było wśród nich jak najwięcej Polaków, wspiera w ten sposób naukę polską dźwigającą się po odzyskaniu niepodległości. Reprezentuje sprawę polską w Lidze Narodów, gdzie od 1922 roku zasiada jako przewodnicząca Komisji Współpracy Międzynarodowej. Odbywa liczne podróże zagraniczne, wśród nich dwie bardzo znaczące do Stanów Zjednoczonych w roku 1921, kiedy to przywozi pieniądze na wyposażenie w rad i sprzęt laboratoryjny dla Instytutu Radowego w Paryżu oraz w roku 1929, kiedy zbiera fundusze na wybudowanie i wyposażenie bliźniaczej placówki w Warszawie. Marzy aby Polacy mieli tak nowoczesne laboratorium i szpital, w jakim ona pracuje w Paryżu. Już w 1925 roku marzenie uczonej spełnia się, w czerwcu przyjeżdża do Warszawy i kładzie jedną z pierwszych cegieł pod budowę Instytutu Radowego przy ul. Wawelskiej w Warszawie. Za siedem lat przyjedzie tu znowu, tym razem na uroczyste otwarcie Instytutu, niestety będzie to jej ostatni pobyt w ojczyźnie. W roku 1934 Maria Skłodowska-Curie ma 67 lat, jest schorowana, zmęczona, ale nadal aktywna, pisze kolejną książkę, pracuje w Instytucie Radowym, planuje. Jednak choroba, która w niej tkwi postępuje nieubłaganie, w czerwcu z podejrzeniem choroby płuc jedzie wraz z Ewą do alpejskiego sanatorium w Sancellemoz, tam 4 lipca 1934 roku umiera na białaczkę. Zostaje pochowana w Sceaux pod Paryżem, we wspólnym grobie z mężem. Niezwykle skromnej ceremonii uczestniczy tylko najbliższa rodzina. Uczni spoczywają tam do kwietnia 1995 roku, wtedy ich prochy przeniesiono do paryskiego Panteonu.

Maria Skłodowska-Curie jest pierwszą i jedyną kobietą uhonorowaną w ten sposób za własne zasługi naukowe i jedyną osobą, która spoczywa w Panteonie nie będąc z pochodzenia Francuzką.

Maria Skłodowska-Curie przyjaźniła się z największymi uczonymi tamtych czasów, uczestniczyła jako jedyna kobieta w Konferencjach Solvayowskich; były to spotkania fizyków tej miary co A. Einstein, N. Bohr, E. Rutherford, M. Planck. Po Jej śmierci właśnie A. Einstein, z którym zdarzało Jej się spacerować po Alpach, w pięknym eseju napisał, że była Ona jedynym nie zepsutym przez sławę człowiekiem, spośród tych, których przyszło mu poznać.

Piotr Czerski

Konsultacje społeczne w Wielkiej Brytanii

w sprawie rozwoju energetyki jądrowej

Na podstawie Meeting the Energy Challenge, A White Paper on Nuclear Power, January 2008, Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform (BERR)

Wprowadzenie

Jak rozumieć konsultacje społeczne w sprawie rozwoju energetyki jądrowej? Czy to udostępnianie strony internetowej dla dyskusji a'la Speakers Corner w Hyde Parku? Czy to sondowanie społeczeństwa? Czy to „wmawianie” elektrowni atomowych prowadzone przez wynajętych dziennikarzy w popularnych gazetach? Brytyjska droga była inna. **Postulowany renesans energetyki jądrowej na Wyspach Brytyjskich to przemyślana, przeanalizowana decyzja.** Do przekonania do tej decyzji ministerstwo (BERR) zorganizowało akcję rozmów ze społeczeństwem na zasadzie dialogu - spotkań, wymiany listów. Półroczny okres trwania konsultacji to czas wyjaśniania społeczeństwu wątpliwości i odpowiedzi na stawiane pytania. Na wątpliwości formułowane w trakcie konsultacji, na problemy niepokojące osoby ankietowane opublikowane zostały odpowiedzi. Żadnej wątpliwości nie pominięto, nie pozostawiono bez odpowiedzi. Warto przeanalizować co niepokoiło mieszkańców Zjednoczonego Królestwa i jak z problemem odpowiedzi poradzili **sobie brytyjscy specjaliści.**

W artykule przedstawiono skrót oficjalnego sprawozdania rządu brytyjskiego dla Parlamentu. Problem rozwoju energetyki jądrowej postawiony został w szerokim kontekście m.in. ogólnie polityki energetycznej Wielkiej Brytanii jak i spraw środowiskowych. Dla zaznaczenia stanowiska rządowego, w oryginale angielskim, niemal każde dyskutowane zagadnienie kończy się kwestią: „**rząd brytyjski uważa (w związku z omawianą kwestią), że nie ma powodu, by nie zezwalać przedsiębiorstwom energetycznym na budowę elektrowni atomowych**”. Ilustruje to dobrze intencje prowadzonych konsultacji. W niniejszym artykule, dla większej czytelności, opinie respondentów zaznaczono *kursywą*. Można z nich również wysnuć wnioski co do obszarów szczególnego zainteresowania społeczeństwa brytyjskiego i wykorzystać tę wiedzę w działalności informacyjnej związanej z rozwojem energetyki jądrowej w Polsce.

Czy w Wielkiej Brytanii można nie budować nowych elektrowni atomowych? Odpowiedź twierdząca

prowadzi do poważnych konsekwencji. Ocena takiej sytuacji przeprowadzona przez rząd brytyjski zawarta została na końcu artykułu co zostało zatytułowane „Koszty nierozwijania energetyki jądrowej”. Stanowi to swoiste podsumowanie.

Konsultacje społeczne – odpowiedzi rządu na zgłaszane wątpliwości

Podstawowym dokumentem poddanym konsultacjom społecznym było przygotowywane od 2003 roku przez rząd opracowanie, pt. „Przyszłość energetyki jądrowej, jej rola w niskoemisyjnej gospodarce Wielkiej Brytanii”. Konsultacje trwały od maja do października 2007 roku. W tym okresie otrzymano ponad 4000 opinii związanych z przedstawioną tematyką. **Podjęto następujące działania dla ich przeprowadzenia :**

- ⇒ utworzono interaktywną stronę internetową z materiałami dotyczącymi konsultacji,
- ⇒ przeprowadzono 13 spotkań z przedstawicielami różnych grup interesu ze wszystkich regionów Wielkiej Brytanii,
- ⇒ zorganizowano spotkanie okrągłego stołu, w którym brało udział 20 najważniejszych przedstawicieli zainteresowanych grup społecznych,
- ⇒ przeprowadzono 9 równoległych, całodniowych warsztatów w 9 miastach, w których uczestniczyło blisko 1000 zainteresowanych osób,
- ⇒ zainicjowano przeprowadzenie kampanii informacyjnej na temat programu rozwoju energetyki w prasie, radiu i telewizji.

Cele podjętego dialogu sformułowano następująco:

- ⇒ poddanie szerokiej ocenie społecznej rządowych argumentów przemawiających za rozwojem energetyki jądrowej, a następnie powtórna analiza dokumentu oraz jego korekta,
- ⇒ rozproszenie obaw dotyczących energetyki jądrowej wyrażonych przez uczestników konsultacji,
- ⇒ rozważenie czynników, które nie były brane pod uwagę w trakcie tworzenia dokumentów poddanych konsultacjom.

W efekcie sformułowano odpowiedzi w następujących zakresach tematycznych:

- ⇒ przeciwdziałanie zmianom klimatu
- ⇒ energetyka jądrowa a bezpieczeństwo energetyczne
- ⇒ kwestie ekonomiczne energetyki jądrowej
- ⇒ korzyści posiadania niskoemisyjnych źródeł wytwarzania: energetyki jądrowej i odnawialnych źródeł energii (OZE)
- ⇒ bezpieczeństwo energetyki jądrowej
- ⇒ transport paliwa jądrowego
- ⇒ odpady promieniotwórcze i likwidacja elektrowni jądrowych
- ⇒ energetyka jądrowa a środowisko
- ⇒ zasoby paliwa jądrowego
- ⇒ niezawodność dostaw sprzętu i umiejętności kadry technicznej
- ⇒ przeróbka wypalonego paliwa jądrowego

Rozwinięcie wymienionych tematów stanowi dalszą część artykułu.

Energetyka jądrowa a bezpieczeństwo energetyczne

Zgodnie ze stanowiskiem rządu brytyjskiego, nowe elektrownie jądrowe miałyby przyczynić się do dywersyfikacji źródeł energii, dzięki czemu można by sprostać obecnym i nowym wyzwaniom w energetyce.

Odpowiedziami respondentów na tak postawioną tezę były między innymi propozycje dotyczące *wykorzystania alternatywnych źródeł energii, które stworzyłyby dywersyfikację bez udziału bloków jądrowych*. Propozycje obejmowały *wykorzystanie źródeł odnawialnych, takich jak wiatr, słońce, geotermia, fale morskie, pływy, oraz bez emisyjnych technologii spalania paliw kopalnych (z wychwytem i składowaniem CO₂)*. Pojawiały się również twierdzenia, że *rozwój energetyki jądrowej wcale nie zmniejszy uzależnienia od importowanego gazu, a jedynie zatrzyma rozwój energetyki wiatrowej*.

Rząd brytyjski zgodził się, że wiele nowatorskich sposobów pozyskiwania energii rzeczywiście wpływa korzystnie na poprawę bezpieczeństwa energetycznego. Tym niemniej nie są one właściwym rozwiązaniem dla problemu zaspokojenia potrzeb energetycznych. Problemem pozostaje opłacalność takich inwestycji oraz duży wpływ warunków pogodowych na efektywność wytwarzania w nich energii. Z kolei technologia wychwytu i składowania CO₂ nie jest jeszcze dostępna komercyjnie, przez co stanowi olbrzymie wyzwanie technologiczne. Wiąże się też z ryzykiem, że w rozpatrywanej skali czasowej nie bę-

dzie w stanie sprostać postawionym celom. Stworzenie zdywersyfikowanego systemu wytwórczego zwiększy jego odporność na ryzyko związane z niestabilnością dostaw oraz nagłym wzrostem cen, który jest charakterystyczny dla niezróżnicowanego systemu zależnego od jednego rodzaju paliwa. Rozwój różnych technologii pozwoli zmniejszyć zależność energetyki od jednego nośnika energii.

Zdaniem rządu brytyjskiego za energetyką jądrową przemawia również względnie niska cena produkowanej energii elektrycznej oraz jej nieznaczną wrażliwość (wpływ rzędu 1,5%) na zmiany cen rudy uranowej.

Kwestie ekonomiczne energetyki jądrowej

Rząd Wielkiej Brytanii, biorąc pod uwagę analizy przeprowadzone przez ekonomistów specjalizujących się w zagadnieniach energetyki jądrowej, wskazał na większą opłacalność energetyki jądrowej w porównaniu do energetyki opartej na węglu i gazie (uwzględniając opłaty za emisję ditlenku węgla). By zilustrować korzyści, przytoczono wyniki obliczeń, które wskazały, że zastąpienie elektrowni konwencjonalnych o łącznej mocy elektrycznej 10 GW elektrowniami atomowymi da w ciągu 40 lat ich eksploatacji oszczędności rzędu 15 mld GBP (ok. 75 mld PLN). Obliczenia dokonano przy założeniu, że opłata za emisję ditlenku węgla wynosi 36 EUR za tonę (tj. ok. 126 PLN za tonę).

Podczas konsultacji, ankietowani poparli generalnie poglądy rządowe. Pojawiły się jednak wątpliwości związane z niedoszacowaniem kosztów energetyki jądrowej w stosunku do innych technologii. Sugerowano się doświadczeniami z budowy fińskiej elektrowni jądrowej z reaktorami typu EPR, gdzie zarówno plan robót, jak i pierwotny budżet zostały przekroczone. Poruszono tematy ubezpieczeń i ich wpływ na eskalację kosztów. Sceptycznie odnoszono się do wyliczeń kosztów eksploatacji elektrowni jądrowej, końcowych kosztów jej likwidacji i akumulacji pieniędzy na ten cel. Sugerowano ryzyko nieprzestrzegania tych przepisów, gdy koszty zmuszone będą ponieść prywatne przedsiębiorstwo.

W odpowiedzi na uwagi respondentów, przybliżono zainteresowanym sposób obliczania kosztów wykazując, że przyjęta metodologia jest wystarczająco dokładna, aby wykazać konkurencyjność energetyki jądrowej. Przy obliczaniu kosztów inwestycji przyjęto założenia powszechnie stosowane przy opra-

cowywaniu podobnych analiz ekonomicznych. Na tej podstawie zarzuty o promowaniu w obliczeniach energetyki jądrowej odrzucono jako bezpodstawne.

W analizie ekonomicznej przyjęto kilka wariantów szacowania kosztów elektrowni o mocy 1,6 GW, zależnych od nakładów na jednostkę zainstalowanej mocy elektrycznej. Szacunek dowiódł, że dopiero przy najwyższych kosztach jednostkowych wynoszących 1650 GBP/kW_{el} (8250 PLN/kW_{el}) całkowity koszt budowy wyniósłby 3,6 mld GBP (18 mld PLN), co czyniłoby budowę elektrowni jądrowej w Wielkiej Brytanii wyraźnie droższą niż w Finlandii (w Olkiluoto), gdzie całkowity koszt elektrowni szacowany był na 2,7 mld GBP (13,5 mld PLN). Obliczenia prowadzone przy spodziewanym koszcie budowy wynoszącym 1250 GBP za 1 kW_{el} (6250 PLN/kW_{el}) z uwzględnieniem kosztów obsługi kapitału i przy uwzględnieniu budowy przechowalnika odpadów promieniotwórczych na terenie elektrowni dały sumę 2,8 mld GBP (14 mld PLN).

Specjaliści brytyjscy wskazali, że nie wszędzie w Europie, tak jak w fińskim Olkiluoto, dochodziło do naruszenia terminów i przekroczenia założonych kosztów budowy. Inaczej było np. we Francji i w Rumuni. W związku z tym oszacowane koszty wcale nie musiały być przekroczone.

Według obliczeń firm energetycznych koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosić będą 30 GBP/MWh (150 PLN/MWh).

Tymczasem analizy rządowe wykazały, że ceny energii elektrycznej będą zależały od kosztów oprocentowania kredytu, i wyniosą:

- 31 GBP/MWh (155 PLN/MWh) przy 7%,**
- 38 GBP /MWh (190 PLN/MWh) przy 10%,**
- 42 GBP /MWh (210 PLN/MWh) przy 12%**

Z analiz przeprowadzonych przy założeniu utrzymania opłat za emisję CO₂ wyciągnięto wniosek o bezdyskusyjnej opłacalności inwestowania w energetykę jądrową. Natomiast przy założeniu braku opłat za emisję CO₂ opłacalność osiągnięto tylko w połowie analizowanych scenariuszy ekonomicznych.

Kwestie ubezpieczeniowe związane z energetyką jądrową uregulowane są przez konwencje międzynarodowe. Spodziewane jest dalsze podnoszenie kosztów ubezpieczeń w związku z przyjęciem nowych przepisów związanych z ochroną środowiska oraz na wypadek ewentualnych awarii jądrowych. Polityka rządu brytyjskiego zmierza do tego, by zarówno koszty likwidacji, jak i koszty unieszkodliwiania odpadów były w pełni pokrywane przez właściciela

elektrowni, który byłby zobowiązany do posiadania specjalnego funduszu na te cele (na wypadek upadłości firmy czy też wcześniejszego zamknięcia elektrowni). Wymienione wcześniej analizy ekonomiczne uwzględniły wszystkie te dodatkowe koszty.

W przeprowadzanych analizach nie zakładano ewentualnych kosztów związanych z hipotetycznymi awariami. Ich ryzyko oceniono jako minimalne. Sprawy bezpieczeństwa jądrowego określono jako przyszły przedmiot szczegółowych regulacji prawnych.

Korzyści posiadania niskoemisyjnych źródeł wytwarzania: energetyki jądrowej i odnawialnych źródeł energii (OZE)

Redukcja emisji ditlenku węgla o 60% (do roku 2050) jest możliwa również bez udziału nowych elektrowni jądrowych. Takie podejście nie poprawiłoby jednak bezpieczeństwa energetycznego kraju, a koszty zmniejszenia emisji CO₂ byłyby większe niż dla opcji jądrowej.

W procesie konsultacji respondenci sugerowali jednak, że pieniądze wydawane na energetykę jądrową mogłyby być wykorzystane efektywniej, gdyby przeznaczyć je na edukację społeczeństwa w zakresie oszczędzania energii. Wyrażano wątpliwość, czy posiadanie wielu różnych źródeł energii zwiększy niezawodność jej dostaw. Twierdzono, że inwestycje w odnawialne źródła energii (OZE) oraz rozproszoną kogenerację przyniosą większe korzyści w ograniczeniu emisji CO₂, natomiast energetyka jądrowa odwróci uwagę inwestorów od tych źródeł. Zwrócono uwagę na ograniczony poziom bezpieczeństwa elektrowni jądrowych w przypadku ataków terrorystycznych oraz że takiego zagrożenia nie powodują elektrownie innych typów.

W odpowiedzi na wątpliwości ankietowanych rządowi eksperci zwrócili uwagę na niepewność długoterminowych przewidywań w energetyce. Z tego względu potrzebne są różne źródła energii, w tym elektrownie jądrowe, aby spełnić postawione cele, z myślą o nowych wyzwaniach w dalszej przyszłości. Nowe elektrownie jądrowe nie powinny mieć również wpływu na rozwój technologii alternatywnych. Przedsiębiorstwa energetyczne będą między innymi zobligowane administracyjnie do inwestowania w OZE. Rząd będzie prowadził aktywną politykę wspierania postępu technicznego związanego z rozwojem odnawialnych źródeł energii tak, aby sprostać wyzwaniom zaproponowanym przez Unię Europejską.

Rząd brytyjski zdaje sobie sprawę, że długi okres in-

westycyjny elektrowni jądrowych spowoduje, że do 2020 roku ich wpływ na redukcję emisji CO₂ nie będzie duży, niemniej plany zakładają, że do 2050 roku emisja ma zmniejszyć się do 60% dzisiejszej wartości. Przy takich potrzebach rozwój OZE, energetyki jądrowej i innych technologii redukujących emisję będzie przebiegał równolegle, a inwestowanie w różnorodne źródła energii pozwoli uniknąć ryzyka związanego z małą opłacalnością któregoś z nich. Odnosząc się do argumentacji wskazującej celowość budowy małych lokalnych sieci powiązanych z lokalnymi elektrowniami, rząd stwierdził, że dotychczasowa centralizacja sieci ma również wiele zalet i zmiana tego stanu jest ekonomicznie nieuzasadniona.

Bezpieczeństwo energetyki jądrowej

Mając na względzie ustalenia niezależnych organów odpowiedzialnych za przepisy związane z bezpieczeństwem jądrowym oraz oceniając postęp techniczny w energetyce jądrowej, rząd brytyjski uważa, że ryzyko dla bezpieczeństwa, zdrowia czy zagrożenia wynikające z możliwości rozprzestrzenienia broni jądrowej, spowodowane budową nowych elektrowni jądrowych, jest tak małe, że nie ma powodu, by nie inwestować w tego typu moce wytwórcze.

W trakcie konsultacji wielu respondentów *zgadzało się* z powyższym poglądem. Sprawa bezpieczeństwa energetyki jądrowej wzbudziła szczególne zainteresowanie. Zgłaszano jednak również zastrzeżenia, wskazując na różne incydenty, które w elektrowniach jądrowych miały miejsce. Powątpiewano w rzetelność prywatnych przedsiębiorstw eksploatujących elektrownie i przestrzeganie przez nie przepisów. Zwracano uwagę na niebezpieczeństwa związane z transportem materiałów promieniotwórczych, z przelotem samolotów nad elektrowniami jądrowymi czy zagrożeniem terrorystycznym. Wyrażano obawy związane z zamieszkiwaniem w sąsiedztwie elektrowni, np. z możliwością zachorowania na raka.

Odnosząc się do wątpliwości związanych z incydentalnymi zdarzeniami awaryjnymi rząd uznał, iż trudno porównywać niektóre awarie mające miejsce za granicą z warunkami brytyjskimi. Ponadto urzędy dozoru w Wielkiej Brytanii są przygotowane, by zminimalizować ryzyko szkód ponoszonych przez ludność i środowisko w wyniku nieprawidłowości w pracy instalacji jądrowych. Brytyjski Nadzór Jądrowy jest niezależny w swoich decyzjach i może nakładać dotkliwe sankcje w razie uchybień, a dowodem jego skuteczności jest fakt, że brytyjskie elektrownie ją-

drowe (cywilne) nigdy nie zaszkodziły środowisku naturalnemu. Dla realizacji nowego programu siły Dozoru Jądrowego zostaną wzmocnione. Państwo w sposób wystarczający nadzoruje pracę instalacji jądrowych poprzez szereg instytucji i służb: NII (Nuclear Installations Inspectorate), OCNS (Office for Civil Nuclear Security), HSE (Health and Safety Executive), CNC (Civil Nuclear Police). Dla przeciwdziałania zagrożeniom terrorystycznym (zwłaszcza po ataku z 11 września) powiększono strefy wyłączenia z ruchu lotniczego o tereny wokół elektrowni jądrowych. Poza tym OCNS ściśle współpracuje z Centrum Analitycznym Zagrożenia Terroryzmem. Organy nadzoru sprawdzają między innymi, czy projektanci zanalizowali różne przyczyny ewentualnych zagrożeń pracy elektrowni jądrowych – sejsmicznych, powodzi, uderzeń samolotu. Robione jest to zgodnie z przepisami krajowymi i międzynarodowymi. Czynione jest to od początku projektu, by uniknąć konieczności modernizacji już gotowych konstrukcji. Pracownicy zatrudnieni w przemyśle jądrowym są ze względów bezpieczeństwa, w sposób systematyczny, poddawani procedurom sprawdzającym. Czynią to odpowiednie służby państwowe (National Security Vetting). Mając na uwadze porozumienie o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej, obiekty jądrowe oraz materiały jądrowe nadzorowane są nie tylko przez inspektorów podległych krajowym instytucjom, ale też przez inspektorów zatrudnionych przez IAEA (International Atomic Energy Agency) i EURATOM (**European Atomic Energy Community**). Należy również zauważyć, że paliwo jądrowe nie może być bezpośrednio wykorzystane jako broń jądrowa. Wymaga dla tego celu znacznego przetworzenia.

Komentując zastrzeżenia i obawy związane z zachorowaniami na raka w sąsiedztwie elektrowni jądrowej stwierdzono, że badania brytyjskie nie potwierdzają takiego niebezpieczeństwa. Obecne normy w zakresie ochrony przed promieniowaniem jonizacyjnym określają jako bezpieczne i dopuszczalne (dotyczy to pracowników elektrowni) przyjęcie rocznej dawki w wysokości 20 mSv (milisivertów). Dla okolicznych mieszkańców przyjmuje się dopuszczalną dawkę 1 mSv, co można porównać do średniej, rocznej dawki promieniowania, jaką ze źródeł naturalnych otrzymuje każdy Brytyjczyk (2 mSv).

Transport paliwa jądrowego

W Wielkiej Brytanii prawo skutecznie reguluje kwestie transportu materiałów jądrowych. Nie przewiduje się przerobu wypalonego paliwa, w związku z

czym ryzyko pojawienia się niebezpiecznych incydentów w trakcie transportu jest minimalne.

Ankietowani zwrócili jednak uwagę na zagrożenia związane z przejęciem materiałów jądrowych przez terrorystów w momencie ich przemieszczania. Wyrażano obawy, czy przepisy sprzed wielu lat odpowiadają potrzebom dnia dzisiejszego. Niepokój wzbudził przypadek ujawnienia nieszczelności przy przewożeniu radioizotopów ze szpitala na składowisko w Sellafield.

Zdaniem rządu brytyjskiego przedstawiane przypadki niedociągnięć nie są związane z transportem materiałów radioaktywnych z elektrowni jądrowych, lecz z zakładów przemysłowych. Poza tym nie stwierdzono negatywnych skutków zdrowotnych z tym związanych. Dlatego obawy dotyczące transportu materiałów promieniotwórczych uznano za nieuzasadnione.

Odpady promieniotwórcze i likwidacja elektrowni jądrowych

Rządowa propozycja składowania odpadów głęboko pod ziemią, zyskała zdecydowane poparcie. Nieliczni respondenci zaznaczali jednak, że metoda ta nie likwiduje zupełnie potencjalnego niebezpieczeństwa. Na ogół zgadzano się, by do czasu budowy składowiska, wypalone paliwo przechowywane było na terenie elektrowni. Niekiedy sugerowano, że dotychczasowy brak głębokiego składowiska powinien być powodem do odłożenia w czasie budowy nowych elektrowni jądrowych. Inni respondenci podkreślali dysproporcję między wysokim poziomem technicznym utylizacji odpadów promieniotwórczych a niefrasobliwym traktowaniem innych odpadów cywilizacyjnych. Były też głosy, że lepszym rozwiązaniem byłoby składowanie w monitorowanych magazynach, do których byłby możliwy dostęp. Pewna grupa ankietowanych uważała, że najlepiej byłoby odpady tak przechowywać, aby po pojawieniu się nowych możliwości technologicznych (transmutacja, prędkie reaktory powielające) były one łatwo dostępne. Podnoszono również kwestie ściągalności z prywatnego sektora gospodarki środków finansowych na pokrycie kosztów obsługi składowiska odpadów i likwidacji elektrowni.

Zdaniem rządu, najlepszym rozwiązaniem jest budowa podziemnego składowiska wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych, powiązanego z

przejściowym przechovalnikiem wypalonego paliwa. Składowiska muszą być budowane w sposób przyjazny dla naturalnego środowiska. Zlokalizowanie składowiska w dogodnym miejscu wymaga poparcia lokalnej społeczności; osiągnięcie porozumienia w tej sprawie to 2,5-roku konsultacji. Prowadzenie działań związanych z jego budową powinno mieć charakter planowy. Obecnie eksploatowane składowiska materiałów promieniotwórczych mają charakter tymczasowy i były obliczone na 50 do 100 lat. W nowo projektowanych obiektach czas eksploatacji liczony jest na 100 lat. We wszystkich krajach rozwijających energetykę jądrową korzysta się z tymczasowych składowisk, ale planuje się budowę składowisk stałych, umiejscowionych pod ziemią. W Wielkiej Brytanii przewiduje się, że każdy inwestor będzie odpowiedzialny finansowo za budowę przejściowych składowisk oraz za likwidację elektrowni jądrowej. Zgodnie z prawem energetycznym będzie to kontrolowane przez odpowiednie instytucje państwowe.

Czy etyczne jest pozostawienie przyszłym pokoleniom problemu zmagazynowanych odpadów promieniotwórczych? Strona rządowa zauważa, że jest to cena osiągnięcia wyższego poziomu życia i redukcji innych, negatywnych konsekwencji dla środowiska, jak choćby emisji CO₂. Obecnie, do roku 2030, energetyka jądrowa jest jedyną technologią konkurencyjną dla technologii wykorzystujących paliwa kopalne, wobec wysokich kosztów odnawialnych źródeł energii i niedojrzałości technicznej technologii składowania CO₂(CCS).

Energetyka jądrowa a środowisko

Teza poddana konsultacjom społecznym zakładała, że wpływ nowych elektrowni jądrowych na środowisko (nie biorąc pod uwagę kwestii emisji) nie będzie różnił się zasadniczo od wpływu obecnie istniejących elektrowni.

Respondenci zwrócili uwagę na zupełnie różne konsekwencje awarii jądrowej w porównaniu z awarią np. siłowni wiatrowej. Przytaczano konieczność budowy nowych linii przesyłowych i nowych kopalń uranu, a co za tym idzie powstawanie dodatkowych kosztów środowiskowych. Zauważali jednak też korzyści dla środowiska związane z energetyką jądrową, np. mniejszy teren pod budowę elektrowni, czy łatwy transport relatywnie małych ilości paliwa. Wielu respondentom nie odpowiadały nowe zasady planowania lokalizacji obiektów o szczególnym znaczeniu, które ograniczają prawo lokalnych społeczności do blokowania decyzji administracyjnych. Podkreśla-

no, że teren po siłowniach wiatrowych można powtórnie wykorzystać, brak tam stref wyłączenia z użytkowania. Zauważano też negatywne strony tych rozwiązań - silny wpływ na krajobraz, hałas i zależność od warunków pogodowych.

Rząd ocenił ryzyko potencjalnej awarii w nowoczesnych elektrowniach za bardzo małe. Surowe przepisy obowiązujące w przemyśle jądrowym dodatkowo je minimalizują.

Oдноśnie problemów towarzyszących wydobyciu uranu (np. przy pozyskaniu 1 tony rudy uranowej metodą odkrywkową powstaje 40 ton odpadów skalnych) stwierdzono że wpływ na środowisko związany z wydobyciem rudy uranowej nie będzie wyższy niż przy wydobyciu innych metali. Uznano, że przepisy głównych eksporterów uranu (Australia i Kanada) biorą pod uwagę względy ochrony środowiska.

Rząd zgodził się, że należy zagwarantować większy udział społeczności lokalnych przy podejmowaniu decyzji o lokalizacji nowych elektrowni jądrowych.

Zasoby paliwa jądrowego

Podczas konsultacji respondenci zgłaszali wątpliwości odnośnie możliwości pozyskiwania odpowiedniej ilości paliwa jądrowego. Uważali, że w związku z renesansem energetyki jądrowej, dostawy uranu mogą gwałtownie spaść, co wpłynie niekorzystnie na bezpieczeństwo energetyczne.

Rząd odrzucił te obawy jako nieuzasadnione. Względy ekonomiczne przemawiają za dalszą eksploatacją uranu jako paliwa jądrowego i nawet przy ekspansji energetyki jądrowej zasoby surowca wystarczą na setki lat. Na świecie istnieją dostatecznie bogate pokłady taniego uranu zdolne do pokrycia rosnącego zapotrzebowania. Poszukuje się także nowych złóż. Ostatnio odkryto je w Szwecji i Zambii. W związku z tym Wielka Brytania będzie importować potrzebne paliwo, mimo że posiada własne pokłady rud uranu.

Uznano, że przy obecnych cenach eksploatacja własnych zasobów nie jest uzasadniona.

Niezawodność dostaw sprzętu i umiejętności kadry technicznej

W dokumencie poddanym konsultacjom oceniono, że sieć dostawców jak i umiejętności kadry technicznej w Wielkiej Brytanii są wystarczające, by sprostać wymogom energetyki jądrowej.

W trakcie konsultacji pojawiły się jednak wątpliwości związane z zapewnieniem wysoko kwalifikowanej młodej kadry technicznej. Zwracano uwagę na konieczność przekazania kompetencji następnemu pokoleniu przez pokolenie jeszcze aktywne zawodo-

wo. Wyrażano obawy co do jakości importowanego sprzętu oraz solidności zagranicznych pracowników. Dla wzbudzenia zaufania i skłonienia do inwestowania w zdolności wytwórcze i naukę potrzebne jest stworzenie programu rządowego stanowiącego gwarancję w tak poczynione inwestycje.

Zdaniem rządu, choć przemysł brytyjski zmniejszył swoje zdolności wytwórcze w przemyśle jądrowym, to nadal posiada duże możliwości. Dowodem tego jest realizacja budowy elektrowni z reaktorami wodno-ciśnieniowymi (PWR) w Sizewell. W Wielkiej Brytanii mogą być produkowane podstawowe elementy układu pierwotnego reaktora: rurociągi, stabilizator ciśnienia, turbina parowa, pompy, obudowa bezpieczeństwa. Jedynie zbiornik reaktora i jego pokrywa wymagają złożenia zamówienia za granicą.

Ważnym zadaniem dla instytucji państwowych, odpowiedzialnych za stan nauki i szkolnictwa wyższego, jest sterowanie zasobami ludzkimi. W tym celu uruchomione zostały programy kształcenia, różnego typu kursy doszkalające oraz praktyki, w których biorą udział tysiące ludzi na stanowiskach robotniczych i technicznych związanych z energetyką jądrową. Dla zapewnienia kadr z wyższym wykształceniem przeznaczone zostało 1 milion GBP (5 mln PLN) ze środków państwowych i 1,6 mln GBP (8 mln PLN) ze strony przemysłu.

Przeróbka wypalonego paliwa jądrowego

Rząd brytyjski stoi na stanowisku, że paliwo używane w brytyjskich elektrowniach jądrowych nie będzie powtórnie użyte i temu założeniu należy podporządkować plany dalszego z nim postępowania.

W opinii większości respondentów stanowisko rządowe jest godne poparcia. Wątpliwości zgłaszano jedynie wobec nieuwzględniania przez rząd możliwości powtórnego użycia paliwa wypalonego w reaktorach prędkich powielających, przeróbki na paliwo typu MOX, (Mixed oxide (MOX) – paliwo jądrowe składające się z tlenków plutonu i uranu) możliwości, jakie stwarzają reaktory chłodzone gazem typu PBR, czy współpracy międzynarodowej w ramach inicjatywy GNEP. (Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) – Globalne Partnerstwo Energii Jądrowej, Polska jest jego członkiem.)

Po przeanalizowaniu zgłoszonych wątpliwości strona rządowa przedstawiła pogląd, że przeróbka wypalonego paliwa wobec dostępności jeszcze przez

długi czas na rynku taniego paliwa uranowego jest z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalna.

Przeciwdziałanie zmianom klimatu

W trakcie konsultacji większość respondentów podzielała opinię rządu dotyczącą głównych wyzwań w energetyce oraz konieczności podjęcia w tym kierunku aktywnych kroków. Redukcję emisji CO₂ do atmosfery określono jako cel globalny. Wielka Brytania za pośrednictwem Unii Europejskiej miałaby zachęcać inne kraje, w tym Stany Zjednoczone, Indie i Chiny, do podjęcia działań związanych z przeciwdziałaniem zmianom klimatu.

Rządowi eksperci oszacowali, że rozwój energetyki jądrowej pozwoliłby zmniejszyć emisję CO₂ od 30 do 60% w stosunku do przyjętych celów emisyjnych.

Oceniono, że koszt powstrzymania zmian klimatycznych wynosił (2006 r.) około 1% produktu krajowego brutto. Jeżeli w ciągu dłuższego okresu nie podjęto by jakichkolwiek kroków przeciwdziałających globalnemu ociepleniu, koszt ten mógłby wzrosnąć

rozwojowymi. Niektórzy widzieli potrzebę społecznej własności siłowni jądrowych dla zapewnienia większego bezpieczeństwa ich pracy, inni stawiali na rozwój OZE. Proponowano też powtórny weryfikację planów rządowych dla osiągnięcia ich większej wiarygodności.

Zdaniem rządu, osiągnięcie określonych celów związanych z OZE zostało jasno sformułowane w odpowiednich programach (10% udział OZE w roku 2010, 20% w roku 2020). Akty prawne związane ze zwolnieniami podatkowymi zapewniają roczne dofinansowanie OZE w wysokości 1 mld GBP (5 mld PLN) w 2010 roku i dwukrotnie większe w roku 2020. Popierany jest też rozwój energetyki skojarzonej. Rząd stawia sobie również za cel doprowadzenie do sytuacji, w której w 2016 roku nowobudowane domy nie emitowałyby do otoczenia CO₂.

Podstawową zasadą polityki energetycznej rządu brytyjskiego jest zasada konkurencyjności. Uważa się, że prywatny sektor gospodarki podlegający bezstronnemu systemowi prawnemu jest zdolny dostar-

Rząd brytyjski nie występuje w sprawie budowy elektrowni jądrowych jako inwestor. Niemniej, aby ułatwić inwestowanie w energetykę jądrową i zmniejszyć ryzyko inwestycyjne, usprawnił między innymi proces udzielania koncesji, określił kryteria lokalizacyjne i znowelizował system prawny związany z budową nowych elektrowni jądrowych

snąć do 5% lub nawet 20% produktu krajowego brutto.

Rozwój gospodarczy, był postrzegany przez uczestników konsultacji częściej w odniesieniu do zwiększonego zużycia energii niż redukcji zapotrzebowania, czy zmiany stylu życia.

Uwagi respondentów dotyczyły też dodatkowych obciążeń finansowych podatników w związku z nowymi inwestycjami czy pracami badawczymi

czyć energię w najbardziej efektywny sposób.

Rząd jest świadomy, że przeprowadzana nowelizacja przepisów prawnych nie musi skłonić firmy do inwestowania w energetykę jądrową. Zależy to od sytuacji na rynku, bieżącej kalkulacji kosztów i szeregu różnych czynników.

Rząd uważa, że w związku z zagrożeniem zmianami klimatu i dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, należy popierać możliwość inwestowa-

nia w energetykę jądrową. Leży to w interesie społecznym. Ankietowani respondenci w 44% zgodzili się z zaprezentowanym stanowiskiem rządowym, 37% było przeciw, 18% nie wyraziło zdania.

Podsumowanie- koszty nierozwijania energetyki jądrowej

Polityka ochrony środowiska w Wielkiej Brytanii zakłada zmniejszenie emisji CO₂ o 60% do roku 2050 w odniesieniu do stanu na rok 1990. Do osiągnięcia planowanych redukcji CO₂ konieczne są inwestycje w rozwój technologii niskoemisyjnych i w tworzenie nowych mocy wytwórczych. Konieczne jest zarówno zwiększenie wytwarzania energii elektrycznej, jak i podniesienie efektywności jej produkcji.

Przewiduje się, że wywiązanie się ze zobowiązań dotyczących redukcji CO₂ (do roku 2050), bez budowy nowych elektrowni jądrowych, będzie kosztowało gospodarkę brytyjską miliard funtów (ok. 5 mld PLN) rocznie więcej niż w przypadku budowy tych siłowni. Ponadto, jeśli technologia wychwytu i składowania ditlenku węgla nie rozwinie się w wystarczającym stopniu, Wielka Brytania poniesie dodatkowy koszt rzędu 5 miliardów funtów rocznie (25 mld PLN).

Aby zapewnić bezpieczeństwo energetyczne państwa i zrealizować politykę ochrony środowiska, rząd Wielkiej Brytanii czuje się zobowiązany nakreślić nową politykę energetyczną, określającą, jakim źródłom energii i w jakim stopniu dać przyzwolenie do rozwoju. Dlatego decyduje się popierać rozwój energetyki jądrowej.

Dr inż. Piotr Czernski.

Dr inż. Piotr Czernski jest absolwentem Politechniki Warszawskiej wydziału Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa. Specjalizował się w bezpieczeństwie reaktorów. Od 2008 roku pracuje w PGE w zespole przygotowującym program budowy elektrowni atomowej



**masz pytania o bezpieczeństwo radiologiczne
ZAPYTAJ FACHOWCÓW**

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
ul. Konwaliowa 7 03-194 Warszawa



Szukaj

wyszukiwanie zaawansowane



zawartość Twojego koszyka
 0 szt. o wartości: 0,00 zł



Instrukcje Programy Porady
 ZACZNIJ TU



GRUPA 1 2 3
 Szkolenia Egzamin
 EKSPLOATACJA DOZÓR



Urządzenia Wytwarzające
 Pole Elektromagnetyczne
 BHP



Terminy szkoleń egzaminów
 WYDARZENIA



EKO TECHNOLOGIE
 BIOGAZ
 WODA SŁÓŃCE WIATR

Organizujemy szkolenia indywidualne oraz dla grup. Szkolenia są 1, 2 lub wielodniowe (1dzień = 6 godzin zegarowych).
 Tematykę szkoleń można dowolnie konfigurować z bloków tematycznych stosownie dla swoich potrzeb.



16 pozycji w niskiej

SZCZĘŚLIWA SZESNASTKA



NOT SEP **le** RADIOELEKTRONIK.PL

