

eko atom

NR 7/4 GRUDZIEŃ 2012

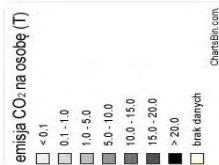
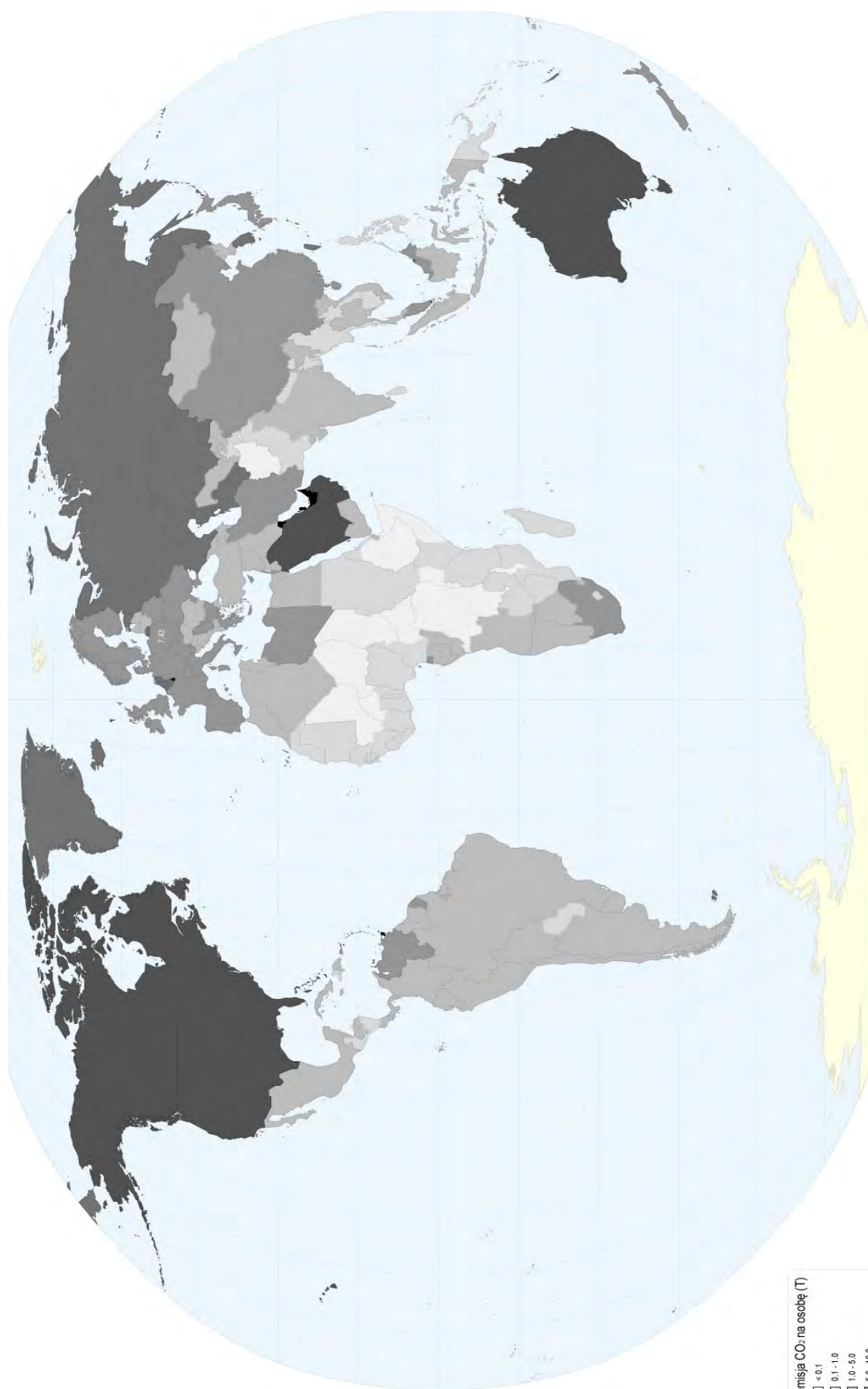


12/2012

SEP
COSTW

ENERGIA CAŁKOWICIE PRZYJAZNA ŚRODOWISKU ?
EKO TRENDY W ŚWIATOWEJ ENERGETYCE JĄDROWEJ
REAKTORY NA STOPIONYCH SOLACH







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
mgr Jerzy Szczurowski (SEP COSIW)

Redaktor Techniczny

Jarosław Cyrynger (SEP COSIW)

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 Gołnik (PW)
prof. dr hab. inż. Roman Domański

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,

Prezentujemy siódmy numer kwartalnika EKOATOM, jednocześnie dziękując za rosnące zainteresowanie (od ostatniego wydania ilość odwiedzin strony www.ekoatom.com.pl wzrosła z 21 000 do 27 000 na miesiąc). Będziemy nadal dokładać starań, by nasze pismo było coraz bardziej atrakcyjne i ciekawe.

Pragnąc bardziej przybliżyć problemy związane z energetyką jądrową w środowisku nie tylko branżowym, w ramach programu informacyjnego na temat budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, Stowarzyszenia SEP, SEREN i redakcja EKOATOM wzięły udział w jednym z najważniejszych w tym roku wydarzeń dotyczących energetyki jądrowej, którym była konferencja pt. Międzynarodowe Forum Energetyki Jądrowej zorganizowana z inicjatywy magazynu The Warsaw Voice, PowerMeetings.Pl oraz firmę SCC – Seminars Conferences Consulting. Sprawozdanie z tej konferencji zamieściliśmy na naszej stronie.

W numerze przedstawiamy materiały dotyczące następujących tematów:

- czy istnieje technologia wytwarzania energii przyjazna środowisku (A. G Chmielewski),
- czy może zabraknąć uranu dla energetyki jądrowej (J. Kaniewski),
- jak można gospodarować odpadami promieniotwórczymi (A. Boettcher),
- jakie są skutki małych dawek promieniowania na organizm człowieka (S. Sommer),
- jakie występują problemy związane z bezpieczeństwem jądrowym -zagadnienie odpowiedzialności operatora elektrowni jądrowej (P. Czerski).

Bardzo interesującym tematem pokazującym ogromne możliwości proponowanych dawniej rozwiązań są reaktory na stopionych solach (S. Kilim).

Oczekujemy na stanowisko Rządu w sprawie Memorandum dotyczącego Energetyki Jądrowej w Polsce, wystosowanego przez p. Andrzeja G. Chmielewskiego, Prezesa SEREN, p. Jerzego Barglika, Prezesa SEP, p. Ewę Mańkiewicz-Cudny, Prezesa FSNT NOT oraz p. Zbigniewa Zimka, Prezesa PTN, które zostało skierowane do Kancelarii Premiera w dniu 25.07.2012.

Obecnie istnieje wiele stron internetowych omawiających zagadnienia związane z energetyką jądrową, związanych z wyspecjalizowanymi ośrodkami badawczymi. Czasopismo „EKOATOM” powstało z myślą o uzupełnianiu wiedzy w dziedzinie techniki jądrowej dla możliwie szerokiego odbiorcy. Pragniemy przedstawić jak najszerszy wachlarz zagadnień w sposób jak najbardziej obiektywny.

Na zebraniu założycielskim postanowiono, by czasopismo było powszechnie dostępne w Internecie bez żadnych dodatkowych opłat ze strony czytelników.

Dalszy losy naszego kwartalnika uzależnione są od wsparcia sponsorów. Zgodnie z uzyskanymi przez Zespół Redakcyjny informacjami ostatnie oszczędności budżetowe wskazują na znaczne spowolnienie programu promocji energetyki jądrowej, niezbędnego do realizacji pierwszej w Polsce elektrowni jądrowej. Stawia to „EKOATOM” w niezwykle trudnej sytuacji i może spowodować jego zawieszenie lub zakończenie wydawania. Dlatego też zwracamy się do wszystkich zainteresowanych kontynuacją istnienia czasopisma o pomoc.

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

Redaktor Naczelny
Dr inż. Krzysztof Rzymkowski



Spis treści

MG: Polacy przekonują się do atomu	6
Areva będzie współpracowała z Politechniką Warszawską	6
Atomowy Autobus – Mobilne Laboratorium	7
Atomowe ambicje Polski pod lupą.....	8
Energetyka jądrowa jest ważna, ale nie jest panaceum	8
Rządowa propaganda.....	8
Niezbędne wsparcie Kościoła.....	9
Jaki model finansowania?	9
Kształcenie kadr	10
STANISŁAW KILIM	11
REAKTORY NA STOPIONYCH SOLACH – OGROMNE MOŻLIWOŚCI ALE DUŻO JESZCZE DO ZROBIENIA	11
Wstęp	11
Opis reaktora na stopionych solach na przykładzie MSBR	12
Dlaczego zrezygnowano - wady reaktora MSBR.....	14
Zalety reaktora na stopionych solach cenione dziś	15
Powolny nawrót zainteresowania reaktorami MSR	16
Podsumowanie.....	20
Literatura.....	21
AGNIESZKA BOETTCHER	22
GOSPODARKA ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI I WYPALONYM PALIWEM JĄDROWYM WE FRANCJI.	22
Odpady promieniotwórcze we Francji.....	22
Gospodarka wypalonym paliwem jądrowym.	24
Składowanie odpadów promieniotwórczych we Francji.	26
JACEK T. KANIEWSKI	29
CZY MOŻE ZABRAKNAĆ URANU DLA ENERGETYKI JĄDROWEJ ?	30
Wstęp	30
Światowe zasoby uranu	31
Poszukiwania nowych zasobów uranu	37
Produkcja uranu a zapotrzebowanie i mechanizmy je regulujące	39
Historia i perspektywy pozyskiwania uranu z zasobów o niskich koncentracjach	40
Podsumowanie.....	43



Literatura.....	43
ANDRZEJ GRZEGORZ CHMIELEWSKI	44
CZY ISTNIEJE TECHNOLOGIA WYTWARZANIA ENERGII CAŁKOWICIE PRZYJAZNA ŚRODOWISKU ?	44
Wstęp	44
Energetyka oparta o spalanie paliw kopalnych - emisja zanieczyszczeń gazowych i pyłów	46
Redukcja emisji zanieczyszczeń.	51
ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII	51
Biomasa	51
Energetyka wiatrowa	52
Energetyka słoneczna.	53
Hydronenergetyka	53
ENERGETYKA JĄDROWA.....	54
Wnioski.....	55
Literatura.....	55
PIOTR CZERSKI	57
ODPOWIEDZIALNOŚĆ OPERATORA ELEKTROWNI JĄDROWEJ	57
Wykorzystano:	62
KRZYSZTOF RZYMKOWSKI	63
TRENDY W ŚWIATOWEJ ENERGETYCE JĄDROWEJ PO KATASTROFIE W FUKUSHIMIE	63
SYLWESTER SOMMER	70
SKUTKI ZDROWOTNE NISKICH DAWEK PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA PODSTAWIE BADANIA OFIAR ATAKÓW NUKLEARNYCH W HIROSZIMIE I NAGASAKI	70
Wstęp	70
Czym zajmuje się Fundacja Badania Skutków Promieniowania (<i>Radiation Effects Research Foundation - RERF</i>) i jakie uzyskano rezultaty?	73
Projekt In Utero.....	79
Projekt F1	79
Zakończenie.....	79
Bibliografia:	80

MG: Polacy przekonują się do atomu



MINISTERSTWO
GOSPODARKI



Już ponad połowa Polaków opowiada się za budową elektrowni jądrowej w Polsce - to główny wniosek z badań opinii publicznej przeprowadzonych przez Millward Brown SMG/KRC na potrzeby rządowej kampanii „Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią”. Od rozpoczęcia kampanii grono zwolenników energii jądrowej wzrosło z poziomu 51 proc., aż o 5 punktów procentowych. Tak wysokie poparcie dla siłowni jądrowych w Polsce oczekiwane było na koniec działań kampanii informacyjno-edukacyjnej, w maju 2014 r. Celem kampanii rozpoczętej przez Ministerstwo Gospodarki w kwietniu 2012 roku było dostarczenie Polakom aktualnych i rzetelnych informacji na temat energetyki jądrowej: zasad funkcjonowania elektrowni jądrowej, jej wpływu na środowisko i zdrowie, efektywności energetyki jądrowej, systemów zabezpieczeń, które zostaną zastosowane w pierwszej polskiej siłowni tego typu.

- *Rozpoczynając kampanię chcieliśmy poznać obawy Polaków i rozwiązać mity na temat energetyki jądrowej – mówi Pełnomocnik Rządu ds. Polskiej Energetyki Jądrowej Hanna Trojanowska – Miał być to żywy dialog ze społeczeństwem, który pomoże ocenić racjonalnie za i przeciw energii jądrowej. Wyniki jednoznacznie pokazują, że cel został osiągnięty, choć mamy świadomość, że jest jeszcze dużo do zrobienia - dodaje.*

Kampania została oparta na wynikach badań niezależnych instytucji, wiedzy ekspertów z dziedziny komunikacji masowej oraz doświadczeniu krajów, które z powodzeniem zrealizowały podobne projekty. To właśnie eksperci i naukowcy z zakresu energetyki i atomistyki zostali ocenieni przez respondentów za najbardziej wiarygodne źródło wiedzy na temat energetyki jądrowej. Dodatkowo, aż 50 proc. Polaków, którzy zetknęli się z elementami kampanii przyznaje, że zwiększyła ich zainteresowanie tematem budowy elektrowni jądrowej w Polsce.

- *Najbardziej cieszy wzrost poparcia dla budowy elektrowni jądrowej w województwie zachodniopomorskim. Teraz, gdy emocje już tam opadły, widać zmianę. Istotne stają się merytoryczne argumenty, głęboka analiza i chęć mieszkańców do poszerzania wiedzy - podsumowała wyniki badań wiceminister Hanna Trojanowska.*

Badania przeprowadzone w 3 powiatach, które zostały wskazane jako potencjalne lokalizacje dla pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, wykazały, że największe zmiany zachodzą w powiecie koszalińskim. Z 40 proc. do 45 proc. zwiększyła się tam liczba zwolenników siłowni jądrowych, o 6 punktów procentowych wzrósł także poziom akceptacji dla jej budowy w pobliżu miejsca zamieszkania. Nastroje wśród mieszkańców powiatów wejherowskiego i puckiego, które także typowane są jako potencjalne lokalizacje elektrowni jądrowej, niezmiennie oscylują wokół 55 proc. poparcia dla „jądrówki”. Temat energetyki jądrowej oceniany jest jako ważny, a jego znaczenie podczas kampanii wzrosło w porównaniu z badaniami przeprowadzonymi w pierwszym kwartale 2012. Jednocześnie zanotowano znaczny wzrost, z 67 proc. do 71 proc., liczby ankietowanych, którzy uważają temat za niezwykle istotny.

Badanie przeprowadzone zostało w listopadzie 2012 r. na reprezentatywnej próbie 1000 Polaków oraz na reprezentatywnej próbie 900 mieszkańców z 3 powiatów: puckiego, koszalińskiego i wejherowskiego.

Areva będzie współpracowała z Politechniką Warszawską



Politechnika Warszawska podpisała we wtorek umowę, rozszerzającą współpracę z francuskim koncernem Areva - jednym z największych producentów technologii nuklearnych. Porozumienie obejmuje głównie kształcenie kadr dla energetyki i przemysłu nuklearnego. Prorektor ds. Nauki PW prof. Rajmund Bacewicz wyraził nadzieję, że kształcone obecnie pokolenie polskich inżynierów będzie pracowało już przy polskiej elektrowni jądrowej i powiązanim z nią przemyśle. "Mamy już spore grono wykształconych specjalistów i jesteśmy gotowi poszerzyć nauczanie o studia w języku

angielskim" - powiedział PAP.

Specjalizację z energetyki jądrowej na PW kończy rocznie około 40 studentów, co odpowiada liczbie na przeciętnej europejskiej uczelni technicznej - zauważył prof. Konrad Świrski. Jak dodał, to wystarczy na obecnym, początkowym etapie polskiego programu jądrowego, liczba ta może być łatwo zwiększona do ok. 50, jeśli program ruszy na pełną skalę. "Wszyscy absolwenci mieli styczność z prawdziwymi instalacjami nuklearnymi we Francji albo USA, co jest w Polsce unikalne" - podkreślił Świrski.

Jak mówił wicedyrektor handlowy Arevy Tarik Choho, firma daje możliwości praktycznej nauki w różnych segmentach sektora nuklearnego - inżynierii, badaniach czy studiach terenowych. Najważniejszą rzeczą jaką dajemy, jest możliwość zastosowania wiedzy w praktyce. Studentom oferujemy też możliwość kształcenia się w naszych placówkach we Francji, to bardzo ważne uzupełnienie wykształcenia akademickiego, które otrzymują tutaj" - powiedział PAP Choho.

Podpisana we wtorek umowa rozszerza współpracę, jaką francuski koncern nawiązał w 2009 r. Areva organizowała już wyjazdy szkoleniowe dla kadry oraz studentów PW, w ramach wspólnych badań Francuzi przekazali też Polsce zaawansowane programy symulujące pracę reaktorów jądrowych. Kontrolowana przez państwo francuska firma będzie się ubiegać o kontrakt na budowę polskiej elektrowni jądrowej, zaoferuje w nim swój najnowszy reaktor EPR. Obecnie na świecie trwa budowa czterech takich bloków: dwóch w Chinach i po jednym we Francji i w Finlandii. Polski rząd planuje wybudowanie dwóch siłowni o łącznej mocy 6000 MW. Na inwestora wybrano Polską Grupę Energetyczną, w której Skarb Państwa ma większość udziałów.

Atomowy Autobus – Mobilne Laboratorium



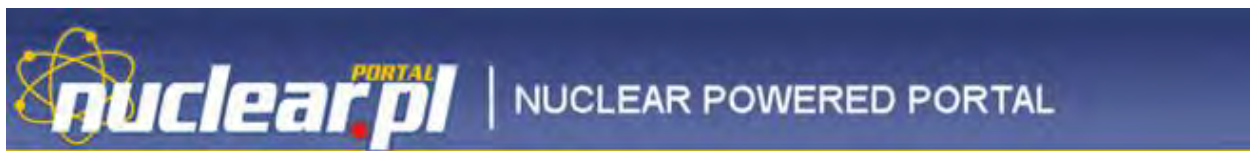
Druga edycja największego projektu realizowanego przez Fundację FORUM ATOMOWE zakończyła się sukcesem. Atomowy Autobus 5 grudnia zakończył objazd po Polsce. Tym razem, poza ośrodkami akademickimi w całej Polsce, działalność Fundacji została skoncentrowana w północnych regionach kraju, szczególnie w województwie pomorskim i zachodniopomorskim. Tegoroczna trasa Atomowego Autobusu objęła 10 polskich miast i wystartowała, tak jak poprzednio, z centralnej części Polski, z Warszawy. Następnie Autobus, kierując się na południe, dojechał do Krakowa, później zahaczył o Wrocław na zachodzie kraju, po czym wyruszył na podbój

północy. Na Pomorzu rozpoczął działalność na uczelniach wyższych w Szczecinie oraz w Koszalinie. W Gdańsku mobilna wystawa zorganizowana została w Parku Naukowo-Technologicznym. Następnie autobus odwiedził Puck, Choczewo i Wejherowo. Projekt zakończony został na Uniwersytecie w Białymstoku.

Zadziwiająco duże zainteresowanie tematyką, prezentowaną przez Ekspertów Fundacji FORUM ATOMOWE, wykazali uczniowie liceów i gimnazjów – mówił prezes Fundacji Łukasz Koszuk. – Wbrew oczekiwaniom, na wystawach w różnych miastach pojawiło się więcej uczniów okolicznych szkół, niż studentów, do których przekaz miał trafić. Jest to zadowalająca informacja, ponieważ za kilkanaście lat, właśnie to pokolenie będzie korzystało z energii wytwarzanej w elektrowni jądrowej, będzie decydowało o rozwoju programu polskiej energetyki jądrowej – kontynuuje Łukasz Koszuk. Po tegorocznych doświadczeniach zdajemy sobie sprawę z tego, jak ważne jest edukowanie najmłodszych – przekazywanie im tej wiedzy i tłumaczenie wszystkich niejasności. Jeśli już teraz zaczniemy edukować dorastającą młodzież, to w przyszłości będzie ona mogła podejmować świadome i dojrzałe decyzje. Nikogo nie zamierzamy przekonywać – naszym celem jest edukowanie – kończy prezes Fundacji.

Podsumowując, w ciągu 10 dni Atomowy Autobus przejechał około 2600 km, odwiedził 10 miast i miejscowości - uczelnie wyższe, szkoły średnie, instytucje publiczne. Pracownicy Fundacji spędzili 60 godzin prowadząc pokazy na stoiskach i odpowiadając na pytania odwiedzających i w tym czasie wygłosili 32 seminaria popularnonaukowe. Szacujemy, że mobilną wystawę odwiedziło co najmniej 3500 osób.

Fundacja FORUM ATOMOWE chce podtrzymywać ideę Atomowego Autobusu, ponieważ projekt okazał się wielkim sukcesem. Formuła przekazywania wiedzy o energetyce jądrowej w postaci mobilnego „pikniku naukowego” po raz kolejny okazała się atrakcyjna, warta zaangażowania i wysiłku włożonego w realizację tej akcji. Ogromnym atutem całego przedsięwzięcia jest Zespół Fundacji, który skupia osoby interesujące się tematyką, mający specjalistyczną wiedzę i chęci, aby dzielić się nią z innymi. To dzięki nim, ich otwartości i umiejętności prowadzenia dialogu, Atomowy Autobus zjednał sobie już rzeszę sprzymierzeńców. Wizyty mobilnego laboratorium wzbudzały w każdym mieście duże zainteresowanie, dlatego Fundacja planuje już kolejną edycję projektu w 2013 roku.



Atomowe ambicje Polski pod lupą

Energia z atomu jest bezpieczna, czysta i przynosi oszczędności - mówili na międzynarodowej konferencji w Warszawie przedstawiciele rządu oraz zwolennicy planów budowy w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej. W zorganizowanym 29 listopada br. w Hotelu Sheraton przez PowerMeetings.pl oraz magazyn The Warsaw Voice, przy współpracy z PGE Energia Jądrowa Międzynarodowym Forum Energetyki Jądrowej udział wzięło prawie 200 osób, w tym dyplomaci z USA, Wielkiej Brytanii, Japonii i Francji oraz eksperci z całego świata.

Energetyka jądrowa jest ważna, ale nie jest panaceum

Aby sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną oraz wywiązać się z międzynarodowych zobowiązań zakładających ograniczanie źródeł energii powodujących szkodliwe emisje, władze Polski planują około roku 2023 wybudować pierwszą elektrownię jądrową w kraju. Kolejna elektrownia o podobnej mocy ok. 3 tys. MW ma zostać zbudowana w terminie późniejszym.

Według Hanny Trojanowskiej, Pełnomocnik Rządu ds. Polskiej Energetyki Jądrowej i Podsekretarz Stanu w Ministerstwie Gospodarki, uruchomienie łącznie 6 tys. MW mocy zainstalowanej w polskich elektrowniach atomowych umożliwi redukcję emisji dwutlenku węgla o 47 milionów ton rocznie w porównaniu do energii uzyskiwanej z paliw kopalnych. "Energetyka jądrowa nie jest panaceum na nasze wszystkie problemy energetyczne, ale stanowi oczywiście bardzo ważną część ich rozwiązania - powiedziała Hanna Trojanowska. Dodała też, że "program budowy w Polsce elektrowni jądrowej może stać się kołem zamachowym rozwoju kraju oraz poprawić innowacyjność i konkurencyjność całej polskiej gospodarki".

- Nie mamy wyjścia. Przyszłością jest dla nas jedynie węgiel i energetyka jądrowa - ocenił w czasie Forum prof. dr hab. inż. Andrzej Grzegorz Chmielewski, Dyrektor Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej. Andrzej Boroń, Sekretarz Generalny Stowarzyszenia Elektryków Polskich ujął temat bardziej odważnie, stwierdzając że energetyka jądrowa to przyjazne środowisku źródło energii elektrycznej. Według niego to także energia tania, znacznie tańsza niż ta otrzymywana z wiatru i słońca. Andrzej Boroń określił program inwestycji w energetykę jądrową jako strategiczne rozwiązanie zapewniające Polsce bezpieczeństwo energetyczne na wiele lat. Zauważył również, że zasoby węgla wystarczą na około 40 lat, po czym trzeba będzie znaleźć jakieś inne źródło energii.

- Obecnie światowa opinia publiczna dzieli się na zwolenników i przeciwników energetyki jądrowej. Przeciwnicy energetyki jądrowej wskazują m.in. na skażenie środowiska, wzrost zachorowalności na choroby nowotworowe czy niebezpieczeństwo związane z utylizacją odpadów promieniotwórczych. Opinia taka jest podtrzymywana przez nagłaśnianie i wyolbrzymianie dotychczasowych awarii w elektrowniach jądrowych. Nowoczesne rozwiązania technologiczne stosowane obecnie w energetyce jądrowej zapewniają zdecydowanie większą niż wcześniej niezawodność, ekonomiczność i bezpieczeństwo ludzi oraz lepszą ochronę środowiska - stwierdził na Forum dr inż. Krzysztof Rzymkowski, Sekretarz Generalny Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Jądrowej (SEREN). Przytoczył przy tym opinię James'a Ephraim'a Lovelock'a, brytyjskiego naukowca, ekologą, członka stowarzyszenia Environmentalists For Nuclear Energy (Ekolodzy na Rzecz Energii Nuklearnej), który uważa wręcz, że tylko energia jądrowa może wstrzymać proces globalnego ocieplenia i jest jedynym realnym alternatywnym i bezpiecznym źródłem energii dla paliw kopalnych, dostarczającym w sposób stabilny energię na wielką skalę przy jednoczesnym braku emisji gazów cieplarnianych.

Rządowa propaganda

Dariusz Szwed, Przewodniczący Partii Zielonych 2004, jako jedyny uczestnik panelu dyskusyjnego wyrażał sprzeciw wobec energii atomowej. Jego zdaniem, wbrew "rządowej propagandzie", społeczeństwo polskie jest przeciwne energetyce jądrowej, a oficjalna kampania medialna skupiająca się na tej gałęzi energetyki jest nieskuteczna. Dariusz Szwed stwierdził również, że rząd polski usiłuje płynąć pod prąd w sytuacji, gdy sąsiadujące z Polską Niemcy, podobnie jak Szwajcaria i Belgia, zdecydowały o zamknięciu swoich elektrowni atomowych i skierowaniu wydatków na

odnawialne źródła energii. Francja z kolei zamierza zredukować udział energetyki jądrowej w swoim bilansie energetycznym do 50% w roku 2025.

Opinię, że nowoczesne technologie nuklearne są bezpieczne wyraził natomiast Robert Pearce, Dyrektor Międzynarodowego Projektu Budowy reaktora AP1000 w amerykańskiej firmie Westinghouse Electric Company, która jest wiodącym dostawcą technologii jądrowych. - Nie musieliśmy wprowadzać żadnych zmian w wyniku testów obciążeniowych czy przeglądów przeprowadzonych po katastrofie w Fukushima. Nasz reaktor już jest tak zaprojektowany, żeby wytrzymywać takie problemy, jakie tam wystąpiły - mówił Robert Pearce, odnosząc się do zeszłorocznego trzęsienia ziemi i wywołanej nim fali tsunami, która zalała elektrownię atomową Daiichi w japońskiej Fukushima, doprowadzając do największego kryzysu atomowego od czasu katastrofy w Czarnobylu z roku 1986. Północ Europy jest natomiast "obszarem spokojnym pod względem aktywności sejsmicznej" - dodał Robert Pearce, którego firma zaprojektowała ponad połowę reaktorów pracujących w elektrowniach atomowych na świecie.

Kwestie bezpieczeństwa jądrowego, w kontekście budowy "infrastruktury bezpieczeństwa" poruszał też na Forum prof. dr hab. Grzegorz Wrochna, Dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych, a także dr inż. Gracjan Wiśniewski, Wicedyrektor Zespołu Koordynacji Inspekcji w Urzędzie Dozoru Technicznego, który omówił nałożone przepisami prawa zadania UDT podczas budowy, rozruchu i eksploatacji elektrowni jądrowej, wykonywane w celu zapewnienia jej bezpiecznego funkcjonowania.

Niezbędne wsparcie Kościoła

Anna Nietyksza, Prezes Zarządu EFICOM, grupy konsultingowej specjalizującej się w doradztwie biznesowym i inwestycyjnym, stwierdziła, że w chwili obecnej 54% Polaków postrzega energetykę jądrową negatywnie. Jej zdaniem, aby przekonać sceptyków potrzeba skutecznej kampanii, a wpływowi Kościół Katolicki ma tu do odegrania kluczową rolę. Bez poparcia Kościoła i przekonania hierarchów o tym, jak bezpieczna jest energetyka jądrowa, nie będzie w Polsce elektrowni atomowych, powiedziała Anna Nietyksza.

Poseł Andrzej Czerwiński, Przewodniczący Parlamentarnego Zespołu ds. Energetyki, odniósł się do wyrażanych wątpliwości, czy inwestycje w polską energetykę jądrową mają silne i stabilne wsparcie polityczne. Uczestnicy konferencji usłyszeli od niego, że większość polskich parlamentarzystów popiera energię atomową, a spośród sześciu partii politycznych w parlamencie tylko jedna - i to w dodatku nieduża - twierdzi, że energia jądrowa jest niepotrzebna.

Jaki model finansowania?

Pierwszą w Polsce elektrownię jądrową ma - decyzją rządu - wybudować w naszym kraju firma PGE Energia Jądrowa. - PGE EJ kończy właśnie prace nad modelem finansowania elektrowni jądrowej. Następnie koncern będzie chciał rozpocząć rozmowy na jego temat z pozostałymi zainteresowanymi podmiotami - poinformowała na Międzynarodowym Forum Energetyki Jądrowej Marzena Piszczek, Wiceprezes PGE Energia Jądrowa. Dodała, że "elektrownia jądrowa nie powstanie bez pomocy państwa", potwierdzając tym samym wyrażane w wywiadach prasowych słowa prezesa PGE, Aleksandra Grada.

Rekomendowane sposoby wsparcia elektrowni przez państwo to, w ocenie Marzeny Piszczek, "zestaw różnych instrumentów, bo nie ma jednego, uniwersalnego rozwiązania. Będą one dotyczyły z jednej strony samego rynku energii, obrotu nią, z drugiej zabezpieczeń finansowych, do których należą gwarancje rządowe, list gwarancyjny i inne sposoby, które zagwarantują nam ekonomiczną przewidywalność projektu".

Wśród potencjalnych modeli wsparcia, oprócz gwarancji rządowych, wymienia się także np. kontrakty różnicowe, taryfy gwarantowane, czy pierwszeństwo sprzedaży energii na rynku.

PGE będzie także oczekiwała zaangażowania w spółkę jądrową inwestora strategicznego, a także częściowego pozyskania finansowania przez dostawcę technologii.

Zarówno GE Hitachi, jak i Westinghouse prowadzą już rozmowy z podmiotami zainteresowanymi uczestnictwem w polskiej spółce. Jak poinformował podczas Forum Ziemowit Iwański, odpowiedzialny za działalność amerykańsko-japońskiej spółki w Polsce (GE Hitachi), nie brakuje zainteresowanych projektem.

Kształcenie kadr

- Czy jeśli pokonamy trudności związane akceptacją społeczną, lokalizacją i zebraniem niezbędnych funduszy na budowę elektrowni jądrowej w naszym kraju, to będziemy mieli fachowców, którzy nam ten reaktor wybudują oraz będą potrafili nim zarządzać? - pytał na konferencji m.in. prof. dr hab. inż. Andrzej Kraszewski, reprezentujący Wydział Inżynierii Środowiska na Politechnice Warszawskiej, Minister Środowiska w latach 2010-2011. Pozytywnie na tak zadane pytanie odpowiedzieli w czasie Forum dr hab. inż. Jerzy Cetnar, Kierownik Katedry Energetyki Jądrowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz prof. dr hab. inż. Waldemar Kamrat z Politechniki Gdańskiej.

Międzynarodowe Forum Energetyki Jądrowej już za nami. Wszystkim uczestnikom, prelegentom oraz moderatorom paneli dyskusyjnych dziękujemy za udział w tym, jak się okazało, niezwykle wyjątkowym wydarzeniu.

Jak wynika z informacji zwrotnych zebranych w trakcie Forum, spotkanie zostało ocenione jako merytorycznie bardzo ciekawe, a prelegenci i moderatorzy chwaleni za wysoki poziom wystąpień. Konferencja, na której można było omówić najważniejsze aspekty tego wielkiego przedsięwzięcia, jakim jest budowa siłowni jądrowej w naszym kraju, w gronie najbardziej zainteresowanych liderów instytucji krajowych i zagranicznych - okazała się być strzałem w dziesiątkę.

Bardzo dziękujemy PGE Energia Jądrowa, Partnerowi Forum za wsparcie przy organizacji spotkania.

Złotym Sponsorem konferencji była firma Westinghouse-Toshiba. Srebrnym Sponsorem było KGHM Polska Miedź SA, Partnerem Merytorycznym UDT, Partnerem Wspierającym GE Hitachi-Hitachi GE, Partnerem Transportowym - SIXT rent a car.

Bardzo dziękujemy wszystkim instytucjom zaangażowanym we współpracę: Instytutowi Chemii i Techniki Jądrowej, Kancelarii Prawnej WEIL, Stowarzyszeniu Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej, EFICOM SA, AMEC oraz Patronom Honorowym: Narodowemu Centrum Badań Jądrowych, Politechnice Warszawskiej, Politechnice Gdańskiej, a także Stowarzyszeniu Elektryków Polskich.

Cieszymy się, iż nasze przedsięwzięcie zyskało także poparcie mediów. Wśród Patronów Medialnych znalazły się już: Polska Agencja Prasowa, Centrum Informacji o Rynku Energii, portale: elektrownia-jądrowa.pl, nuclear.pl, ebe.org.pl, eitj.pl, biznespolska.pl, BizPoland Magazine, energetykon.pl, ekoatom.com.pl; pisma branżowe ProAtom, Energia Gigawat oraz Świat Nauki.

Zapraszamy do współpracy przy kolejnych projektach!

PK

Renata Kałużna

Dyrektor Zarządzający

SC Consulting / PowerMeetings.pl

Juliusz Kłosowski

Dyrektor Generalny

The Warsaw Voice

Agnieszka Kozłowska

Project Manager

SC Consulting / PowerMeetings.pl

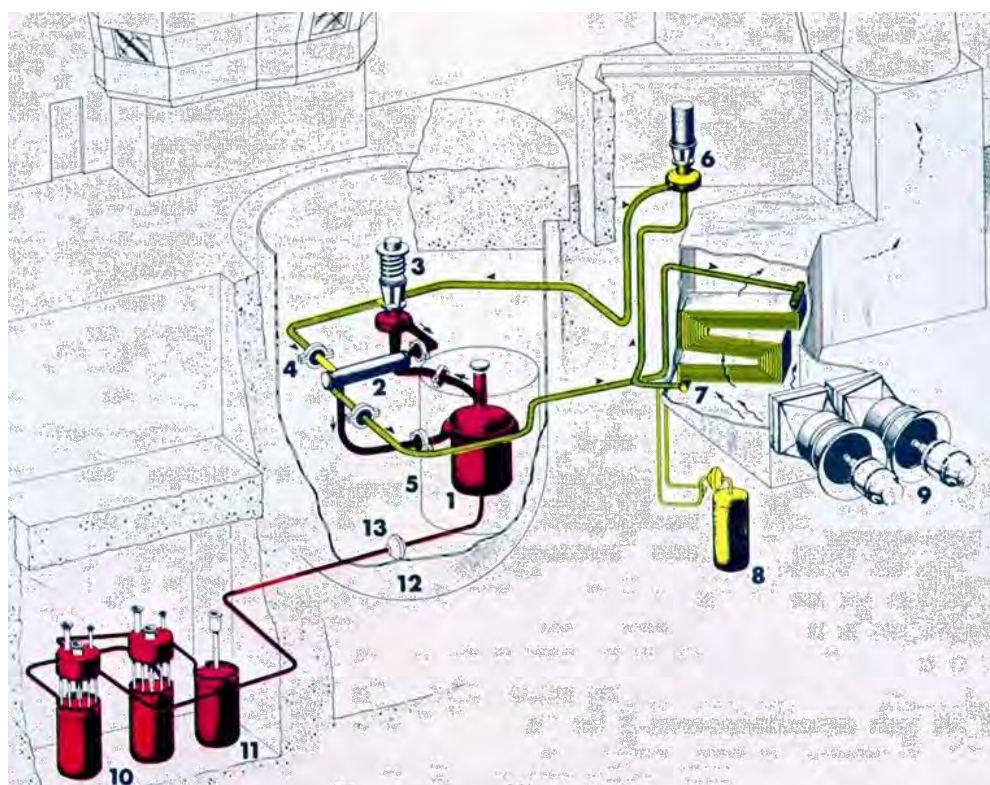
STANISŁAW KILIM

REAKTORY NA STOPIONYCH SOLACH – OGROMNE MOŻLIWOŚCI ALE DUŻO JESZCZE DO ZROBIENIA

Wstęp

Reaktor na stopionych solach (z angielska Molten Salt Reactor – MSR) różni się od innych typów tym, że zarówno paliwo jak i chłodziwo krążące w obiegu pierwotnym występują pod postacią soli (fluorków) rozgrzanych do temperatury wyższej od temperatury topnienia. Można w nich wykorzystywać wszystkie znane paliwa jądrowe, ale największe ich zalety to możliwość wdrożenia zamkniętego cyklu torowo-uranowego, możliwość uczynienia go reaktorem powielającym i możliwość wypalania aktywności zawartych w wypalonym paliwie z obecnych reaktorów energetycznych.

MSR [1] był rozwijany w Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, Tennessee, USA w latach 1950-70. Początkowo miało to być reaktor o mocy 2.5 MW(t) do napędu bombowców (ARE – Aircraft Reactor Experiment) a po zmianie planów przemianowano projekt na MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) i zbudowano reaktor o mocy 8 MW(t). Paliwem dla niego były ciekłe fluorki uranu rozpuszczone we fluorkach litu, berylu i cyrkonu. Początkowo (1.06.1965 – 26.03.1968) MSRE pracował na U-235. Następnie metodą fluoryzacji wydzielono z paliwa U-235 i stopniowo zastąpiono go U-233. Na tym paliwie MSRE przepracował okres 2.10.1968 – 12.12.1969. Pod koniec pracy wprowadzono nawet 500 g Pu-239 w postaci fluorku.



Rys. 1 Schemat rozmieszczenia oprzyrządowania reaktora MSRE

Reaktor MSRE schemat: (1) zbiornik reaktora, (2) wymiennik ciepła, (3) pompa paliwa, (4) kołnierz, (5) osłona termiczna, (6) pompa płynu chłodzącego, (7) Chłodnica, (8) zbiornik płynu chłodzącego, (9) wentylatory (10) zbiorniki spustu paliwa, (11) Płukanie zbiornika, (12) zamknięcia zbiornika, (13) Zawór .

MSRE plant diagram: (1) Reactor vessel, (2) Heat exchanger, (3) Fuel pump, (4) Freeze flange, (5) Thermal shield, (6) Coolant pump, (7) Radiator, (8) Coolant drain tank, (9) Fans, (10) Fuel drain tanks, (11) Flush tank, (12) Containment vessel, (13) Freeze valve.

Wyniki pracy reaktora MSRE były na tyle zadawalające, że ORNL opracował projekt reaktora energetycznego na stopionych solach. Miał to być reaktor powielający - tj. taki, który produkuje więcej materiału rozszczepialnego niż sam zużywa - i dlatego nazywał się Molten Salt Breeder Reactor – MSBR [2-5]. Wobec ogromu prac badawczych do wykonania w tamtych czasach i licznych problemów do rozwiązania USA zrezygnowały w roku 1972 z reaktorów na stopionych solach. Z upływem czasu pojawiły się jednak nowe technologie, które spowodowały, że idea reaktorów na stopionych solach odżywa i nawet GIF (Generation IV International Forum) wpisało ten typ reaktora na listę sześciu najbardziej perspektywicznych.

Chociaż projekt MSBR nie został nigdy wdrożony to był na tyle dopracowany i rozwiązania, które proponował były na tyle ciekawe, że pozostał reaktorem odniesienia dla późniejszych analiz.

Nota: W dalszej części skrót MSR oznaczać będzie typ reaktora a MSBR i MSRE konkretne reaktory typu MSR.

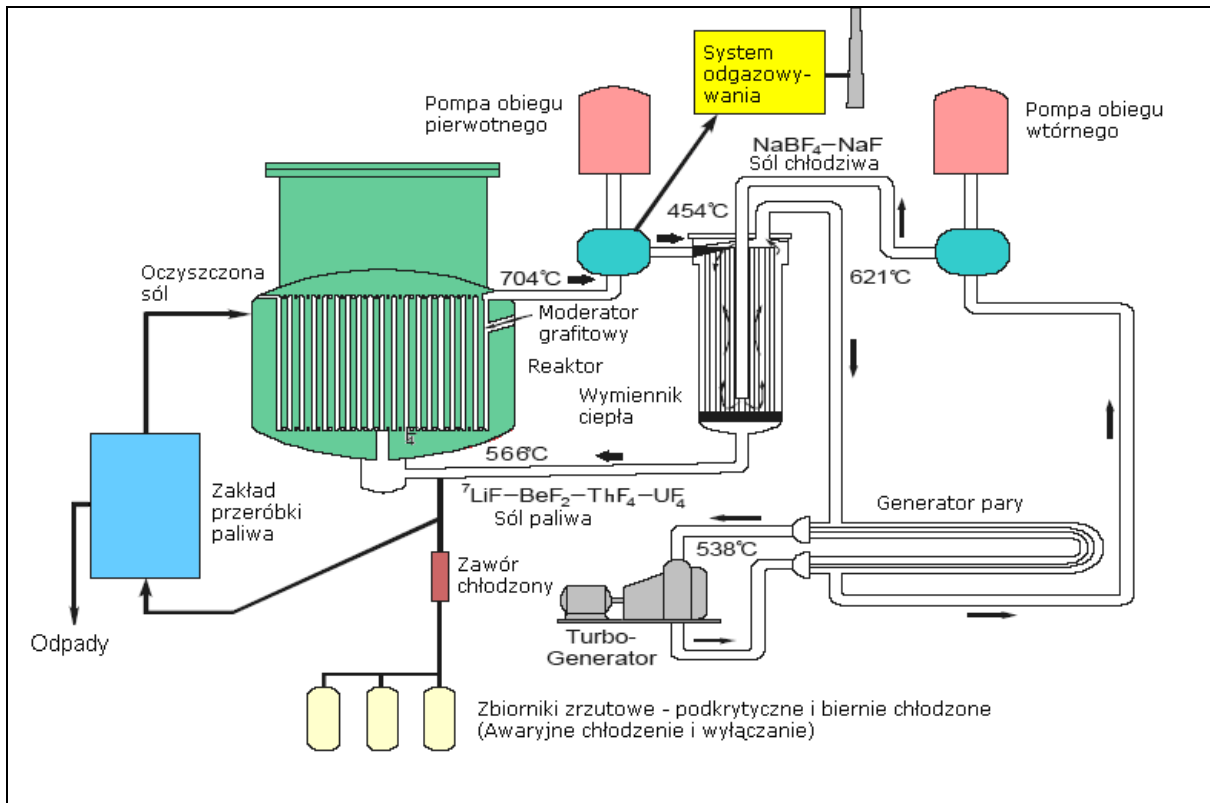
Opis reaktora na stopionych solach na przykładzie MSBR

Reaktor MSBR na stopionych solach – (Rys. 2) - jest reaktorem termicznym. Paliwem dla niego jest tetrafluorek uranu zmieszany z fluorkami litu, berylu ($7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-\text{UF}_4$). Rdzeń reaktora wypełniony jest elementami grafitowymi z wydrążonymi w środku kanałami przepływowymi. Grafit stanowi tu moderator neutronów. Sole litu i berylu stanowią nośnik i chłodziwo zarazem. Reakcja rozszczepienia (i produkcja energii) zachodzi tylko w obszarze moderatora. Powstałe ciepło odprowadzane jest poza rdzeń dzięki pompie wymuszającej obieg stopionych soli. Jest to tzw. obieg pierwotny. W elektrowni z reaktorem MSR mamy jeszcze dwa obiegi. W obiegu wtórnym krąży tylko chłodziwo (NaBF_4-NaF). Trzeci obieg napędza turbogenerator. W sumie te trzy obiegi mają za zadanie odebrać ciepło z rdzenia reaktora, przekazać na turbogenerator i zamienić na energię elektryczną. Komunikują się między sobą przez wymienniki ciepła.

Obieg pierwotny ma odgałęzienie przez które pobiera się paliwo wypalone i poddaje przeróbce celem oddzielenia produktów rozszczepienia od soli paliwa. Oczyszczone sole wracają do obiegu pierwotnego a produkty rozszczepienia do odpadów. Jeżeli w obiegu pierwotnym jest także tor, to w czasie przeróbki paliwa wydziela się powstały z toru Pa-233 i kieruje do specjalnego zbiornika gdzie Pa-233 przekształca się w U-233. Po odpowiednim czasie wyczekiwania powstały U-233 kierowany jest znów do obiegu pierwotnego. By reaktor na stopionych solach stał się reaktorem powielającym proces przeróbki paliwa powinien przebiegać w sposób ciągły – „on-line”.

Pod reaktorem znajdują się zbiorniki zrzutowe, do których spuszczone jest paliwo po zatrzymaniu reaktora. Rura spustowa zakorkowana jest przez tzw. zawór chłodzony. Stanowi on bierny element systemu zabezpieczeń reaktora. Wzrost temperatury rdzenia lub awaria układu chłodzenia zaworu spowoduje roztopienie korka i ucieczkę paliwa do zbiorników zrzutowych – wyłączenie reaktora. Zbiorniki są podkrytyczne, tzn. tak małe, że ilość zawartego w nich materiału rozszczepialnego jest mniejsza od masy krytycznej i nie może rozwinąć się w nich reakcja łańcuchowa. Są tak wmontowane w budynek reaktora, że budynek jest w stanie odprowadzić ciepło generowane w paliwie w wyniku rozpadów radioaktywnych produktów rozszczepienia. Zrzut paliwa do zbiorników może stanowić także sposób wyłączenia reaktora.

ELEKTROWNIE JĄDROWE



Rys. 2 Uproszczony schemat elektrowni z reaktorem powielającym na stopionych solach – MSBR

Tabela 1 Podstawowe parametry reaktora MSRE i MSBR

	MSRE	MSBR
Parametr		Wartość
Moc termiczna - MW(t)	8	2250
Moc elektryczna netto - MW(e)	0	1000
Czas życia – lata	~ 4	~30
Współczynnik powielania	<1 (bez toru)	1.06
Paliwo, skład soli obiegu pierwotnego - % molowe	${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ZrF}_4-\text{UF}_4$ 65.0-29.1-5.0-0.9	${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-\text{UF}_4$ 71.7-16-12-0.3
Ilość paliwa w zbiorniku reaktora – m ³ .		30.4
Ilość paliwa w obiegu pierwotnym – m ³		48.7
Ilość mat. rozszczepialnych w obiegu pierw. i zakładzie przeróbki paliwa – kg		1504
Ilość toru – kg	Nie dotyczy	68100
Moderator	Grafit	Powlekany grafit
Ilość grafitu w reaktorze – kg		304000

ELEKTROWNIE JĄDROWE

	MSRE	MSBR
Parametr		Wartość
Materiał zbiornika reaktora	St. Hastelloy-N	Nowy Hastelloy-N
Gęstość mocy – kW/l	2.7	22
Temperatura na wylocie z rdzenia - °C	654	704
Temperatura na wlocie do rdzenia - °C		566
Wzrost temp. w rdzeniu - °C	4.5	121
Ciśnienie projektowe w zbiorniku – MPa		0.52
Max. strumień neutronów – neutr/cm ² /s	6×10 ¹³	8.3×10 ¹⁴
Skład soli obiegu wtórnego	7LiF-BeF ₂	NaBF ₄ -NaF
- % molowe	66-34 % m	92-8 %m
Przeróbka paliwa	Partiami	Ciągła
Ilość paliwa w zakł. przeróbki – m ³ .		13.6
Czas przeróbki paliwa z obiegu pierwotnego - dni		~10

Dlaczego zrezygnowano - wady reaktora MSBR

Współczynnik powielania¹ 1.06 oznacza, że na wyprodukowanie drugie tyle paliwa, co się włożyło na początku potrzeba 25 lat. Na początku lat 70-ych wydawało się, że reaktory prędkie, dla których ten współczynnik wynosi 1.2 bardziej nadają się do przetwarzania materiałów paliworodnych na paliwo.

Warunkiem koniecznym wdrożenia w reaktorze MSR torowo-uranowego cyklu paliwowego i uzyskania współczynnika powielania większego od 1 jest zastosowanie przeróbki „on line” paliwa wypalonego. Przeróbka zaproponowana przez ONRL była sprawdzona tylko na skalę laboratoryjną, nigdy w całości, nigdy z reaktorem. Poza tym była kosztowna.

Reaktory na stopionych solach chłodzone fluorkiem litu produkują dużo trytu w porównaniu z innymi typami reaktorów. Trypt przenika przez wszystkie ścianki może dostać się do trzeciego obiegu a stamtąd do atmosfery. Wydzielenie go z wody jest bardzo trudne i kosztowne.

W latach 70-ych stosowano rurowe wymienniki ciepła. Charakteryzowały się one dużymi rozmiarami. Zwiększało to objętość obiegu pierwotnego i ilość potrzebnego paliwa i ilość wzbogaconego litu. A ponieważ obieg pierwotny jest bardzo aktywny i musi mieć osłony biologiczne to duży wymiennik oznacza dużą osłonę i duży koszt.

¹ Współczynnik powielania dotyczy paliwa i oznacza stosunek ilości produkowanych do ilości zużywanych w tym samym czasie materiałów rozszczepialnych. Nie mylić ze współczynnikiem mnożenia oznaczanym zwyczajowo przez k, który dotyczy neutronów i oznacza efektywną liczbę neutronów powstałych z jednego rozszczepienia, które powodują następne rozszczepienie.

Para wodna połączona z fluorkami staje się w wysokich temperaturach bardzo korozyjna. Zmusza to do obniżenia temperatury pracy, tzn. zmusza do pracy w temperaturach nieoptymalnych dla reaktorów na stopionych solach.

Kolejnym czynnikiem ograniczającym temperaturę pracy reaktora na stopionych solach jest pogorszenie własności mechanicznych materiałów konstrukcyjnych ze wzrostem temperatury.

Poważnym problemem dla reaktora MSR jest zachowanie grafitu w reaktorze. Grafit absorbuje gazy – tryt i trujący reaktorowe – Xe-135 i Kr-85. Próby zastosowania powłok z węgla pirolitycznego nie zabezpieczyły przed absorpcją. Pod działaniem neutronów grafit eroduje i puchnie. Szacowano, że w reaktorze energetycznym grafit może przetrwać tylko 4 lata. W porównaniu z żywotnością elektrowni szacowaną na 30 lat było to bardzo mało.

Trzeba także przyznać, że reaktor na stopionych solach w cyklu torowo-uranowym jest także bardzo kłopotliwy z punktu widzenia konserwacji, gdyż emituje bardzo twarde, tzn. bardzo przenikliwe promieniowanie gamma. To z kolei czyni go kłopotliwym przy likwidacji elektrowni.

Dziś do wszystkich wad dodano by zagrożenie proliferacją, czyli rozprzestrzenianiem broni jądrowej gdyż zaznaczony na schemacie zakład przeróbki paliwa byłby w stanie wyprodukować czysty U233.

Zalety reaktora na stopionych solach cenione dziś

Od lat 70-ych dużo się zmieniło. Pojawiły się nowe rozwiązania techniczne, które zastosowane w reaktorach na stopionych solach rozwiążą wiele problemów. Przestał być problemem cykl parowy w trzecim obiegu bo firma General Atomics opracowała turbiny gazowe pracujące w tzw. cyklu Braytona, w którym czynnikiem roboczym jest hel, azot lub ich mieszanina krążące w obiegu zamkniętym. Opracowano także nowy materiał konstrukcyjny – kompozyt węglowo-węglowy. Pozwoli on na skonstruowanie miniaturowych wymienników ciepła.

Zmieniły się także wymagania na reaktory energetyczne najnowszej generacji. Dziś kładzie się dużo większy nacisk na bezpieczeństwo z zasady działania, na bierne elementy bezpieczeństwa reaktora i na możliwość zastosowania zamkniętego cyklu paliwowego.

Reaktor na stopionych solach jest bezpieczny z zasady działania bo ma silnie ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności $\alpha_T = -(6.84 \pm 0.072) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Wzrost temperatury powoduje zmniejszenie gęstości paliwa, zmniejszenie ilości rozszczepialnej substancji w jednostce objętości, zmniejszenie ilości rozszczepień i ilości wydzielanej energii w jednostce objętości.

Opisany wyżej mechanizm powoduje też, że reaktor łatwiej nadąża za zmianami obciążenia sieci. Zmniejszenie obciążenia sieci oznacza mniejsze chłodzenie, wzrost temperatury itd.

Dla reaktora na stopionych solach nie jest groźne stopienie rdzenia, bo jest on przystosowany z zasady do pracy ze stopionym rdzeniem. Brak elementów paliwowych takich jak w reaktorach na paliwo stałe stanowi poważne uproszczenie konstrukcji, uproszczenie procesu przygotowywania paliwa czyli zmniejszenie kosztów eksploatacji.

$${}^2\alpha_T = \frac{d\rho}{dT} \cong \frac{1}{k} \frac{dk}{dT}$$

oznacza zmianę reaktywności po zmianie temperatury o 1 °C

Dużą zaletą reaktora na stopionych solach jest jego elastyczność konfiguracji. Ten sam reaktor może pracować na U-235 jako paliwie, na U-233, na Pu-239. Może pracować bez przeróbki paliwa (otwarty cykl paliwowy), z przeróbką paliwa (zamknięty cykl paliwowy). Może nawet pracować jako wypalacz transuranowców i długożyciowych produktów rozszczepienia. Szacuje się, że w najprostszej konfiguracji reaktor na stopionych solach jest w stanie przepracować 30 lat gdyby pozwolić na samoistne ulatnianie się trucizn gazowych, uzupełniać ubytki paliwa i co ok. 4 lata wymieniać grafit.

Pełnię możliwości reaktora na stopionych solach można wykorzystać dopiero w cyklu torowo-uranowym ponieważ:

- Wykorzystuje się nowy materiał jądrowy – tor. Wykorzystanie go w innych typach reaktorów jest znacznie bardziej skomplikowane;
- Produkuje się dużo mniej transuranowców. Powstały z toru U233 produkuje mniej długożyciowych odpadów radioaktywnych niż U-235 i Pu-239. Do tego stopnia mniej, że można nawet wypalać transuranowce nagromadzone z innych typów reaktorów. Reaktor na stopionych solach może nawet stanowić ogniwo zamykające cykl paliwowy innych reaktorów – termicznych (PWR, BWR, HTR) i prędkich (FBR);
- Pracuje się w zamkniętym cyklu paliwowym co oznacza znacznie efektywniejsze wypalanie paliwa jądrowego bo paliwo prawie nie idzie do odpadów.
- Można zorganizować przeróbkę paliwa na miejscu, w budynku elektrowni, z wykorzystaniem ciepła odpadowego z reaktora.

Dzięki wysokiemu ciepłu właściwemu fluorków możliwe i łatwe będzie dostarczanie ciepła na odległości rzędu kilkuset metrów. To ciepło można będzie wykorzystać do zgazowywania węgla, produkcji paliw płynnych z węgla, produkcji wodoru.

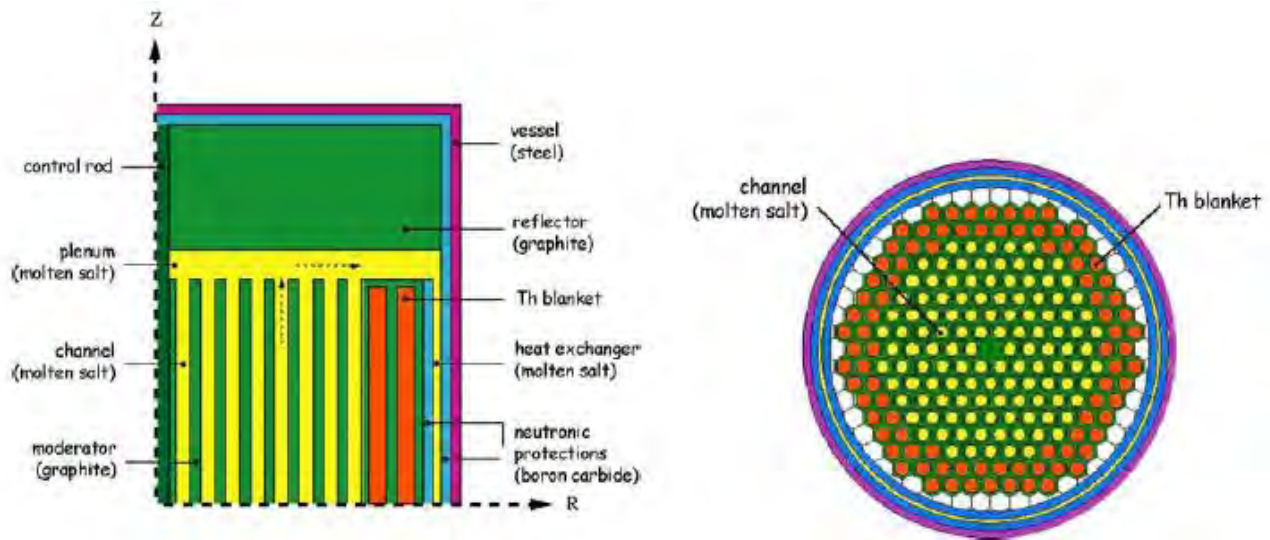
Powolny nawrót zainteresowania reaktorami MSR

Od czasów rezygnacji ORNL z reaktora MSBR tematyka toru w reaktorach na ciekłych solach przeżywa kryzys. Pracuje się raczej nad pirochemicznymi metodami przeróbki paliwa wypalonego. Przy okazji opracowuje się koncepcje wykorzystania reaktorów na stopionych solach do wypalania transuranowców. Pewne, nieduże pieniądze na tę tematykę daje Unia Europejska w ramach Programów Ramowych (FP): FP5 – projekt MOST, FP6 – projekt ALISIA, FP7 – projekt ACSEPT. Największe zaangażowanie w problematykę reaktorów na stopionych przejawiają Francja, Rosja, Japonia, Korea, USA i Czechy. Prace te mają głównie formę analiz komputerowych. We Francji, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) na bazie MSBR opracowano koncepcję reaktora TMSR (Thorium Molten Salt Reactor). Przebadano liczne konfiguracje reaktora poczynając od zbliżonej do MSBR (z matrycą grafitową) po bez grafitu.

Schemat rdzenia reaktora TMSR pokazany jest na Rys. 2. Położenie rdzenia definiuje matryca złożona z heksagonalnych elementów grafitowych z kanałem w środku. Paliwo stanowi mieszanina fluorków o składzie 70% 7LiF - 17.5% BeF₂ - 1.5% UF₄ - 11% ThF₄, gdzie U oznacza izotop U233. Matryca grafitowa tworzy dwie strefy. W pierwszej, centralnej kanały paliwowe mają promień 5.5 cm a w drugiej, skrajnej zwanej płaszczem 8.45 cm. W strefie centralnej neutrony są silnie moderowane i głównie w niej zachodzi rozszczepienie uranu. Dlatego strefa ta nazywa się strefą

ELEKTROWNIE JĄDROWE

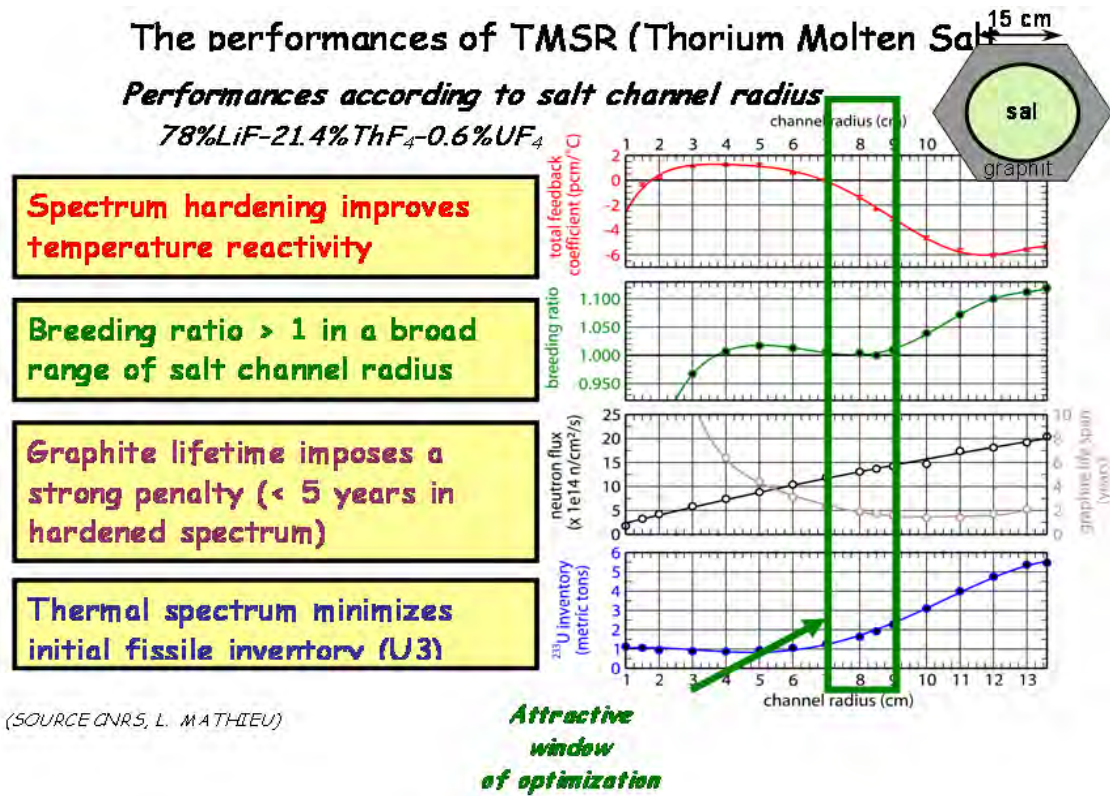
rozszczeniową. W płaszczu jest mniej grafitu, widmo neutronów jest twardsze³, rozszczepień jest mniej i zawarty w paliwie tor wychwytuje neutrony uciekające ze strefy centralnej. Płaszcz stanowi strefę paliworodną.



Rys. 3 Przekrój pionowy i poziomy reaktora TMSR

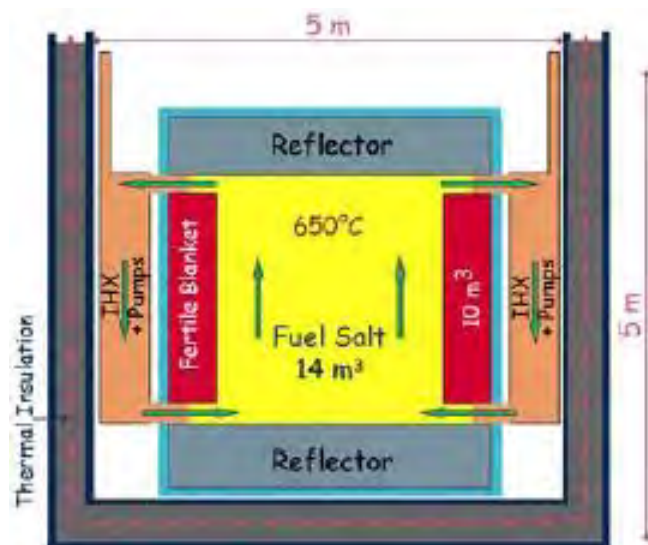
Na początku (lata 90-e XX wieku) sprawdzono czy współczesne programy do obliczeń reaktorów potwierdzą wyniki otrzymane dla MSBR w latach 70-ych. Stwierdzono, że dla niektórych konfiguracji podobnych do MSBR temperaturowe współczynniki reaktywności mogą stać się dodatnie ale można znaleźć taką konfigurację (promień kanału paliwowego 7-9 cm) dla której reaktor jest i bezpieczny i powielający.

³ Tzn. procentowo jest w nim więcej neutronów o wyższych energiach niż w strefie centralnej lub innymi słowami średnia energia jego neutronów jest wyższa niż w strefie centralnej



Rys. 4 Parametry reaktora TMSR w funkcji promienia kanału paliwowego. Zielona ramka pokazuje zakres zmienności promienia, w którym spełnione są wszystkie wymagania (temp. współczynnik reaktywności < 0, współczynnik powielania ≥ 1 , itd.).

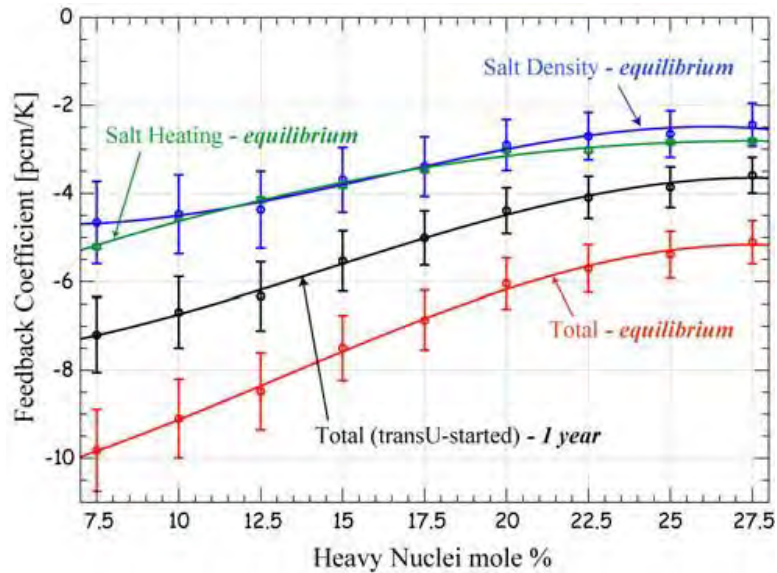
Przeprowadzono także podobne analizy [6] dla reaktora prędkiego - bez grafitu w rdzeniu - nazwanego TMSR-NM (TMSR Non Moderated). Zrezygnowano z soli czteroskładnikowej ${}^7LiF-BeF_2-ThF_4-UF_4$ na rzecz trójskładnikowej ${}^7LiF-ThF_4-UF_4$. Taka konfiguracja nadaje się nie tylko do produkcji energii ale także do wypalania aktywnoców.



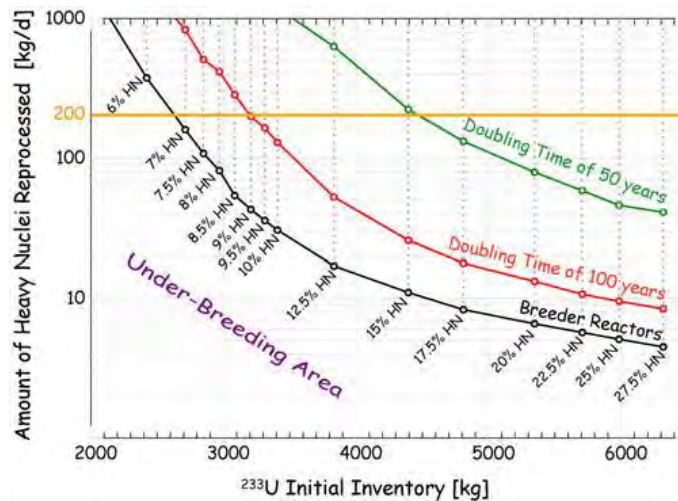
Rys. 5 Schemat przekroju pionowego reaktora TMSR-NM

ELEKTROWNIE JĄDROWE

Obliczenia wykazały, że ta konfiguracja jest dużo bezpieczniejsza od tej z grafitem – rys. 5. Wymaga jednak więcej materiału rozszczepialnego na początku kampanii paliwowej. Do tego by reaktor stał się powielający niezbędna jest przeróbka paliwa już w trakcie kampanii.

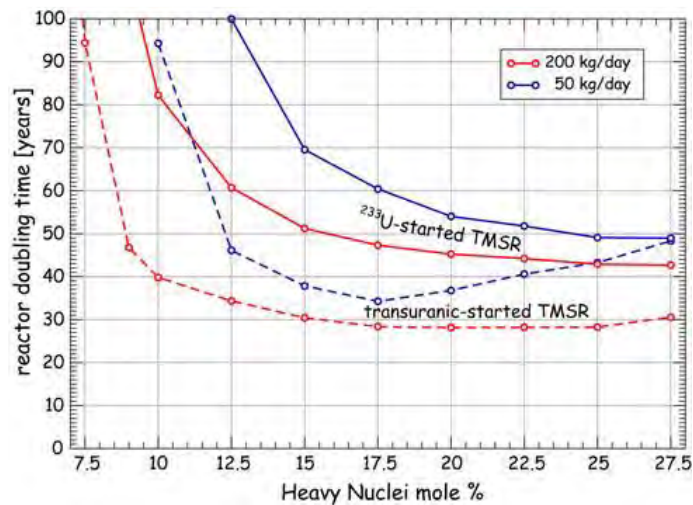


Rys. 6 Temperaturowy współczynnik reaktywności reaktora TMSR-NM w funkcji procentowej zawartości ciężkich jąder.



Rys. 7 Wymagana szybkość przeróbki paliwa w funkcji początkowej ilości materiału rozszczepialnego.

Im szybsza przeróbka tym mniej materiału rozszczepialnego potrzeba jest na początku i tym krótszy jest okres podwojenia paliwa.



Rys. 8 Okres podwojenia paliwa reaktora TMSR-NM w funkcji zawartości ciężkich jąder.

Tu także widać, że im szybsza przeróbka paliwa wypalonego tym krótszy okres podwajania. Ponadto używając w fazie początkowej transuranowców (głównie plutonu) pochodzących z paliwa wypalonego przez obecne elektrownie jądrowe skraca się okres podwajania paliwa w porównaniu z ^{233}U jako materiałem rozruchowym.

Ostatecznie to wersja TMSR-NM została wybrana jako bazowa dla francuskiego programu badawczego poświęconego wdrażaniu torowego cyklu paliwowego [10].

Bardzo podobne do TMSR-NM studia zostały przeprowadzone w Rosji. Opracowano koncepcję reaktora MOSART (Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter) [11] nastawionego głównie na wypalanie aktynowców. Podstawowa konfiguracja miała w rdzeniu sól o składzie 58%NaF-15%LiF-27%BeF₂-0.8%AnF₃. Charakteryzowała się dobrą rozpuszczalnością soli aktynowców i lantanowców – ponad 2% molowe przy temperaturze 600°C.

Zupełnie niedawno pojawiła się informacja, która może przyspieszyć rozwój energetyki jądrowej opartej na torze [12]. 25.01.2011 na dorocznej konferencji Chińskiej Akademii Nauk ogłoszono, że Chiny rozpoczęły realizację projektu badawczego TMSR (Thorium Molten Salt Reactor). Przewidywany czas realizacji projektu 20 lat. Wiadomość ukazała się w czasopiśmie Wenhui News i na Energy from Thorium Discussion Forum. Kierownikiem projektu jest Dr. Jiang Mianheng – syn Jang Zemin'a, byłego prezydenta ChRL a obecny vice-przewodniczący Chińskiej Akademii Nauk. Dr. Jiang Mianheng jest absolwentem Uniwersytetu Drexel'a.

Podsumowanie

Koncepcja reaktora na stopionych solach powstała już w latach 40-ch XX wieku. W latach 60-yh USA zbudowały reaktor badawczy MSRE o mocy 8 MWt. Parametry reaktora okazały się na tyle dobre, że USA opracowały projekt reaktora energetycznego MSBR o mocy 1000 MWe. Wymagania reaktora przerosły jednak możliwości ówczesnej technologii i na początku lat 70-yh USA zrezygnowały z wdrożenia MSBR.

20 Obecne prace nad zastosowaniem reaktorów na stopionych solach mają głównie charakter koncepcyjny. Najciekawsze z nich to francuska koncepcja TMSR-NM i rosyjska MOSART.

Wzrastający udział energetyki jądrowej w ogólnym bilansie energetyki światowej doprowadzi przy obecnej gospodarce paliwem do wyczerpania zasobów uranu. Palącą staje się potrzeba wykorzystania uranu zawartego w paliwie wypalonym przez obecne elektrownie, który idzie do odpadów radioaktywnych oraz wykorzystania toru. Reaktory na stopionych solach są w stanie rozwiązać oba te problemy. Trzeba jeszcze rozwiązać parę problemów – przeróbka paliwa w trakcie pracy reaktora, materiały konstrukcyjne. Z drugiej strony postęp technologii – kompozyty węglowo-węglowe jako nowe materiały konstrukcyjne, turbiny gazowe pracujące w zamkniętym cyklu Braytona ułatwi wdrożenie reaktorów na stopionych solach w energetyce. Prawdopodobnie nastąpi to po roku 2040.

Literatura

1. P. N. Haubenreich and J. R. Engel, "[Experience with the Molten Salt Reactor Experiment](#)," Nucl. Appl Technol., 8, 118 (1970).
2. WASH-1222 - An Evaluation of the Molten Salt Breeder Reactor
3. J. A. Lane, H. G. MacPherson, and F. Maslan, [Fluid Fuel Reactors](#), Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1958).
4. M. E. Whatley et al., "[Engineering Development of the MSBR Fuel Recycle](#)," Nucl. Appl. Tech., 8, 170 (1970).
5. H. E. McCoy et al., "[New Development in Materials for Molten Salt Reactors](#)," Nucl. Appl. Tech. 8, 156 (1970).
6. <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/gpr/publis-rsfE.htm> - literatura nt. TMSR-NM
7. Influence of the Processing and Salt Composition on the Thorium Molten Salt Reactor Elsa MERLE-LUCOTTE et al.
8. The Thorium Molten Salt Reactor: Launching the Thorium Cycle while Closing the Current Cycle; E. Merle-Lucotte et al. <http://energyfromthorium.com/2009/04/19/the-thorium-molten-salt-reactor-launching-the-thorium-cycle-while-closing-the-current-fuel-cycle/>
9. E. Merle-Lucotte et al. „Molten Salt Reactors and Possible Scenarios for Future Nuclear Power Deployment” PHYSOR 2004 - The Physic of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments Chicago, Illinois, April 25-29, 2004, on CD-ROM, American Nuclear Society, Lagrange Park, IL. (2004)
10. Thorium Cycle – Molten Salt Reactors; June 2008; The CNRS Research Program on the Thorium cycle and the Molten Salt Reactors; http://pacen.in2p3.fr/IMG/pdf/080607_CNRS_ThoriumMSR.pdf
11. V. V. Ignatiev et al., Progress in Development of Li,Be,Na/F Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter Concept; Proceedings of ICAPP 2007 Nice, France, May 13-18, 2007 Paper 7548
12. <http://energyfromthorium.com/2011/01/30/china-initiates-tmsr/>



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

AGNIESZKA BOETTCHER

GOSPODARKA ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI I WYPALONYM PALIWEM JĄDROWYM WE FRANCJI.

Francja jest największym w Europie producentem energii elektrycznej pochodzącej z elektrowni jądrowych. Eksploatacja 58 reaktorów jądrowych PWR (*Pressurized Water Reactor*) pozwala na pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną w 80%. We Francji znajdują się również zakłady produkujące paliwo do reaktorów jądrowych, a także zakłady przerobu wypalonego paliwa AREVA NC w La Hague. Przetwarzanie wypalonego paliwa pozwala na lepsze wykorzystanie zasobów uranu. Tak więc kraj ten posiada bogate doświadczenie w wykorzystaniu energii jądrowej.

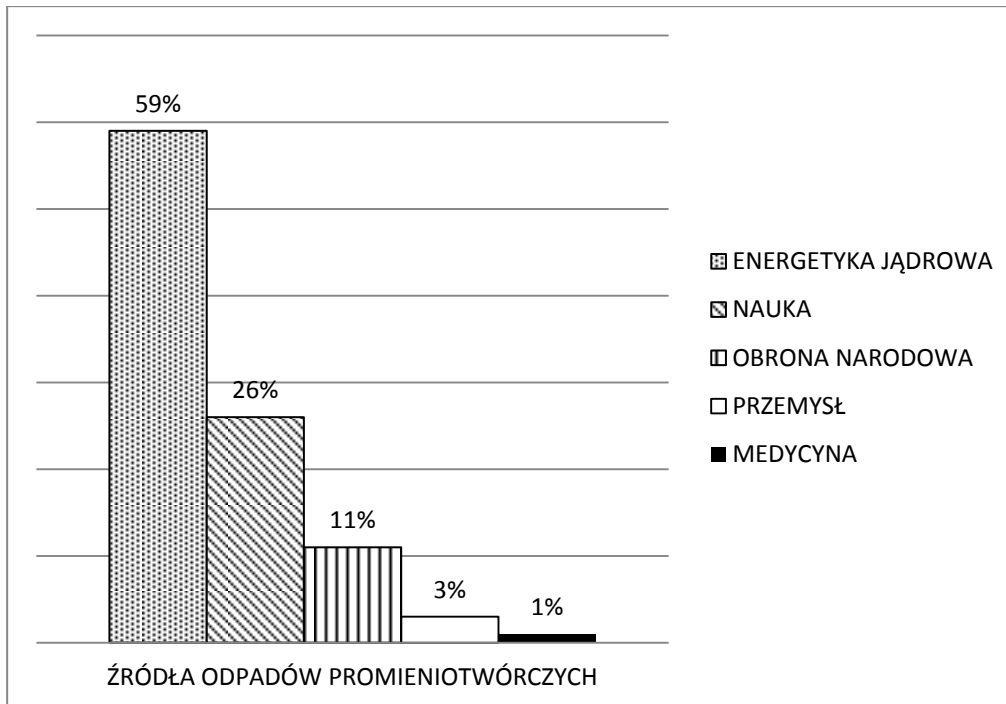
Odpady promieniotwórcze we Francji.

We Francji obowiązują następujące klasyfikacje odpadów promieniotwórczych:

1. ze względu na aktywność promieniotwórczą:
 - VLLW (*Very-Low-Level Waste*)- odpady bardzo nisko-aktywne, o aktywności 1-100Bq/g,
 - LLW (*Low-Level Waste*)- odpady nisko-aktywne, o aktywności 100-100 000Bq/g,
 - ILW (*Intermediate-Level Waste*)- odpady średnio-aktywne, o aktywności 100 000-100 000 000Bq/g,
 - HLW (*High-Level Waste*)- odpady wysoko-aktywne, o aktywności równej lub większej 10 miliardówBq/g.
2. ze względu na okres połowicznego zaniku:
 - VSL (*Very-Short-Lived*)- odpady bardzo krótko-życiowe, o okresie połowicznego zaniku <100 dni,
 - SL (*Short-Lived*)- odpady krótko-życiowe, o okresie połowicznego zaniku ≤ 31 lat,
 - LL (*Long-Lived*)- odpady długożyciowe, o okresie połowicznego zaniku >31 lat.

Źródła odpadów promieniotwórczych we Francji przedstawia Rys. 1. Prawie 60% odpadów promieniotwórczych związana jest z energetyką jądrową. Z czego 90% to odpady nisko i średnio-aktywne, składowane w powierzchniowych składowiskach odpadów promieniotwórczych, natomiast 10% objętości odpadów, stanowią odpady długo-życiowe o średniej aktywności, a także odpady wysoko-aktywne. Odpady wysoko-aktywne zostają wyselekcjonowane z wypalonego paliwa jądrowego, a następnie poddawane zeszkliwieniu i umieszczane w odpowiednich pojemnikach. Takie odpady mogą być składowane jedynie w geologicznych składowiskach odpadów promieniotwórczych. Planowany termin zakończenia budowy pierwszego takiego składowiska przewidziany jest na rok 2025. Do tego czasu, odpady wysoko-aktywne przechowywane są w Zakładach Przerobu Wypalonego Paliwa Jądrowego AREVA NC w La Hague (opis w części *Gospodarka wypalonym paliwem jądrowym*).

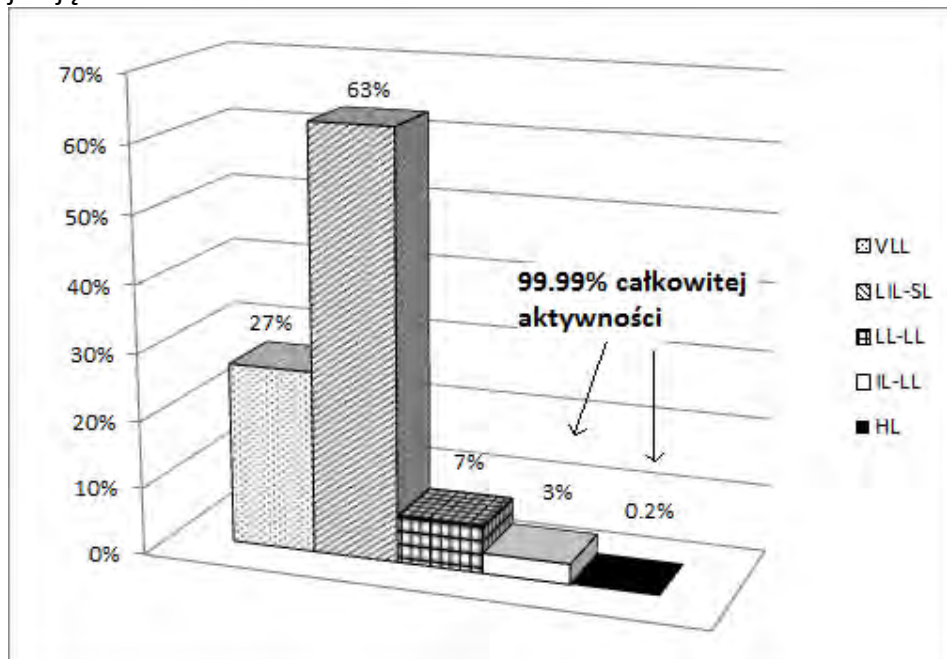
PALIWO JĄDROWE



Rys. 1 Źródła odpadów promieniotwórczych we Francji.

Udział procentowy poszczególnych rodzajów odpadów w całkowitej objętości wytworzonych odpadów promieniotwórczych, w 2010 roku przedstawia Rys. 2.

Okolo 80% stanowią odpady bardzo nisko-aktywne oraz odpady nisko i średnio-aktywne krótko-żyłowe. Odpady średnio-aktywne długo-żyłowe oraz odpady wysoko-aktywne stanowią mniej niż 4% całkowitej objętości.



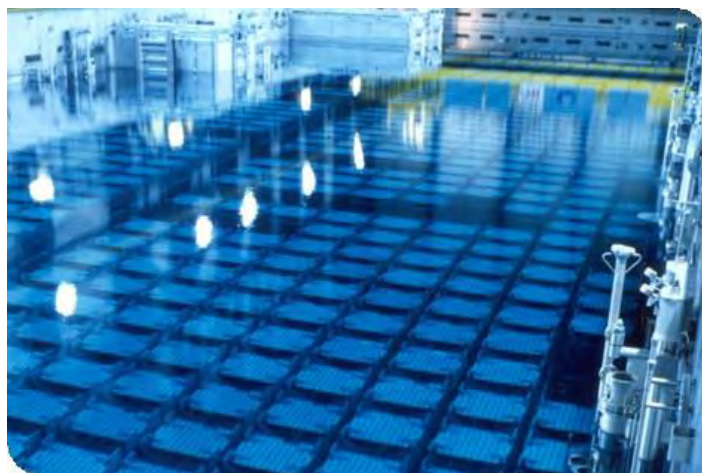
Rys. 2 Procentowy udział poszczególnych rodzajów odpadów promieniotwórczych w całkowitej ich objętości wytworzonej w 2010 roku.

Gospodarka wypalonym paliwem jądrowym.

Wszystkie francuskie reaktory energetyczne są typu PWR. Stosuje się w nich paliwo UOX (tlenek uranu) oraz paliwo typu MOX (mieszanina tlenków uranu i plutonu). Uran naturalny zawiera tylko 0.7 % rozszczepialnego izotopu U-235. Aby uzyskać samopodtrzymującą się i kontrolowaną reakcję rozszczepienia jądrowego w reaktorze, należy wyprodukować paliwo wzbogacone w U-235. We współczesnych reaktorach energetycznych wzbogacenie U-235 wynosi do 5%.

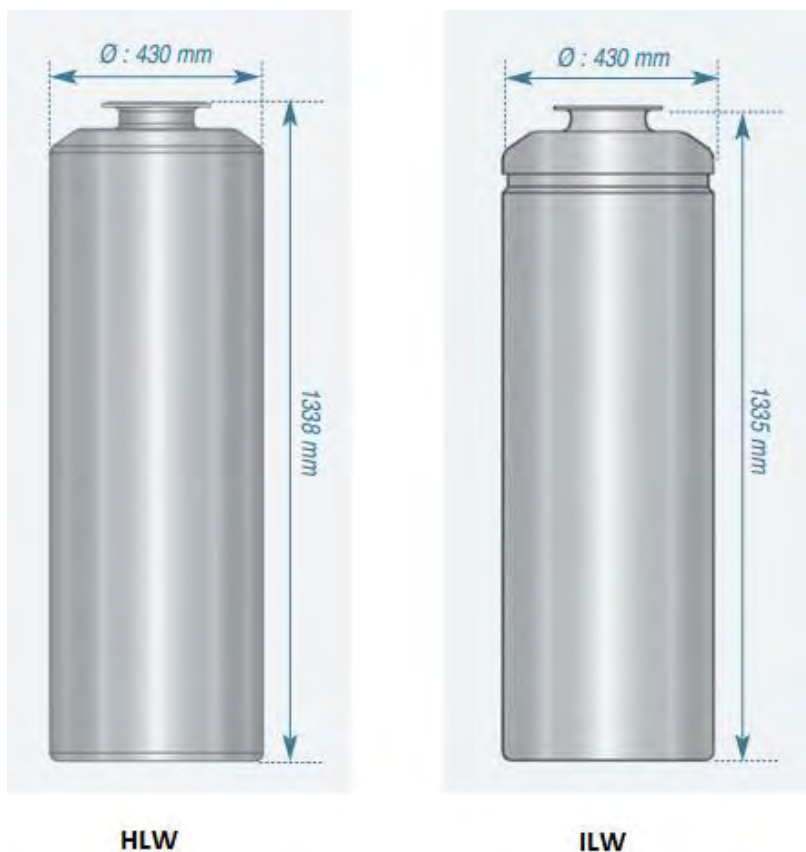
Wypalone paliwo uranowe zawiera głównie U-238, produkty rozszczepienia, niewypalony U-235, pluton, a także pomniejsze aktywnowce (ameryk, kaliforn, neptun, kiur i in.). Paliwo to jest silnie promieniotwórcze, co powoduje wydzielanie się znacznej ilości ciepła. Konieczne jest więc przechowywanie go, przez kilka lat, w przyreaktorowym basenie wypalonego paliwa, w celu schłodzenia. Następnie wypalone, schłodzone paliwo zostaje przewiezione do zewnętrznych przechowalników wypalonego paliwa lub do zakładu przerobu wypalonego paliwa.

We Francji, zakładem zajmującym się przerobem wypalonego paliwa jest AREVA NC w La Hague. Wypalone paliwo jądrowe przywozi się do zakładu przerobu wypalonego paliwa w suchych pojemnikach transportowych. Rozładunek następuje w odizolowanych i przystosowanych do tego pomieszczeniach. Kasety paliwowe są następnie sprawdzane pod kątem szczelności koszulek paliwowych i umieszczane w basenie wodnym. Cały proces rozładunku, kontroli i przeładunku do basenu odbywa się zdalnie, bez bezpośredniego kontaktu z człowiekiem. Głębokość basenu wynosi 9m, wysokość koszy z paliwem wynosi 5 m, co daje 4-ro metrową warstwę ochronną. Paliwo pozostaje w basenie przez okres 3-5lat (Rys. 3).



Rys. 3 Basen do przechowywania wypalonego paliwa w AREVA NC w La Hague.

Po tym czasie rozpoczyna się proces przerobu wypalonego paliwa jądrowego. Polega on, w pierwszej kolejności, na oddzieleniu mechanicznym wypalonego paliwa od koszulek, a następnie rozpuszczeniu paliwa we wrzącym kwasie azotowym. W wyniku procesów chemicznych, produkty rozszczepienia, uran i pluton zostają odseparowane. Odseparowany uran oraz pluton, może zostać wykorzystany do produkcji paliwa. Oddzielone mechanicznie, w pierwszym etapie przerobu wypalonego paliwa, części metalowe takie jak koszulki paliwowe stanowią odpad promieniotwórczy o średniej aktywności, natomiast produkty rozszczepienia i inne izotopy oddzielone w wyniku procesów chemicznych stanowią odpady wysoko-aktywne. Odpady wysoko-aktywne poddaje się procesowi witrafikacji (tzn. zeszkliwienia) i umieszcza je w specjalnych pojemnikach (Rys. 4).

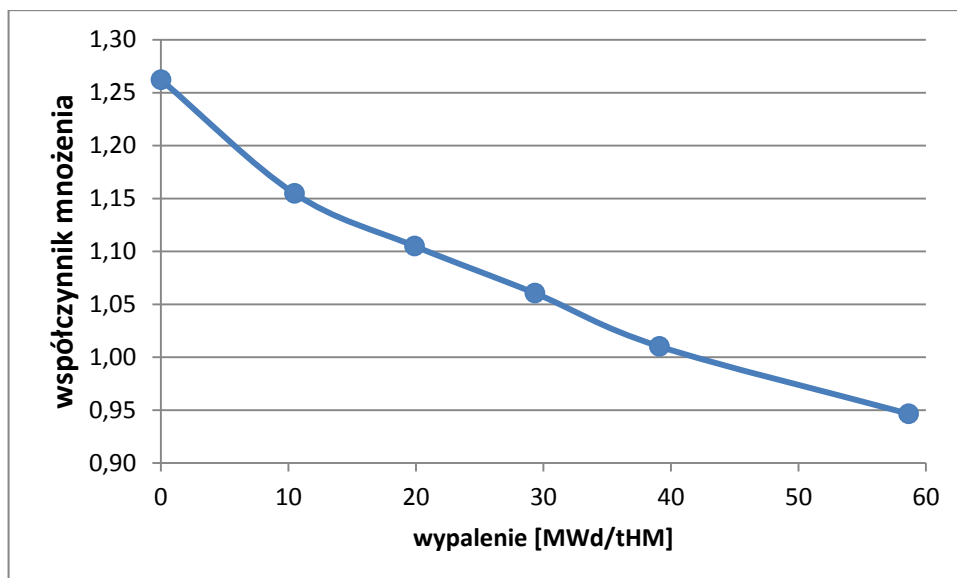


Rys. 4 Pojemniki na zwitryfikowane odpady wysoko-aktywne oraz sprasowane odpady średnio-aktywne.

Odzyskany uran i pluton, zostaje dostarczony do zakładów produkujących paliwo jądrowe. Zakład AREVA MELOX, który zajmuje się produkcją paliwa MOX, położony jest w departamencie Gard. W uranowym paliwie jądrowym materiałem rozszczepialnym jest izotop U-235, natomiast w paliwie MOX Pu-239, odzyskany z wypalonego paliwa lub pluton militarny. Paliwo MOX charakteryzuje się tym, że wzbogacenie w nim, w pluton, wynosi około 7-10%.

Zastosowanie paliwa MOX w jądrowych reaktorach energetycznych pozwala na ograniczenie zużycia zasobów naturalnych uranu. Ponadto do produkcji paliwa MOX wykorzystywany jest także pluton militarny. Recykling 7-miu kaset wypalonego paliwa UOX pozwala na wyprodukowanie 1 kasety paliwowej z paliwem MOX.

Na podstawie neutronowych obliczeń komputerowych, dokonuje się między innymi analiz możliwości zastosowania danego typu paliwa w reaktorach jądrowych. Parametrem charakteryzującym zdolność reaktora do uzyskania samopodtrzymującej się i kontrolowanej łańcuchowej reakcji rozszczepienia jest współczynnik mnożenia *keff*. Jeżeli jego wartość jest równa jedności, to liczba neutronów powstających w wyniku rozszczepienia jest równa liczbie neutronów pochłoniętych, a reaktor jest stabilny i produkuje energię. Paliwo ładowane do reaktora musi mieć *keff* większe od jedności, żeby zapewnić produkcję energii w reaktorze przez wymagany okres czasu. Przykład wyników obliczeń *keff* pojedynczego elementu z paliwem uranowo-plutonowym przedstawia Wykres 1. Paliwo w tym przykładzie składa się z uranu naturalnego, wzbogaconego 5% PuO₂ i umieszczone w koszulce cyrkonowej.



Wykres 1. Wartość współczynnika mnożenia w funkcji wypalenia elementu paliwowego z paliwem UO₂+5%PuO₂.

Powyższe wyniki, stanowią rezultat obliczeń wykonanych metodą Monte Carlo, za pomocą kodu MCNPX, w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Poza wyznaczeniem wartości współczynnika mnożenia określany jest także, między innymi, skład izotopowy w funkcji wypalenia, ilość powstających aktywności, rozkład gęstości mocy w przekroju poprzecznym i podłużnym.

Składowanie odpadów promieniotwórczych we Francji.

Organem odpowiedzialnym za składowanie odpadów promieniotwórczych we Francji jest Krajowa Agencja ds. Zarządzania Odpadami Radioaktywnymi ANDRA. ANDRA jest organem publicznym odpowiedzialnym za długoterminowe zarządzanie wszystkimi odpadami promieniotwórczymi, nadzorowanym przez Ministerstwo Ekologii, Energii, Zrównoważonego Rozwoju i Morza oraz Ministerstwo Badań Naukowych. Podstawowymi kierunkami działania Agencji ANDRA są:

- bezpieczne i długoterminowe przechowywanie odpadów promieniotwórczych,
- określenie kryteriów przyjęcia odpadów promieniotwórczych do składowania, jak również poszukiwanie lokalizacji, budowy, eksploatacji, zamykanie i monitorowanie składowisk,
- aktywna polityka dialogu z zainteresowanymi stronami, na poziomie krajowym oraz lokalnym, a także regularna publikacja inwentaryzacji składowanych odpadów oraz wyników monitoringu.

W zależności od rodzaju odpadów promieniotwórczych mogą być one składowane w różnych typach składowisk (Tabela 1). Ponadto rodzaj odpadów promieniotwórczych determinuje kryteria, które musi spełnić producent odpadów, aby zostały one przyjęte na składowisko. Głównym kryterium jest sposób kondycjonowania (przygotowania do składowania) odpadów promieniotwórczych. Operator składowiska po otrzymaniu odpadów sprawdza czy spełniają one kryteria i decyduje o ich przyjęciu lub odesłaniu do producenta.

PALIWO JĄDROWE

	SL (odpady krótko-życiowe)	LL (odpady długo-życiowe)
VLLW (odpady bardzo nisko-aktywne)	SKŁADOWISKO POWIERZCHNIOWE- CSTFA	
LLW (odpady nisko-aktywne)	SKŁADOWISKO POWIERZCHNIOWE- CSFMA	SKŁADOWISKO PRZYPOWIERZCHNIOWE
ILW (odpady średnio-aktywne)		planowany termin otwarcia: 2025 rok
HLW (odpady wysoko-aktywne)	SKŁADOWISKO GEOLOGICZNE	

Tabela 1 Rodzaje składowisk w zależności od klasyfikacji odpadów promieniotwórczych.

We Francji istnieją trzy składowiska odpadów promieniotwórczych, a ich operatorem jest ANDRA. Są nimi: CSM- nieczynne, powierzchniowe składowisko odpadów nisko- i średnio- aktywnych; CSTFA- powierzchniowe składowisko odpadów bardzo nisko- aktywnych oraz CSFMA- powierzchniowe składowisko odpadów nisko- i średnio- aktywnych. Prowadzone są również prace nad budową geologicznego składowiska odpadów wysoko-aktywnych oraz średnio-aktywnych długo-życiowych(Tabela 2).

	SKŁADOWISKA			
Tryb zarządzania	Zamknięte, monitorowane (dystrykt Manche)	Eksploatowane (dystrykt Aube)		W fazie badań (dystrykt Meuse i Haute-Marne)
	CSM	CSTFA	CSFMA	składowisko geologiczne
Rodzaj odpadów promieniotwórczych	nisko- i średnio-aktywne (LILW)	bardzo nisko-aktywne (VLLW)	nisko- i średnio-aktywne krótko-życiowe (LILW- SL)	średnio-aktywne długo-życiowe oraz wysoko-aktywne (ILW-LL, HL)

Tabela 2. Model zarządzania odpadami promieniotwórczymi we Francji.

Powierzchniowe składowisko odpadów promieniotwórczych o bardzo niskiej aktywności (CSTFA) w dystrykcie Aube, zostało oddane do eksploatacji w 2003 roku. Pojemność tego składowiska wynosi 650 000m³. W 2010 roku na składowisku znajdowało się 174 384m³ odpadów, tj. 27% całkowitej pojemności. Do odpadów bardzo nisko-aktywnych zaliczane są gruz, ścinki metalu i inne materiały pochodzące z likwidowanych obiektów jądrowych, jak również z nie-jądrowych zakładów wykorzystujących materiały radioaktywne. Zanim odpady promieniotwórcze zostaną umieszczone na składowisku muszą zostać odpowiednio przygotowane.

Odpady VLLW pochodzą głównie z obiektów jądrowych. Producent odpadów jest zobowiązany do ich odpowiedniego przygotowania przed wysyłką. Odpady bardzo nisko-aktywne umieszcza się w metalowych kontenerach lub w plastikowych torbach. Po odpowiednim opakowaniu odpadów oraz przygotowaniu ich dokumentacji, zostają one przewiezione ciężarówką na składowiska. Następnie operator składowiska dokonuje pomiaru aktywności dostarczonych

odpadów. W momencie przyjęcia odpadów, spoczywa na nim odpowiedzialność za nie. Otrzymane odpady poddaje się sprasowaniu, kolejnej kontroli radiologicznej i składowaniu.

Składowisko odpadów bardzo nisko-aktywnych jest składowiskiem powierzchniowym, gdzie odpady umieszczane są w kilkudziesięcio-metrowych rzędach, w niewielkim zagłębieniu, w ziemi. Podczas zapełniania danego rzędu umieszczana jest nad nim mobilna osłona. Sposób zarządzania i gospodarowania tego typu składowiskiem odpadów promieniotwórczych jest prawie taki sam jak w przypadku składowisk odpadów komunalnych. Wypełniony rząd pokrywa się grubą, nieprzepuszczalną folią, na którą w dalszej kolejności nanosi się warstwę nieprzepuszczalnych glin, glebę, a ostatecznie na wykorzystanym obszarze sieje się trawę. System drenażu pozwala na stałe monitorowanie odcieków. Równomiernie rosnąca i systematycznie koszona trawa również stanowi element monitoringu, który pozwala na szybkie zauważenie osuwania się ziemi jak również tworzenie się zapadlisk.

Powierzchniowe składowisko odpadów krótko-życiowych o niskiej i średniej aktywności (CSFMA) zlokalizowane jest w dystrykcie Aube. Do końca 1994 roku odpady te były składowane na składowisku (CSM) w Manche. Eksploatacja CSFMA została rozpoczęta w 1992 roku, a jego pojemność wynosi 1 000 000m³, z czego do końca 2010 roku złożono 243 225m³ odpadów. Odpady dostarczone przez producenta w metalowych lub betonowych beczkach, umieszczane są w betonowych kontenerach, których długość i szerokość wynosi 25m, a wysokość 8m. W miarę potrzeb kontenery są systematycznie dobudowywane.

Na odpady krótko-życiowe o niskiej i średniej aktywności głównie składają się rękawiczki i ubrania ochronne, skażone między innymi podczas prowadzenia prac konserwacyjnych w elektrowniach jądrowych, a także prac prowadzonych w laboratoriach naukowych, szpitalach, uniwersytetach. Zanim odpady stałe trafią na składowisko zostają sprasowane, natomiast odpady ciekłe poddaje się zestaleni. Sprasowane i zestalone odpady krótko-życiowe nisko- i średnio-aktywne umieszczane są w metalowych lub betonowych beczkach. Tak przygotowane odpady producent dostarcza do operatora składowiska, gdzie tak jak w przypadku odpadów VLLW, poddawane są one inspekcji radiologicznej. Część skontrolowanych beczek, przed umieszczeniem ich w betonowych kontenerach, poddawanych jest kompaktacji. Kiedy betonowy kontener jest już wypełniony, beczki zasypuje się piaskiem oraz zalewa betonem. W ten sposób odpady odizolowane są od środowiska. Kontenery wyposażone są w system odprowadzający wodę. Dzięki temu możliwe jest stałe monitorowanie czy w kontenerach nie doszło do rozszczelnienia pojemników i migracji radionuklidów.

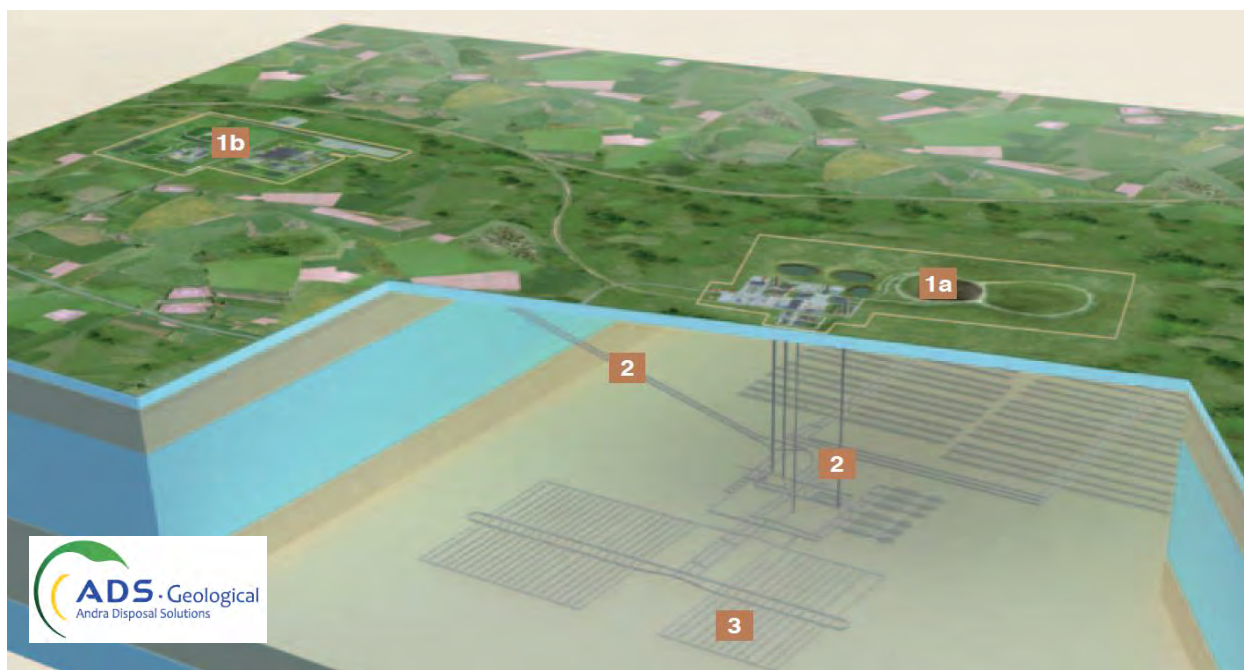
W grudniu 1991 roku ANDRA rozpoczęła prace przygotowawcze do budowy geologicznego składowiska odpadów wysoko-aktywnych oraz długo-życiowych o średniej aktywności. Siedem lat później dokonano wyboru lokalizacji składowiska, przeprowadzono konsultacje społeczne oraz uzyskano licencję na rozpoczęcie badań. Budowa podziemnego laboratorium została rozpoczęta w 2000 roku. Zadaniem laboratorium jest prowadzenie badań, mających na celu określenie czy pierwotnie określone warunki geologiczne, na podstawie badań powierzchniowych i odwiertów, pozwalają na budowę geologicznego składowiska odpadów HLW i ILW-LL. W 2005 roku przedstawiony został raport dla rządu francuskiego, dotyczący studium wykonalności geologicznego składowiska odpadów promieniotwórczych w dystryktach Meuse/Haute-Marne oraz przeprowadzono debatę publiczną. Od momentu budowy laboratorium nieustannie prowadzone są badania oraz monitoring górotworu. Przeprowadzono także próbne odwierty poziomych korytarzy, w których będą umieszczane kontenery z odpadami. Przewidywany termin oddania składowiska do eksploatacji to 2025 rok.

PALIWO JĄDROWE

Na terenie wszystkich wyżej wspomnianych składowisk odpadów promieniotwórczych zlokalizowane są centra informacyjne, do których każdy może przyjść, aby uzyskać informacje na temat danego obiektu. Składowiska oraz podziemne laboratorium są stale odwiedzane przez wycieczki. Centrum informacyjne, przy laboratorium podziemnym, organizuje również warsztaty dla dzieci, podczas których mogą one nie tylko poznać zjawisko promieniotwórczości, ale również uzyskać informacje na temat geologii, obejrzeć na wystawie skamieniałości, minerały, a nawet, dzięki przygotowanym stanowiskom paleontologicznym, mogą na chwilę zostać paleontologami odnajdującymi skamieniałe szczątki organizmów żywych takich jak jaszczurki, ryby czy amonity. Polityka rzetelnej informacji prowadzona we Francji powoduje, że ludzie czują się bezpiecznie. Ponadto na obszarach gdzie są zlokalizowane składowiska, poza monitoringiem środowiska prowadzonym przez ANDRĘ, równoległe i niezależnie badania przeprowadzają komitety społeczności lokalnej.

Źródłem wiedzy zawartej w artykule są informacje uzyskane podczas tygodniowego szkolenia we Francji, organizowanego przez ANDRĘ, oraz opracowania dostępne na oficjalnych stronach internetowych firm AREVA i ANDRA (<http://www.aveva.com/EN/operations-1092/aveva-la-hague-recycling-used-fuel.html>; <http://www.andra.fr/index.html>).

Agnieszka Boettcher
Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku
Instytut Fizyki UŚ w Katowicach, ZFJiZ



Geologiczne składowisko dla odpadów HL i IL / LL, (Centrum industriel de stockage géologique – Cigéo Przemysłowe Centrum Składowania Geologicznego) będzie obejmować instalacje na powierzchni do przygotowania pakietów z odpadami, jak również podziemne pomieszczenia do składowania

JACEK T. KANIEWSKI

CZY MOŻE ZABRAKNAĆ URANU DLA ENERGETYKI JĄDROWEJ ?

Wstęp

Materiałem jądrowym stosowanym powszechnie w paliwie reaktorowym jest obecnie uran. Zawiera on izotop U-235, który jest łatwo rozszczepialny przy bardzo małych energiach neutronów, tzw. energiach termicznych. Właściwość tę wykorzystuje się w prawie wszystkich obecnie eksploatowanych reaktorach, określanych jako „reaktory na neutronach termicznych”. Reaktory te, do których zaliczają się przewidziane do budowy w Polsce reaktory lekkowodne (LWR), zapewniają obecnie najtańszy sposób wytwarzania energii.

Wydobywany z zasobów geologicznych ziemi uran naturalny stanowi źródło pierwotne surowca niezbędnego do wytwarzania paliwa jądrowego. Od momentu wydobycia uranu zaczyna się cykl paliwowy energetyki jądrowej, który obejmuje kilka etapów jego transformacji niezbędnych do uzyskania gotowego wsadu paliwowego do reaktora. Ponieważ uran jest wydobywany z ziemi, podobnie jak wiele innych surowców, zadaje się czasem pytanie na jak długo go wystarczy. Pytania tego rodzaju są zrozumiałe biorąc pod uwagę obecne prognozy szybkiego wzrostu energetyki jądrowej i kilkudziesięcioletni okres eksploatacji reaktorów.

Wielkość światowych zasobów uranu, określona na podstawie informacji nadesłanych przez poszczególne państwa, podawana jest do wiadomości co dwa lata w przygotowywanym przez OECD/NEA we współpracy z IAEA (MAEA) obszernym raporcie zwanym potocznie „Red Book”. Raport ten zawiera ponadto dużą ilość informacji uzupełniających i wyjaśniających. Publikowane w nim dane są następnie przytaczane w różnych artykułach i wystąpieniach, zwykle bez wnikania głębiej w odpowiednie uwarunkowania i dodatkowe informacje. W wielu publikacjach stwierdza się na przykład, że przy zapotrzebowaniu elektrowni jądrowych opartych na eksploatowanych obecnie reaktorach termicznych takim, jakie jest ono obecnie, uranu wystarczy na około 100 do 300 lat, zależnie od tego jakie kategorie zasobów bierze się pod uwagę. W innych wyraża się wątpliwości, że jeżeli energetyka jądrowa będzie wzrastać, do czego będzie potrzeba coraz więcej uranu, to jego zasoby nadające się do eksploatacji wyczerpią się znacznie szybciej.

W przypadku uranu szacowany okres jego możliwej dostępności jest na ogół znacznie dłuższy, niż w przypadku wielu innych surowców naturalnych. Mimo to pytanie czy go wystarczy jest szczególnie uzasadnione przez fakt, że reaktory, które mamy budować i których czas eksploatacji ma wynosić 60 lat z możliwością przedłużenia do 80 lat, są inwestycjami bardzo kosztownymi. Trzeba zatem mieć pewność, że paliwa do nich nie zabraknie. W przypadku Polski oznacza to, że przewidywane do uruchomienia w latach 2023 - 2030 reaktory lekkowodne mogą potrzebować uranu nawet do około 2110 roku.

Poniższy artykuł próbuje wyjaśnić o jakich zasobach uranu jest mowa i jakie są wielkości tych zasobów według najnowszych danych opublikowanych latem 2012 roku w raporcie Red Book 2011 [1]. Przedstawia również najbardziej aktualne dane liczbowe dotyczące klasyfikacji i wielkości zasobów uranu, ich rozmieszczenia na świecie, innych źródeł materiałów jądrowych, efektów poszukiwań nowych zasobów uranu, mechanizmów regulujących równowagę w relacjach zapotrzebowanie – podaż. Szczególną uwagę poświęcono możliwości pozyskiwania uranu z nośników niekonwencjonalnych.

Niektóre z zagadnień poruszanych w tym artykule, a także tematycznie bliskich, były wyjaśniane w publikacjach, które pojawiły się w Polsce kilka lat temu [2,3]. Informacje przedstawione poniżej odnoszą się natomiast do stanu aktualnego, ze zwróceniem uwagi w dużej mierze na zagadnienia poprzednio nie poruszane.

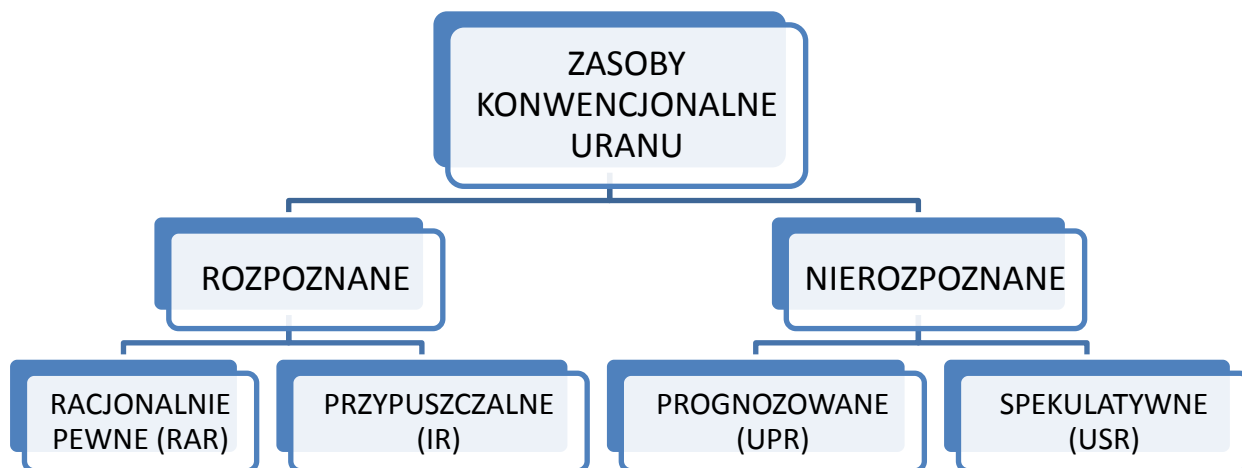
Światowe zasoby uranu

Na początek wymaga wyjaśnienia co rozumie się przez zasoby uranu, o wielkości których mówi się w różnych dokumentach, a następnie przytacza te dane w sposób uproszczony w dyskusjach publicznych. Przede wszystkim omówienia wymagają wspomniane we wstępie źródła pierwotne uranu, które tworzą zasoby zawarte w skorupie ziemskiej. Dzieli się je od szeregu lat na zasoby konwencjonalne i niekonwencjonalne.

Zasobami konwencjonalnymi są te, które pozwalają na technicznie możliwą i ekonomicznie rentowną produkcję odpowiednio do warunków występujących na etapie prowadzonych prac, przy czym uran może być uzyskiwany jako produkt, co-produkt lub produkt uboczny. Na przykład w kopalni miedzi Olympic Dam w Australii uran jest co-produktem a w kopalni złota Anglo-Gold w Południowej Afryce – produktem ubocznym.

Rozróżnia się dwie zasadnicze kategorie zasobów konwencjonalnych uranu: zasoby rozpoznane (nazywane czasem w polskich opracowaniach zasobami zidentyfikowanymi) (ang. *Known Recoverable Resources*), na które składają się zasoby racjonalnie pewne (ang. *Reasonably Assured Resources* - RAR) i zasoby przypuszczalne (ang. *Inferred Resources* - IR), oraz zasoby nierozpoznane (ang. *Undiscovered Resources*), na które składają się zasoby prognozowane (ang. *Undiscovered Prognosticated Resources* - UPR) i spekulatywne (ang. *Undiscovered Speculative Resources* – USR). Zasoby nierozpoznane są szacowane jedynie na podstawie wiedzy o strukturach geologicznych, o których wiadomo że muszą zawierać uran.

Stosowany obecnie podział zasobów konwencjonalnych uranu na kategorie przedstawia **rys.1**.



Rys. 1. Stosowany obecnie podział zasobów konwencjonalnych uranu na kategorie.

Światowe zasoby uranu zaliczane do konwencjonalnych przedstawia Tabela 1 na podstawie Red Book 2011. Ponieważ od czasu uzyskania odpowiednich danych, które dotyczą roku 2010, do

ich opublikowania w tym raporcie upłynęło około dwóch lat, są one już w pewnym stopniu przestarzałe. W międzyczasie nastąpiły odkrycia znacznych zasobów, o czym wiadomo np. z ukazujących się komunikatów Światowego Stowarzyszenia Przemysłów Jądrowych (World Nuclear Association, dalej wymieniane w skrócie WNA). Tym niemniej są to jedyne oficjalne, uporządkowane i dostępne informacje dotyczące zasobów uranu na świecie i w poszczególnych państwach i z tych powodów wszyscy się na nie powołują.

Zasoby uranu określone w powyższym źródle przedstawiono dla czterech grup kosztowych jego pozyskania. Najwyższa z nich została wprowadzona dopiero dwa lata wcześniej i stanowi około 25% zasobów rozpoznanych oraz około 7% zasobów nierozpoznanych.

<i>Kategorie zasobów uranu pierwotnego</i>	<i>Ilość uranu naturalnego w tonach wg zakwalifikowania do odpowiednich grup kosztowych, USD/kgU</i>			
	<40	<80	<130	<260
Zasoby racjonalnie pewne (RAR)	493 900	2 014 800	3 455 500	4 378 700
Zasoby przypuszczalne (IR)	187 000	1 063 700	1 871 700	2 717 900
łącznie zasoby rozpoznane	680 900	3 078 500	5 327 200	7 096 600
Zasoby prognozowane (UPR)	0	1 624 100	2 698 000	2 841 300
Zasoby spekulatywne (USR)	0	0	3 543 800	3 862 100
łącznie zasoby nierozpoznane	0	1 624 100	6 251 800	6 703 400
łącznie zasoby rozpoznane i nierozpoznane	680 900	4 702 600	11 579 000	14 800 000

Tab. 1. Światowe konwencjonalne zasoby uranu wg OECD/NEA-IAEA Red Book 2011.

Dane zawarte w tabeli wskazują na znaczny wzrost zasobów rozpoznanych na świecie w porównaniu z odpowiednimi danymi pochodzącymi z tego samego źródła opublikowanymi dwa lata wcześniej. Wielkość tego wzrostu wskazana jest w omówieniu zamieszczonego dalej rys.4.

Oprócz ilości podanych w tabeli 1 istnieją jeszcze dodatkowe zasoby rozpoznane wynoszące 124 100 tU, które zostały wykazane oddzielnie, a także zgłoszone zasoby spekulatywne bez określenia dla nich grupy kosztowej obejmujące dodatkowo 3 733 200 ton uranu. Biorąc te dodatkowe zasoby pod uwagę należy uznać, że **łącznie zasoby rozpoznane uranu wynosiły na koniec 2010 roku 7 220 700 ton, zaś nierozpoznane - 10 436 600 ton. Razem zasoby rozpoznane i nierozpoznane wynosiły zatem 18 657 300 ton uranu.**

Biorąc pod uwagę, że światowe roczne zapotrzebowanie energetyki jądrowej odpowiadało w 2011 roku około 63 000 tonom uranu naturalnego można stwierdzić, że wszystkie obecnie znane i szacowane konwencjonalne zasoby uranu na świecie, mogłyby wystarczyć przy takim poziomie zapotrzebowania na:

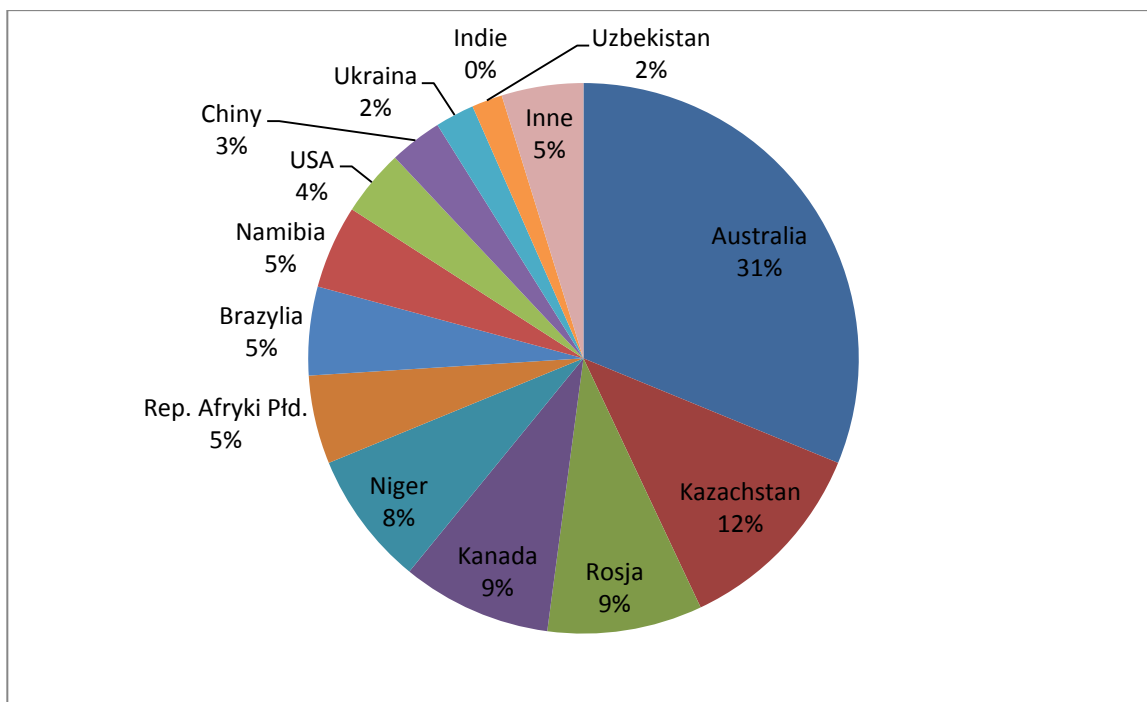
- 115 lat w przypadku tylko zasobów rozpoznanych
- 296 lat w przypadku zasobów rozpoznanych i nierozpoznanych łącznie

Warto w tym miejscu zauważyć, że ocena OECD/NEA zawarta w Red Book 2005 czyli sześć lat wcześniej wskazywała w przypadku zasobów rozpoznanych, że mogą one wystarczyć na 100 lat, a dla obu tych kategorii – 300 lat. Pomimo iż przez tych sześć lat wydobyto już 272 353 tony uranu [4] jego zasoby rozpoznane wystarczą na dłużej niż oceniano poprzednio.

Zasobami niekonwencjonalnymi są takie zasoby, w których uran występuje w bardzo małych koncentracjach, niekiedy obok innych interesujących surowców. Wówczas jego pozyskanie może być opłacalne na przykład przy okazji wydobycia tych surowców, lub w przypadku zastosowania nietypowych technologii wydobycia zapewniających jego opłacalność przy niskich koncentracjach uranu. Niekonwencjonalne zasoby uranu stanowią poważne uzupełnienie zasobów konwencjonalnych. Jak dotąd jedynym niekonwencjonalnym źródłem uranu o znaczeniu praktycznym były fosforyty, z których wytwarzany jest kwas fosforowy i nawozy sztuczne. Zawartość w nich uranu leży normalnie w przedziale od 70 do 200 ppm (0,007 – 0,02%), ale zdarza się nawet 800 ppm. W ostatnich latach stały się one przedmiotem większego niż dotychczas zainteresowania, jakkolwiek wydobywano z nich uran już znacznie wcześniej, gdy uzasadniały to ówczesne wysokie ceny uranu.

Według danych zawartych w Red Book 2011, zgodnie z obecnie posiadaną wiedzą, tylko w fosforytach znajduje się 7,0 do 7,5 miliona ton uranu. Gdyby go wydobyć to przy obecnym zapotrzebowaniu na uran wystarczyło by go na dodatkowych 115 - 120 lat. Podane wyżej liczby są prawdopodobnie zaniżone ponieważ według ocen [5] fosforyty na świecie mogą zawierać znacznie więcej uranu niż podaje Red Book 2011, mianowicie od 9 do 22 mln ton. Wprawdzie zasoby uranu zawarte w fosforytach maleją w miarę ich eksploatacji do celów produkcji kwasu fosforowego i nawozów sztucznych, a ponadto nie wszędzie pozyskiwanie uranu tą drogą byłoby opłacalne, to jednak możliwości pokrycia zapotrzebowania energetyki jądrowej na uran byłyby niebagatelne gdyby rozpocząć pozyskiwanie uranu z tego źródła na szeroką skalę. Drugim co do potencjalnych możliwości wykorzystania są łupki czarne, których ilość wg Red Book 2011 miała wynosić łącznie ponad 700 tysięcy ton uranu. Dotychczasowe dane dotyczące ilości uranu zawartych we wszystkich rodzajach zasobów niekonwencjonalnych w skali światowej (nie licząc wody morskiej) wydają się być znacznie zaniżone ponieważ albo nie były one dotąd raportowane w sposób systematyczny, albo niektóre kraje w ogóle nie udostępniały odpowiednich informacji.

Rys. 2 przedstawia względne udziały w światowych zasobach uranu 13 krajów, których zasoby uranu należące do grupy kosztowej < 130 USD/kgU są największe i które obecnie są producentami uranu. Nie brano pod uwagę wspomnianych w tekście dodatkowych zasobów uranu.



Rys.2. Względny udział krajów o największych zasobach uranu w światowych zasobach rozpoznanych uranu w grupie kosztowej < 130 USD/kgU.

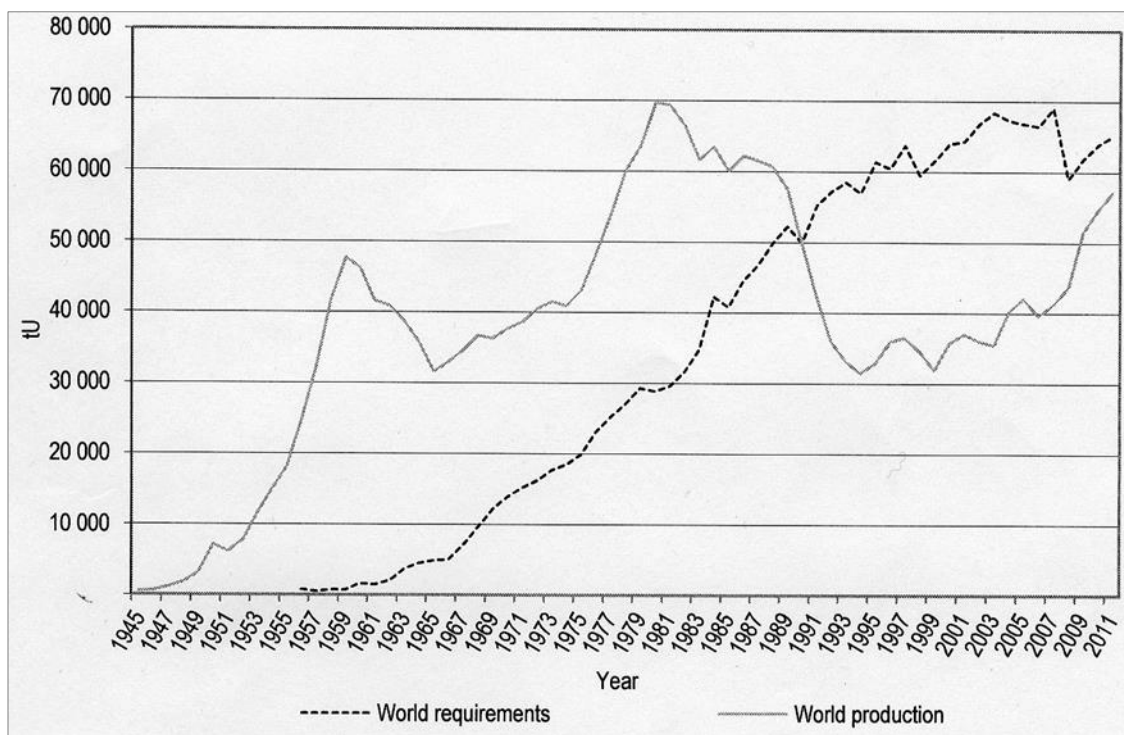
Największe zasoby rozpoznane uranu posiada Australia, która według danych zawartych w Red Book 2011 ma 31,2% zasobów światowych w grupie kosztowej ich wydobycia < 130 USD/kgU, a w grupie < 260 USD/kgU – 24,5%.

Jeśli chodzi o zasoby niekonwencjonalne to większość zasobów uranu zawartych np. w fosforytach znajduje się w Maroko, Brazylii, USA, Jordanii, Tunezji i Egipcie, przy czym Maroko posiada ponad 90% wszystkich zasobów. Jako kraje wydobywające fosforyty wymienia się także Afrykę Południową, Algierię, Chiny, Izrael, Rosję, Syrię i Tunezję. Brakuje danych dla Wietnamu, które także eksploatują swoje zasoby fosforytów.

Źródła wtórne materiałów jądrowych

Nie wdając się w szczegóły dotyczące zasilania indywidualnych reaktorów w paliwo jądrowe można dokonać ogólnego stwierdzenia, że w skali światowej od około 1990 roku zapotrzebowanie reaktorów na uran nie jest pokrywane w pełni przez uran pierwotny. Sytuację dotyczącą zapotrzebowania na uran oraz wielkości jego wydobycia począwszy od 1945 roku ukazuje rys. 3.

PALIWO JĄDROWE



Rys.3. Roczne wielkości produkcji uranu i zapotrzebowania energetyki jądrowej na uran w latach 1945 – 2011 (Źródło: OECD/NEA Red Book 2011). Linia przerywaną zaznaczono światowe zapotrzebowanie na uran naturalny, linią ciągłą – wielkość jego produkcji.

W przeważającym okresie do 1990 r. miało miejsce wydobycie uranu znacznie przekraczające potrzeby energetyki jądrowej. W latach „zimnej wojny” było ono w znacznym stopniu zdeterminowane wyścigiem zbrojeń atomowych. Na późniejszy stosunkowo gwałtowny spadek wydobycia uranu wpłynęło kilka czynników, w tym zahamowanie wzrostu energetyki jądrowej po awarii w Czarnobylu w 1986 r. i powiązany z tym spadek cen uranu, który się dalej pogłębiał w wyniku zawartych traktatów rozbrojeniowych i udostępnienia do celów cywilnych uranu pochodzącego z demontażu broni jądrowej.

Porównując ze sobą pola ograniczone krzywymi na rys. 3 i osią odciętych widać, że ilość wydobytego uranu naturalnego jest znacznie większa niż uranu, który był wykorzystany w reaktorach energetycznych. Na koniec 2010 r. różnica ta wynosiła 590 000 ton, czyli około 8% wszystkich zasobów rozpoznanych uranu na świecie. Niewielka część tego została wykorzystana w reaktorach o innym przeznaczeniu, część należy do sektorów wojskowych mocarstw jądrowych, ale jakaś część tworzy także zapasy cywilne.

Jak widać z rys. 3 w latach 1994 – 2006 występowała ogromna różnica między zapotrzebowaniem energetyki jądrowej na uran a produkcją uranu, a mimo to reaktory były zasilane w paliwo. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu, mówiąc ogólnie, źródeł wtórnych materiałów jądrowych.

Jednym ze źródeł wtórnych był (i nadal jest) wspomniany wyżej uran pochodzący z demontażu głowic jądrowych.

Zapasy uranu stanowią następne źródło wtórne przy czym są one zarówno zużywane jak i stale tworzone, ale działania w obu tych kierunkach są podejmowane w różnych miejscach na świecie. Według danych przedstawionych w Red Book 2011 zapasy cywilne na świecie wynosiły w 2010 roku co najmniej 40 482 tony uranu naturalnego oraz uran wzbogacony w ilości odpowiadającej 34 671 tonom uranu naturalnego co daje łącznie ponad 75 000 ton w przeliczeniu na uran naturalny.

Jednak niewiele wiadomo ile uranu naprawdę znajduje się w zapasach cywilnych ponieważ część krajów nie decyduje się, ze względu na poufność danych, na podanie odpowiednich informacji o zapasach należących do producentów, konsumentów lub rządów.

Innym źródłem wtórnym stał się w ostatnich latach uran zubożony, pochodzący z dawniejszych kampanii wzbogacania izotopowego, w którym pozostawiono na tyle dużo U-235, że opłacalne może być poddanie go wzbogaceni w nowoczesnych instalacjach ultra-wirówkowych. Na przykład w latach 1997 – 2009 uran zubożony pochodzący z Unii Europejskiej był poddawany wzbogacaniu w Rosji. Uzyskano w tych latach sumie 7 843 tony ekwiwalentu uranu naturalnego, co stanowi 3,56% łącznych zakupów UE w ciągu tych 13 lat, lub 46% średniej rocznych zakupów. W mniejszej skali korzystano z tego źródła także w USA. Przy założeniu, że nagromadzony dotąd uran zubożony zawiera izotop U-235 jeszcze w dostatecznie wysokiej koncentracji, by go poddać wzbogaceni, można tą drogą uzyskać ekwiwalent uranu naturalnego. W ten sposób z jednej tony uranu zubożonego o koncentracji U-235 na poziomie 0,3% można, po jej obniżeniu w pozostałościach z procesu wzbogacania do 0,1%, uzyskać około 280 kg ekwiwalentu uranu naturalnego. Do oceny jaką ilość ekwiwalentu uranu naturalnego można by z tego źródła uzyskać brakuje informacji o ilościach uranu zubożonego charakteryzujących się odpowiednio wysokimi wskaźnikami koncentracji U-235 aby operacja była opłacalna. Koncentracja U-235 w nagromadzonym dotąd uranie zubożonym, którego jest na świecie 1,3 – 1,5 milionów ton, może zawierać się w granicach 0,1 – 0,4%. Dolny poziom odpowiada obecnej praktyce w Rosji, zaś górny – dawniejszej praktyce w zakładach wzbogacania dyfuzyjnego. Zastępowanie dyfuzyjnej technologii wzbogacania izotopowego technologią wirówkową, co ma obecnie miejsce we Francji i w USA, oraz laserową w USA i obserwowany spadek cen płaconych za pracę rozdzielania (SWU) będą, po odwróceniu obecnej tendencji spadkowej cen uranu, sprzyjać pozyskiwaniu ekwiwalentu uranu naturalnego w powyższy sposób. Obecnie oczekuje się uruchomienia w USA programu wzbogacania 140 000 ton uranu zubożonego, zawierającego 0,4% U-235. Będzie to zależało od wystąpienia nadwyżek mocy produkcyjnych zakładów wzbogacania izotopowego w wyniku uruchomienia nowych zakładów [6].

Do źródeł wtórnych materiałów jądrowych należą również uran i pluton odzyskane w procesie przerobu wypalonego paliwa jądrowego reaktorów lekkowodnych a następnie wykorzystane w paliwie MOX (od ang. *mixed oxides* – mieszaniny UO_2 i PuO_2) do tych reaktorów lub, w dalszej perspektywie czasowej, do uruchomienia reaktorów powielających na neutronach prędkich. W przypadku reaktorów lekkowodnych, w których, w przeciwieństwie do reaktorów prędkich, taki recykling jest możliwy tylko jednorazowo, stosując paliwo MOX można zmniejszyć zapotrzebowanie na uran naturalny nawet w 25 procentach. Jest to do osiągnięcia przy recyklingu zarówno plutonu jak i uranu. Obecnie udział materiałów jądrowych pochodzących z przerobu wypalonego paliwa jest w skali światowej mały, rzędu 2%, zaś w skali Unii Europejskiej ok. 5%.

Zbędne zapasy plutonu o jakości specyficznej dla broni jądrowej (ang. *weapons grade plutonium*) wycofane z programów militarnych mocarstw jądrowych mogą także posłużyć jako źródło wtórne materiałów jądrowych wykorzystane jako składnik paliwa MOX dla reaktorów lekkowodnych lub do uruchomienia reaktorów powielających na neutronach prędkich. Nagromadzone zapasy takiego plutonu wynoszą 260 ton. Gdyby zostały one zużyte w paliwie MOX reaktorów lekkowodnych stanowiłyby w przybliżeniu równowartość ich obecnego rocznego zapotrzebowania na paliwo. Plany takiego wykorzystania plutonu powstały np. w ostatnich latach w USA.

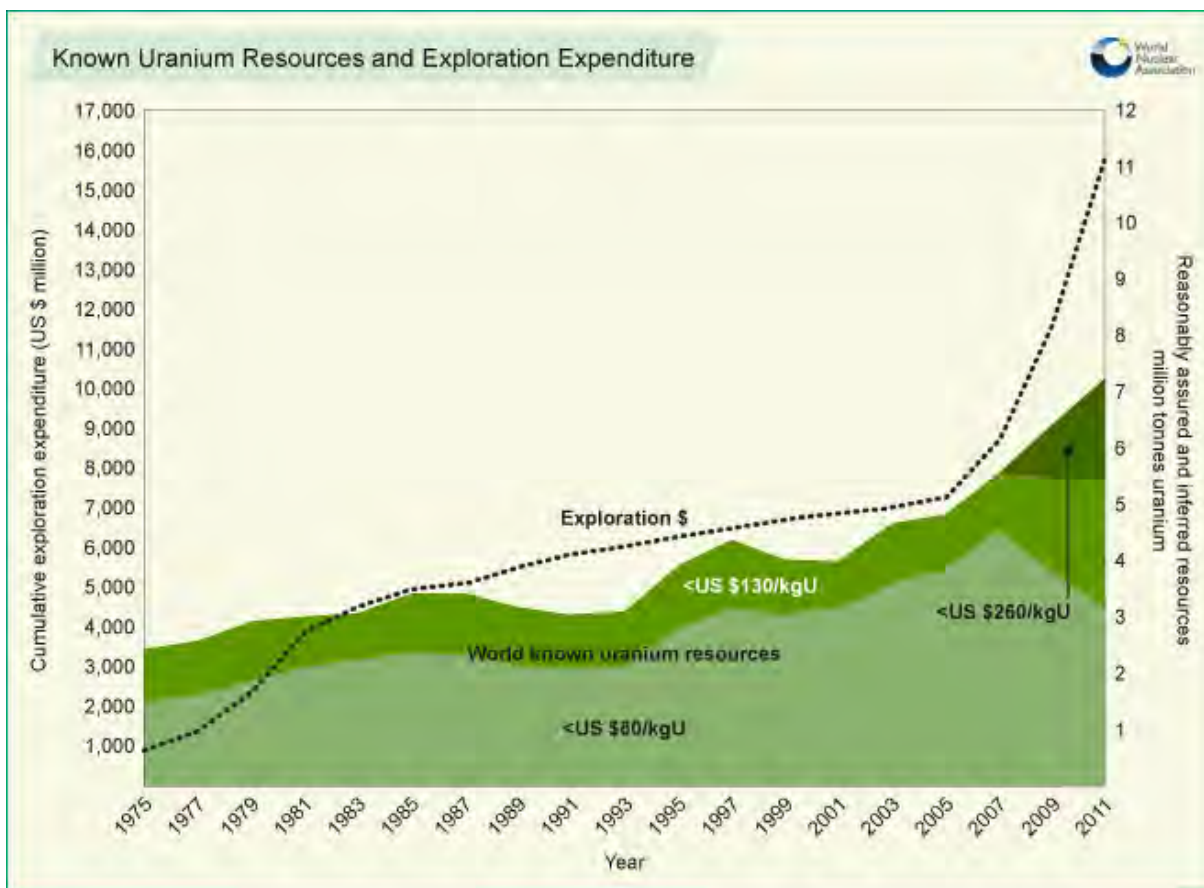
Obecnie udział źródeł wtórnych w pokrywaniu zapotrzebowania paliwowego energetyki jądrowej na świecie zmniejszył się do około 15% ale WNA w swoich meldunkach wskazuje, że będą one wykorzystywane także w dalszych latach jako uzupełnienie produkcji uranu ze źródeł pierwotnych. Mówiąc o ich wykorzystaniu mamy tu na myśli głównie reaktory lekkowodne, które zapewniają ponad 90% mocy w energetyce jądrowej świata.

Poszukiwania nowych zasobów uranu

Prognozy wzrostu energetyki jądrowej na świecie, jakkolwiek bardziej ostrożne w porównaniu do prognoz przed katastrofą w Fukushima, wskazują na trend stałego, znacznego wzrostu mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych. Przy spełnieniu tego scenariusza odkryte zasoby uranu będą się oczywiście wyczerpywały coraz szybciej. Trwają jednak stale poszukiwania nowych zasobów uranu, zarówno konwencjonalnych jak i niekonwencjonalnych. Wielkość światowych zasobów uranu wg Red Book 2011 roku stanowi jedynie punkt na wzrastającej na przestrzeni lat krzywej. Intensywność poszukiwań zależy naturalnie od prognoz wzrostu energetyki jądrowej na świecie oraz w znacznym stopniu od relacji zapotrzebowanie – podaż i wynikających z niej cen uranu na rynku, przynajmniej od czasu, gdy relacją tą zaczęły rządzić prawa rynkowe, a nie wyścig zbrojeń jądrowych.

Po długim okresie bardzo niskich cen uranu, w granicach 20 – 30 USD/kgU, trwającym od początku lat 1990ych, w 2003 roku rozpoczął się ich wzrost. Głównym powodem tego był zapowiadany „renesans energetyki jądrowej”, którą zaczęto postrzegać jako remedium na narastające zjawisko efektu cieplarnianego spowodowanego rosnącą emisją CO₂ w skali globalnej. Pojawiły się wówczas także informacje o planach rozbudowy energetyki jądrowej w znacznej skali, szczególnie w Chinach. Wprawdzie po osiągnięciu w kontraktach typu spot (zakupy jednorazowe) szczytu cenowego 354 USD/kgU w czerwcu 2007 r. i drugiego, mniejszego szczytu 186 USD/kgU w styczniu 2011 r., ceny uranu spadły do 106 USD w październiku 2012 r. (podane liczby określają średnie ceny za dany miesiąc), to jednak uruchomiony sygnałami dotyczącymi spodziewanego wzrostu energetyki jądrowej i pierwszym wzrostem cen proces intensywnych poszukiwań nowych zasobów uranu trwa nadal. Wzrost nakładów na te poszukiwania zaczął przynosić wymierne efekty w postaci znacznego wzrostu zasobów rozpoznanych uranu, co widać na rys.4. Poszukiwania te jednak koncentrowały się głównie na terenach bliskich odkrytym wcześniej złożom uranu, pozostawiając nie zbadanymi obszerne regiony świata.

PALIWO JĄDROWE



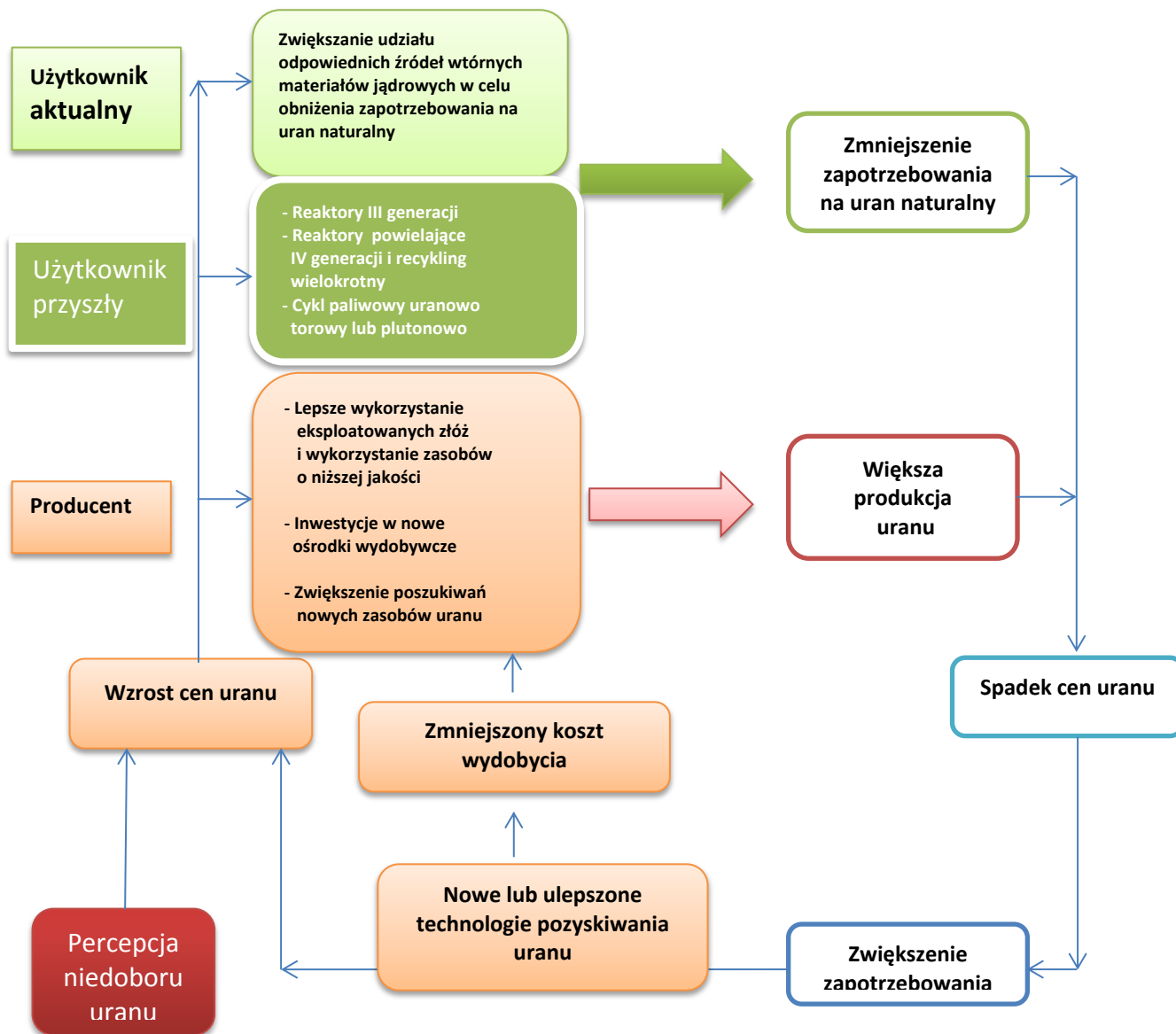
Rys.4. Wzrost zasobów rozpoznanych uranu na świecie a wielkość nakładów finansowych na ich poszukiwania. Źródło; OECD/NEA-IAEA Red Book 2011. Na lewej skali podano wielkości skumulowanych wydatków na poszukiwania nowych zasobów wyrażone w miliardach dolarów, zaś na prawej – zasoby rozpoznane w obu kategoriach (RAR i IR) w milionach ton. Przerywana linia oznacza wydatki, zaś zacienione pola – zasoby uranu w trzech grupach kosztowych: < 80 USD/kgU, < 130 USD/kgU i < 260 USD/kgU.

W wyniku wzmożonych poszukiwań **tylko w okresie dwóch lat od poprzedniej publikacji raportu OECD/NEA zasoby rozpoznane uranu wzrosły o ponad 790 000 ton tj. o 12,5%, natomiast w ciągu sześciu lat wzrosły o prawie 2,5 miliona ton, tj o ponad połowę.** Następnie, już po przygotowaniu do druku Red Book 2011, do listopada 2012 okryte zostały znaczne zasoby konwencjonalne uranu w Indiach i Chinach. W Indiach ogłoszono w lipcu 2011 informację o potwierdzeniu zasobów o wielkości 49 000 tU w przygotowywanej do uruchomienia kopalni Tumulapalli, stwierdzając, że są wskazania na istnienie 150 000 ton, co zapewne można na razie zaliczyć do zasobów nierozpoznanych. Z kolei według wiadomości WNA z listopada 2012 r. odkrycia wielkich zasobów uranu dokonano w Chinach - około 2 milionów ton uranu w kategorii zasobów przypuszczalnych lub „możliwych”. To ostatnie odkrycie jest szczególnie doniosłe ponieważ zwiększa zasoby Chin ponad dziesięciokrotnie lokując je w czołówce państw dysponujących największymi zasobami uranu.

Szwecji odkryto w 2012 r. około 308 000 tU w czarnych łupkach, co wraz z odkryciami sprzed paru lat daje łącznie około 710 000 ton uranu. Są to wprawdzie zasoby zaliczane do niekonwencjonalnych, ale będą z pewnością miały duże znaczenia dla globalnego bilansu uranu. Obecnie sama Szwecja posiada większe zasoby uranu w łupkach niż podano w Red Book 2011 dla całego świata.

Produkcja uranu a zapotrzebowanie i mechanizmy je regulujące

Produkcja uranu ze źródeł pierwotnych, tak jak w przypadku wszystkich innych wydobywanych surowców ziemskich, jest regulowana względnie szybko przez procesy rynkowe, oraz w dłuższej perspektywie czasowej - przez rozwój technologiczny. Procesy te w odniesieniu do produkcji uranu ilustruje Rys. 5.



Rys. 5. Mechanizmy rynku i postępu technologicznego regulujące relacje zapotrzebowanie – podaż uranu (oprac. aut., inspiracja WNA).

Na sygnały świadczące o malejącej podaży uranu lub jego rosnących cenach reaguje zarówno producent jak i użytkownik. Pokazana na rys. 5 reakcja producenta prowadzi przez ulepszenia technologiczne mające na celu pełniejsze i tańsze wykorzystanie eksploatowanego złoża, a także przez uruchomienie nowych ośrodków wydobywczych na wcześniej rozpoznanych złożach oraz intensyfikację poszukiwań nowych zasobów uranu w przewidywaniu późniejszego wystąpienia podobnych sygnałów.

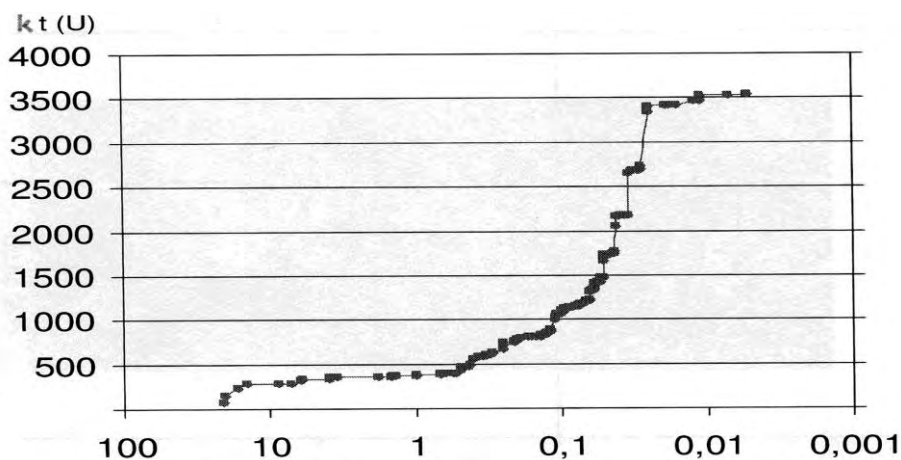
Użytkownik eksploatujący elektrownię jądrową reaguje poszukiwaniem możliwości zastąpienia części dostaw uranu ze źródeł pierwotnych materiałami jądrowymi ze źródeł wtórnych.

Najszybszą reakcją jest w tym przypadku wykorzystanie zapasów. Również stosunkowo szybko można obniżyć zapotrzebowanie na uran decydując się na obniżenie zawartości U-235 w pozostałościach z procesu wzbogacania izotopowego (tj. w uranie zubożonym). Wymaga to większej pracy rozdzielania (izotopów uranu) liczonej w SWU (skrót od ang. *separative work unit*). Dla każdej relacji cen uranu naturalnego i cen SWU istnieje optymalny wskaźnik zawartości U-235 w uranie zubożonym, który na początku 2012 r. wynosił 0,22%. Przerób wypalonego paliwa i recykling w paliwie MOX plutonu, lub plutonu i uranu łącznie, wymaga więcej czasu. W obu przypadkach konieczne jest zawarcie odpowiednich kontraktów na stosowne usługi zakładów cyklu paliwowego (zakłady wzbogacania izotopowego lub zakłady przerobu wypalonego paliwa). W przypadku zamiaru zastosowania paliwa MOX użytkownik powinien uzyskać zawnazu odpowiednie zezwolenie na jego stosowanie.

Przyszły użytkownik elektrowni jądrowych będzie miał do wyboru nowe technologie reaktorowe, obecnie oszczędniejsze reaktory III generacji, a następnie reaktory powielające na neutronach prędkich IV generacji [7,8,9], lub reaktory pracujące na paliwie uranowo torowym lub plutonowo torowym [10], oraz związane z nimi technologie przerobu wypalonego paliwa. Czas wprowadzenia reaktorów IV generacji do masowej eksploatacji będzie zależał od wyników głębokich analiz ekonomicznych i stabilnych prognoz dotyczących wzrostu energetyki jądrowej na świecie. Reaktory te nie będą już wymagały uranu pochodzącego ze źródeł pierwotnych. Reaktory na neutronach prędkich będą potrzebowały do ich uruchomienia plutonu pochodzącego z przerobu wypalonego paliwa reaktorów lekkowodnych oraz uranu zubożonego, w którym będzie wytwarzany z izotopu U-238 izotop plutonu Pu-239 służący po przerobie wypalonego paliwa do wytwarzania nowego paliwa. Z kolei reaktory pracujące w oparciu o cykl uranowo torowy będą wytwarzały z izotopu toru Th-232 izotop uranu U-233, który jest izotopem rozszczepialnym dla niskich energii neutronów. Wprowadzenie do eksploatacji reaktorów, których paliwo zawiera tor, jeżeli zostanie to uznane za celowe, spowoduje uruchomienie eksploatacji zasobów tego pierwiastka, które ocenia się na 3 – 5 razy większe od zasobów uranu.

Historia i perspektywy pozyskiwania uranu z zasobów o niskich koncentracjach

Tylko niewielka część zasobów uranu zawiera go w wysokich koncentracjach pozwalających zaliczyć je do niskich grup kosztowych, poniżej 80 USD/kgU. Ilustruje to rys. 6, który przedstawia typowy rozkład koncentracji uranu w zasobach rozpoznanych.



Rys. 6. Rozpoznane zasoby uranu w tysiącach ton uranu zależnie od ich jakości podanej w procentach zawartości uranu w nośniku. Wykres przedstawia stan z 2005 roku bez uwzględnienia Chin, Indii i Rosji. (Źródło: World Information Service on Energy Uranium Projects).

W przypadku zasobów niekonwencjonalnych koncentracje uranu są z definicji niskie, poniżej 0,02% (200 ppm). Pozyskiwanie uranu z niektórych źródeł niekonwencjonalnych ma już swoją historię. Uran z fosforytów pozyskiwano w USA w latach 1954 – 1962, a następnie w latach 1980ych do połowy lat 1990ych, kiedy około 20% własnego wydobycia uranu w tym kraju pochodziło z fosforytów Florydy. Miało to miejsce także w Belgii w latach 1975 – 1999. Wg informacji WNA z czerwca 2012 r. pozyskano z tego źródła dotąd w sumie około 20 000 ton uranu. Odpowiednie technologie pozyskiwania uranu przy produkcji kwasu fosforowego i nawozów fosforowych opanowano na skalę przemysłową także w Brazylii, Hiszpanii, Kanadzie, Kazachstanie, Maroku i Tunezji, a instalacje pilotowe wybudowano w Izraelu i Turcji (w obu przypadkach zamknięte). Obecnie w związku z wyższymi cenami uranu niż w latach 1990ych ponownie notuje się rosnące zainteresowanie możliwością pozyskiwania uranu w ten sposób. Brazylia planuje budowę nowego zakładu wydobywczego w Itataia, w którym uran byłby pozyskiwany jako co-produkt z fosforytów zawierających 80 000 tU o koncentracji 540 ppm. W Maroku rozpoczęcie odzysku uranu z fosforytów spodziewane jest w ciągu najbliższych kilku lat. Prowadzone są także działania w kierunku wybudowania nowej instalacji do odzysku 400 tU/rok z fosforytów na Florydzie w USA. W przypadku fosforytów uran może być produktem ubocznym lub nawet co-produktem, co podnosi opłacalność jego wydobycia. Warto także zauważyć, że pozyskiwanie uranu na drodze jego wydzielania przy produkcji nawozów sztucznych nie obciąża środowiska naturalnego lecz wręcz odwrotnie – przez wydzielenie uranu powoduje ograniczenie problemu postępowania z nisko-aktywnymi odpadami promieniotwórczymi.

W 2009 r. australijska firma Uranium Equities Ltd. (UEQ) ogłosiła opanowanie ulepszonej technologii odzyskiwania uranu z kwasu fosforowego pod nazwą PhosEnergy. Przenośne urządzenia wykonane przez tę firmę, są testowane w USA. Badania przeprowadzone w okresie od czerwca do sierpnia 2012 r. na materiale pochodzącym z dwóch różnych zakładów wytwarzających nawozy sztuczne potwierdziły zalety nowej technologii. W stanie ustalonym pracy osiągnięto poziom 90% odzysku uranu. Badania techniczne zaplanowane na IV kwartał 2012 roku mają zwiększyć zaufanie do dotychczasowych szacunków kosztów eksploatacyjnych. Ocenia się je na 65 do 78 USD/kgU przy produkcji w skali 100 tU/rok, zatem nowa technologia prawdopodobnie obniży o połowę koszty uzyskiwania uranu w porównaniu do dotychczasowych technologii. W budowę pierwszego zakładu w skali przemysłowej stosującego technologię PhosEnergy zaangażowała się kanadyjska firma Cameco w ramach partnerstwa strategicznego z UEQ.

Partnerzy testujący technologię PhosEnergy oceniają aktualne światowe możliwości pozyskiwania uranu przy zastosowaniu tej technologii na 7 700 tU/rok. Z kolei według WNA w skali globalnej istnieje potencjalna możliwość pozyskiwania z fosforytów około 11 000 ton uranu rocznie. Maksymalna ilość uranu jaką można uzyskać będzie jednak zawsze zależała w znacznym stopniu od wielkości rynku fosforowych nawozów sztucznych, a z kolei ich produkcja – od zapotrzebowania na te nawozy oraz od cen energii.

Uran z łupków czarnych był pozyskiwany już w latach 1946 – 1952 na terytorium Estonii, będącej wówczas jedną z republik ZSRR, oraz między 1950 i 1989 rokiem także w Szwecji. Ostatnie odkrycia zasobów uranu w łupkach czarnych w Szwecji o czym była już mowa wcześniej, będą prawdopodobnie eksploatowane z wykorzystaniem metody bioługowania. Firma Aura Energy ogłosiła już doskonałe wyniki testów pozyskania uranu z tego źródła tą metodą (uzysk 85% uranu przy jego koncentracji w nośniku wynoszącej 200 ppm) i zawarła porozumienie z innym partnerem w celu zapewnienia dalszego finansowania projektu wydobycia uranu. Inne duże zasoby uranu w

łupkach, objęte projektem Elkon prowadzonym przez firmę ARMZ, znajdują się w Rosji. Szacuje się je na ponad 271 000 tU.

Uran zawarty jest także w wodzie morskiej, w której jego ilość szacowana jest na około 4,5 miliarda ton. W kilku krajach (Niemcy, Japonia, Włochy, USA) prowadzono prace nad różnymi technologiami pozyskiwania uranu z wody morskiej ale osiągnięto wyniki jedynie w skali laboratoryjnej. Ta droga pozyskiwania uranu była dotąd nieopłacalna, tym niemniej odpowiednie badania są nadal kontynuowane. Według informacji WNA z sierpnia 2012 r., najnowsze wyniki kontynuowanych w USA prac nad nowymi technologiami umożliwiającymi pozyskiwanie uranu z wody morskiej pozwoliły American Chemical Society na stwierdzenie, że zastosowanie nowych opracowywanych materiałów i technik adsorpcyjnych może obniżyć koszt pozyskiwania uranu z tego źródła do poziomu poniżej 300 USD/kgU. Jest to niewiele więcej, niż górna kategoria kosztowa rozpoznanych obecnie zasobów konwencjonalnych uranu (260 USD/kgU).

Nie tylko fosforyty ale także inne zasoby niekonwencjonalne, szczególnie łupki czarne mogą być także opłacalnym źródłem uranu. Zapoznanie się z rozmiarami niekonwencjonalnych zasobów uranu na świecie oraz działalnością firm skierowaną w stronę opracowania opłacalnych technologii jego uzyskiwania z tych zasobów prowadzi do wniosku, że odegrają one znaczącą rolę w zapewnieniu paliwa jądrowego do przyszłych elektrowni. Czynnikiem decydującym o ich eksploatacji będzie nieunikniony wzrost cen uranu. Przy obecnym kilkuprocentowym udziale cen uranu w kosztach wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych wzrost tych cen nie będzie miał jednak większego wpływu na ceny tej energii.

Do pozyskiwania uranu ze źródeł o niskich koncentracjach, bardzo obiecujące są technologie bioługowania. Stosuje się je przede wszystkim do pozyskiwania cennych pierwiastków, gdzie opłaca się przetwarzać nośniki, w których bardzo niskie stężenie pożądanego pierwiastka powoduje, że inne sposoby nie są skuteczne lub wymagałyby zbyt wielkiego zużycia energii. W Australii i USA bioługowanie stosuje się do pozyskiwania z odpadów kopalnianych resztek uranu i miedzi. Technologia bioługowania będzie prawdopodobnie wykorzystana w Szwecji do pozyskiwania uranu z nowo odkrytych łupków czarnych, o czym była już mowa. Bioługowanie (ang. *bioleaching*) jest to proces, w którym wykorzystuje się właściwości mikroorganizmów powodujące zakwaszenie środowiska co umożliwia wyekstrahowanie różnych pierwiastków z ubogich rud metali. Mikroorganizmy takie korzystają ze związków nieorganicznych jako źródła energii, a ich metabolizmowi towarzyszy wytwarzanie dużej ilości kwasu. Zakwaszenie tą drogą odpowiednich minerałów powoduje ich rozpuszczenie umożliwiając późniejsze wymycie z nich pożądanego metalu.

W Polsce zasoby uranu są niewielkie. Są to w dużej mierze pozostałości po eksploatacji złóż w Sudetach i w Górach Świętokrzyskich prowadzonej w latach 1947 -1967. Analiza możliwości pozyskiwania uranu z zasobów krajowych prowadzona jest obecnie w ramach projektu badawczego realizowanego przez Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) wraz z Państwowym Instytutem Geologicznym (PIG). Projektem tym kieruje prof. Grażyna Trznadel-Zakrzewska z IChTJ. Analiza obejmuje zarówno rudy uranu w złożach krajowych jak i odpady przemysłowe, które są potencjalnymi źródłami uranu. W pierwszym przypadku prowadzone prace dotyczą resztek rud i pozostałości po wydobywaniu uranu w regionach eksploatowanych po wojnie, gdzie uran występuje w koncentracjach od 0,03 do 0,5% (300 do 5 000 ppm), oraz złóż zlokalizowanych w rejonie Bielska Podlaskiego, gdzie uran występuje na głębokości około 400 m w koncentracjach rzędu 100 ppm w towarzystwie różnych metali. Celem tych prac jest opracowanie metod pozyskiwania uranu wraz z towarzyszącymi mu metalami. W odniesieniu do odpadów przemysłowych przewidziano dokonanie

analiz możliwości pozyskiwania uranu jako produktu ubocznego przy produkcji koncentratu miedziowego z rud miedzionośnych Zagłębia Lubińskiego. oraz z kwasu fosforowego wytwarzanego z importowanych fosforytów afrykańskich. Z kolei pod kierunkiem prof. Aleksandry Skłodowskiej z Uniwersytetu Warszawskiego prowadzone są w kilku ośrodkach badawczych prace w ramach zadania badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. „Podstawy zabezpieczenia potrzeb paliwowych polskiej energetyki jądrowej”. Badania te mają między innymi doprowadzić do opracowania własnej, oryginalnej technologii bioługowania uranu, dostosowanej do jego warunków występowania w kraju .

Podsumowanie

Informacje i rozważania zawarte w artykule prowadzą do wniosku, że uranu nie zabraknie. W miarę zużywania odkrytych już zasobów będą jeszcze długo odkrywane nowe. Odkrycia w ostatnich latach dużych zasobów uranu, zarówno konwencjonalnych jak i niekonwencjonalnych, dowodzą że odpowiednie zaangażowanie środków finansowych zapewnia skuteczność ich poszukiwań. Także możliwości pozyskiwania uranu, nawet z ubogich złóż (także z morza), będą się zwiększać dzięki postępowi technologicznemu, co spowoduje znaczne wydłużenie okresu możliwego korzystania z niego. Jednak rosnące zapotrzebowanie i wyczerpywanie złóż uranu o jego największej koncentracji będzie prowadziło do wzrostu jego cen. Będzie to czynnikiem stymulującym wdrażanie technologii reaktorowych umożliwiających lepsze wykorzystanie paliwa jądrowego oraz zastępowanie uranu innymi materiałami jądrowymi. Zarówno reaktory powielające na neutronach prędkich jak i reaktory wykorzystujące tor w charakterze materiału paliworodnego, w powiązaniu z przerobem pochodzącego z nich wypalonego paliwa i recyklingiem zawartych w nim materiałów jądrowych, nie będą musiały w ogóle korzystać z uranu pierwotnego. Materiałem rozszczepialnym będzie w nich, odpowiednio, powielany pluton lub sztuczny izotop uranu (U-233) wytwarzany z toru. Wprowadzanie do eksploatacji tych reaktorów będzie jednak przebiegało stopniowo powodując także stopniowe zmniejszanie zapotrzebowania na uran. Przy realizacji tego scenariusza zasobów uranu może wystarczyć nawet na wiele tysięcy lat.

Literatura

1. Andrzej Strupczewski. „Zasoby paliwowe dla energetyki jądrowej w Polsce”. SPECTRUM, marzec/kwiecień 2009, www.spectrumsep.eu
2. Jacek Kaniewski. „Bezpieczeństwo dostaw paliwa dla elektrowni jądrowych w unii Europejskiej”. Postępy Techniki jądrowej Vol.51 Z.2 Warszawa 2008
3. OECD/NEA-IAEA, Uranium 2011: Resources, Production and Demand, July 2012
4. WNA “World Uranium Mining” (www.world-nuclear.org/iunfo/inf23.html)
5. A „Uranium from Phosphates” (www.world-nuclear.org/info/phosphates_inf124.html)
6. EMD Uranium (Nuclear Materials) Committee Annual Report 2011. (EMD oznacza Energy Minerals Division, należąca do Amerykańskiego Stowarzyszenia Geologów Naftowych).
7. WNA „Generation IV Nuclear Reactors” (www.world-nuclear.org/info/inf77.html)
8. OECD/NEA “Trends towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle”, 2011
9. Jacek T. Kaniewski. „Perspektywa wysokosprawnej i niskoodpadowej energetyki jądrowej: reaktory powielające na neutronach prędkich”. Ekoatom Nr 3, 2011 r. (www.ekoatom.com.pl)
10. WNA „Thorium”. (www.world-nuclear.org/info/inf69.html)



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

ANDRZEJ GRZEGORZ CHMIELEWSKI

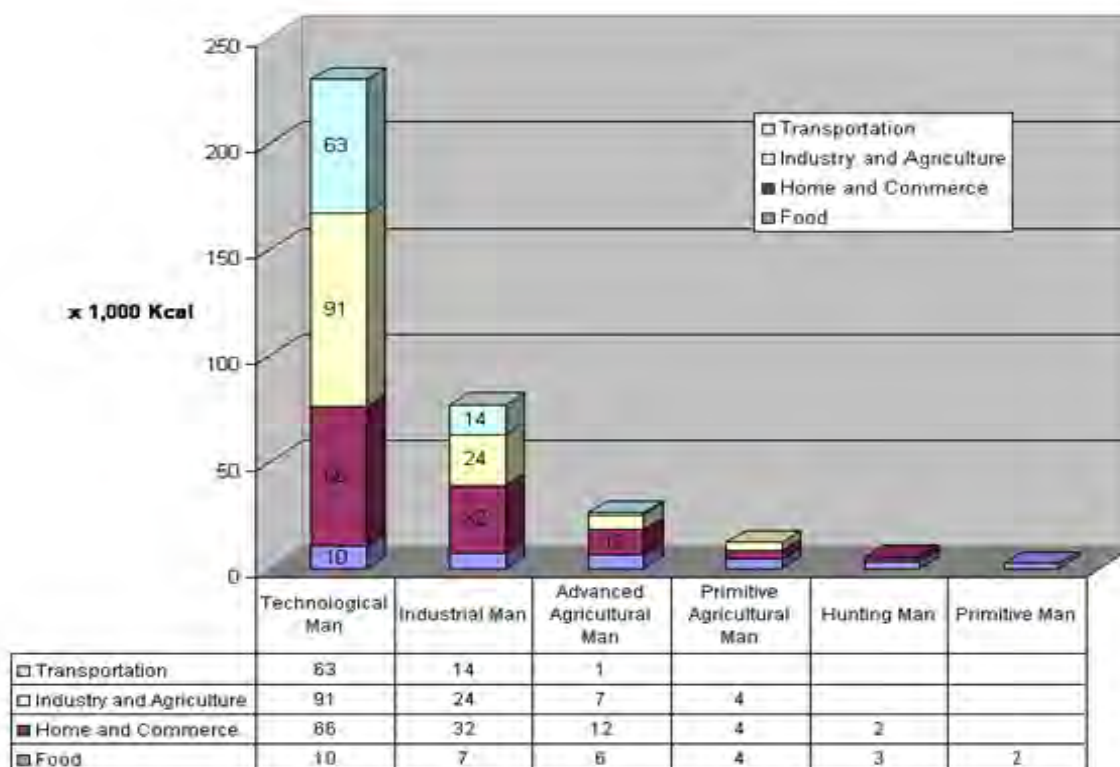
CZY ISTNIEJE TECHNOLOGIA WYTWARZANIA ENERGII CAŁKOWICIE PRZYJAZNA ŚRODOWISKU ?

Motto:

„Energetyka w szerokim ujęciu obejmuje różne dziedziny techniki – od górnictwa węglowego, odwiertów naftowych i gazowych, poprzez rafinerie ropy oraz elektrownie tradycyjne, jądrowe, wiatrowe i słoneczne, aż do skomplikowanych sieci elektrycznych, ciepłowniczych i gazowych oraz wiele urządzeń przemysłowych, biurowych i domowych zasilanych różnymi formami energii. Zwykły śmiertelnik ma małe pojęcie, na jakich zasadach funkcjonuje cały ten system i ledwie nadąża z uczeniem się, jak racjonalnie korzystać z docierającej do niego energii” (Z. Łucki i W. Misiak, 2011).

Wstęp

Od zarania ludzkości człowiek potrzebował energii, dla przygotowania stawy, oświetlenia i ogrzania domu, uprawy roli, produkcji swoich wytworów, transportu siebie i towarów, a wreszcie zabawy. Zmianę zużycia energii wraz z wiekami przedstawia Rys.1.



Rys. 1. Dzielne zużycie energii na głowę człowieka w różnych erach jego rozwoju (Źródło: E. Cook, "The Flow of Energy in an Industrial Society" Scientific American, 1971 str. 135).

Wzrost zużycia energii wyniósł 135 razy od czasu kiedy człowiekowi wystarczyło ognisko. Trzeba również stwierdzić, że wzrost ten dotyczył dziedzin nieznanymi naszymu prymitywnemu przodkowi; transportu, przemysłu i upraw przemysłowych, handlu (z pięknymi centrami handlowymi), sportu (z wielkimi stadionami) etc. A zatem spalanie drewna nie mogło być dalej jedynym źródłem energii, potrzeba było jej więcej i źródła musiały być bardziej intensywne. Wielu lat rozwoju cywilizacji wymagało od rozumnego człowieka przyswojenie sobie metod wytwarzania pary, przetwarzania jej w pracę mechaniczną, a wreszcie w prąd elektryczny, pozwalający na przesyłanie tej energii i jej odtwarzanie w dalekich zakątkach kraju. 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 zasobów 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 (Chmielewski, 2004). Jedynym rozwiązaniem problemu jest większe wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw (ale nie spalanych w kotłach zrębków i innych odpadów drzewnych) oraz energetyki jądrowej. Jednak trzeba pamiętać, że z jednej strony dostęp do elektryczności ma bezpośredni wpływ na poprawę zdrowia ludności (dostęp do nowoczesnej medycyny, ogrzewanie i klimatyzacja, przechowywanie i przygotowanie żywności), z drugiej strony nie ma żadnej techniki, pozyskiwania surowców paliwowych i wytwarzania energii elektrycznej, w całości bezpiecznej dla człowieka i nie przynoszącej strat środowiskowych. Człowiek jednak nie zatrzyma się w już swoim rozwoju cywilizacyjnym i nie zostanie pustelnikiem pijącym wodę ze strumyka i wypiekającym chleb z nasion traw. Wszyscy nie mają takiej szansy gdyby nawet chcieli...

Samo prowadzenie statystyk i analiz nie pozwala na pełną ocenę zagrożeń, przeciwdziałanie ich skutkom oraz rozwój najmniej szkodliwych dla człowieka i środowiska technologii energetycznych.

Udział transportu w ogólnej konsumpcji surowców energetycznych wzrósł z 24,2% w 1973 do ok. 30% w 2001 r. Światowe zużycie energii wzrasta mimo rosnącej efektywności pojazdów, instalacji przemysłowych i urządzeń domowych. Wzrost ten dotyczy zarówno krajów rozwiniętych, jak i rozwijających się. Według bardzo wiarogodnego źródła, jakim jest US Energy Information Administration, światowe zapotrzebowanie na dostawę różnych form energii zwiększy się w roku 2035 o 49% względem roku 2007, wzrost ten wyniesie 84% w krajach nienależących do OECD i 14% w krajach należących do tej organizacji. Tendencja ta zadaje kłopot 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 jak np. stadiony, zaspokajającymi 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.

Jeśli nie nastąpią 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 dwudziestoleciu i zapotrzebowanie na nie wzrośnie do roku 2030 o ok. 90%.

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. Źródła rozproszone nie zastąpią elektrowni systemowych (Kowalska i Wilczyński, 2007). W wielu przypadkach o wielkości elektrowni decyduje istnienie w pobliżu dużej kopalni odkrywkowej, jak ma to miejsce w przypadku Bełchatowa, czy też Turowa. Wpływ takich elektrowni, spalających paliwa kopalne, na środowisko naturalne jest przerażający.

Okolo 1,6 miliarda ludzi – jedna czwarta populacji świata – nie ma w ogóle dostępu do elektryczności, 80% z nich żyje w Indiach i w Afryce subsaharyjskiej. W ostatnim z tych regionów zaczyna też brakować drewna na opał.

Energetyka oparta o spalanie paliw kopalnych - emisja zanieczyszczeń gazowych i pyłów

W Polsce energetyka opiera się głównie o spalanie węgla. Kopalnie węgla kamiennego są kopalniami szybowymi, podziemnymi i od czasów wojny zginęło w nich tysiące górników. Odpompowywane wody zanieczyszczają rzeki solą i solami radu. Węgiel brunatny wydobywany jest metodą odkrywkową, największa kopalnia węgla brunatnego to kopalnia Bełchatów i przylegające do niej pole Szczerców. Wydobycie węgla brunatnego w Kopalni "Bełchatów" jest ściśle związane z koniecznością prowadzenia intensywnego, głębokiego drenażu wód podziemnych z wodonośnych pięter czwartorzędowego, trzeciorzędowego i kredowo-jurajskiego. Odwadnianie zasobnych pięter wodonośnych spowodowało uformowanie się wokół wyrobiska kopalni "Bełchatów" znacznych rozmiarów leja depresji. Strefa zmian warunków hydrodynamicznych aktualnie obejmuje powierzchnię około 450 km². W centralnej części leja depresji Kopalni "Bełchatów" zwierciadło wody zostało obniżone o ponad 250 metrów. Kolejnym elementem wpływu działalności Kopalni na środowisko wodne jest przeobrażenie warunków hydrologicznych zlewni położonych w zasięgu leja depresji, związane głównie z obniżeniem zasilania cieków z dopływu wód podziemnych. Odpompowywanie dużych ilości wód podziemnych jest również przyczyną uformowania się antropogenicznej, młodej strefy aeracji z dostępem tlenu. Zmiany jakości wód podziemnych w leju depresji kopalni "Bełchatów" zachodzą w wyniku połączonych ze sobą procesów geochemicznych: utleniania siarczków, buforowania powstających kwaśnych wód kopalnianych i formowania bardzo dobrze rozpuszczalnych wtórnych minerałów siarczanowych oraz na skutek występowania wód typu Na-Cl w rejonie wysadu solnego "Dębina". (Motyka i inni, 2007). Prowadzony w Kopalni "Bełchatów" systematyczny monitoring środowiska wodnego daje możliwość śledzenia stanu środowiska wodnego, a także umożliwia planowanie scenariuszy dla jego remediacji. Prace w tym zakresie prowadzi m.in. macierzysty Instytut autora (Sołtyk, 2009).



Rys. 2. Protest przeciwko budowie kopalni odkrywkowej węgla brunatnego w okolicach Legnicy
(Źródło: <http://fakty.lca.pl/news,18323>).

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 dwutlenku 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.

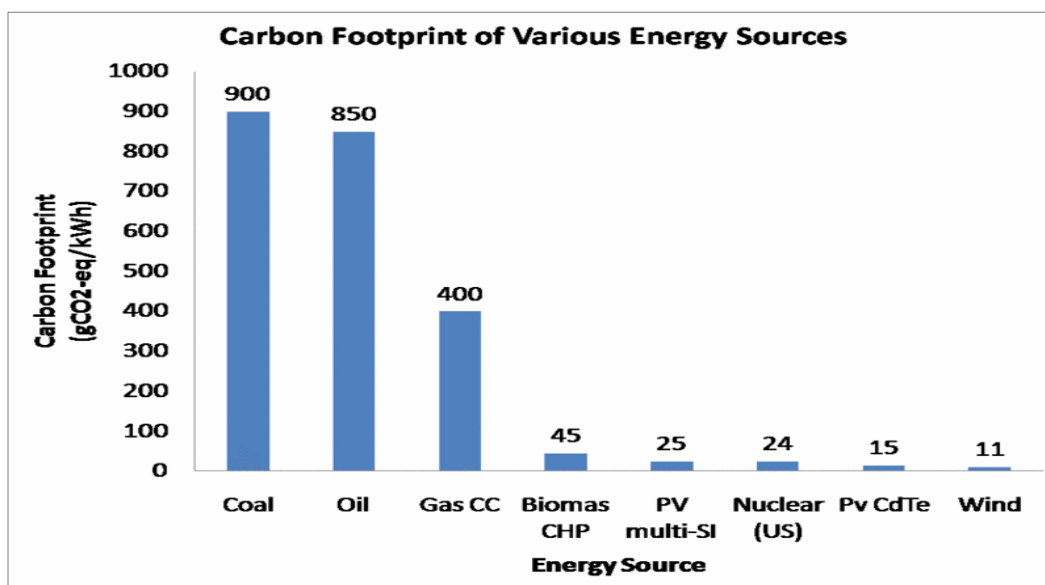
Emisja tego gazu wyniesie 40 gigaton w roku 2030, co daje wzrost rzędu 13–14 Gt ponad poziom emisji roku 2004 (tab. 1).

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

Tab. 1. Światowa emisja ditlenku węgla z energetyki wykorzystującej paliwa kopalne. Źródło: IEA, OECD, 2007.

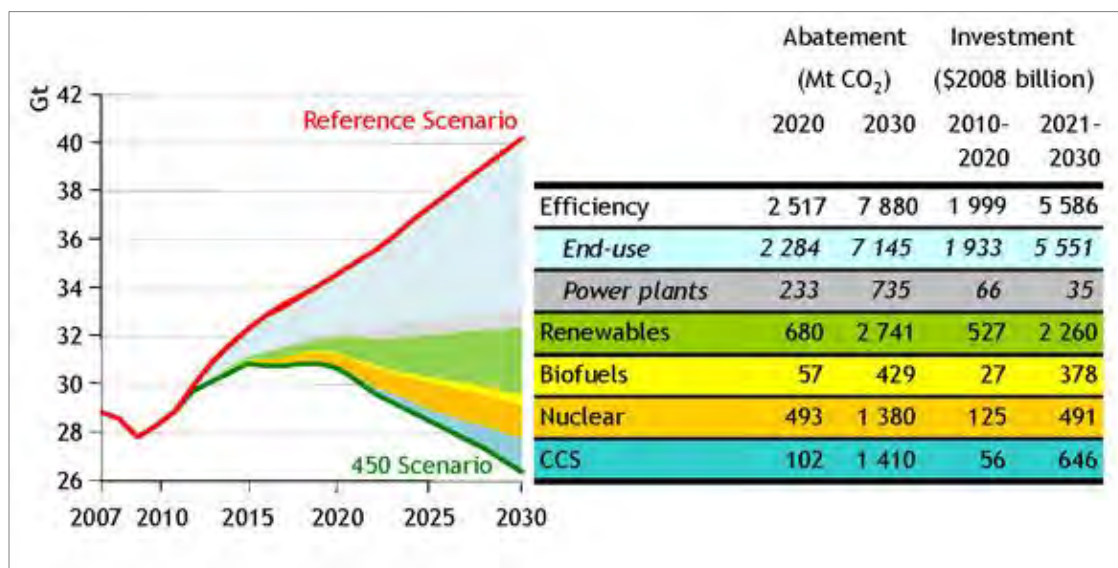
Energetyka, która jest obecnie odpowiedzialna za ok. 40–50% emisji całkowitej, będzie miała 50% udziału w tym wzroście (ca. 7 Gt). Emisja dwutlenku węgla ze środków transportu będzie odpowiedzialna za 25% tego wzrostu, a sektory komunalny, handel i przemysł za pozostały przyrost. Nieco inaczej od trendów obserwowanych w ostatnim ćwierćwieczu, emisje będą rosły szybciej (o 69%), od popytu 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 r., 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 monitoring jego stężenia w atmosferze (1960–1995: 1,4 ppm rocznie), chociaż należy zaznaczyć, że wartość przyrostu mierzona w różnych latach waha się w pewnym stopniu (WMO/UNEP, 2007). Bezwzględny wymogi chwili, zarówno ze względów związanych z ochroną klimatu, jak i ze względów ekonomicznych (opłata za wyemitowanie jednej tony CO₂ może sięgać 30–40 euro za tonę) jest ograniczenie emisji ditlenku węgla. Będzie to możliwe przez zastosowanie OZE i energetyki jądrowej, co dobrze ilustruje poniższy rysunek.



Rys. 3. Emisja ditlenku węgla dla różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Źródło: IEA, OECD, 2007.

Przyjęty program redukcji emisji dwutlenku węgla przy zastosowaniu różnych metod przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Przewidywany scenariusz dotyczący ograniczenia emisji dwutlenku węgla. Źródło: IEA, OECD, 2007.

Inne zanieczyszczenia gazowe SO₂ 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 podane w tab. 5 i 6. Problem ten dotyczy głównie takich krajów jak Polska, w której węgiel pozostaje głównym paliwem dla produkcji elektryczności i energii ciepłej.

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

Tab. 2. Emisja SO₂ w roku 2003, w wybranych krajach. Źródło: IEA, OECD, 2007.

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

Tab. 3. Emisja NO_x w roku 2003, w wybranych krajach. Źródło: IEA, OECD, 2007.

Aktualnie rozpoznany problem, 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 szkodliwych dla zdrowia ludzkiego efektów. 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.

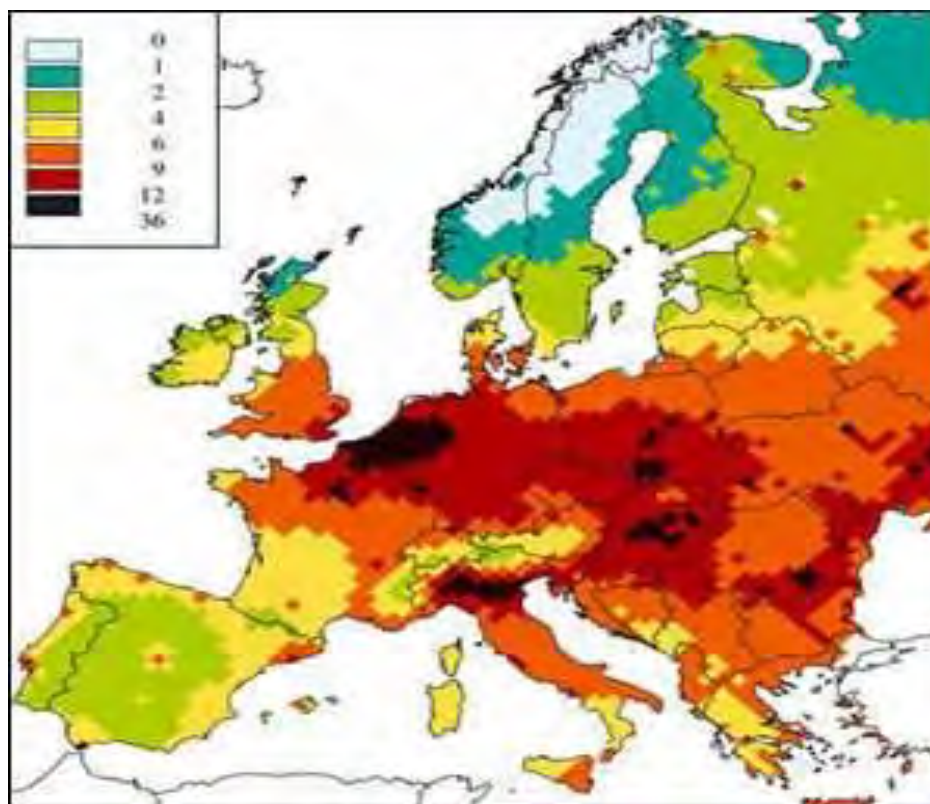
Przy spalaniu węgla emitowane są również pewne ilości rtęci. W Stanach Zjednoczonych elektrownie opalane węglem emitują jedną trzecią rtęci emitowanej ze źródeł antropogennych (48 t/rok) w Europie, co najmniej 20 t/rok (Weem, 2011). Obawy dotyczące tej emisji są związane z faktem, że związki rtęci łatwo wbudowują się w łańcuch pokarmowy człowieka.

W końcu, nowym problemem związanym ze spalaniem paliw jest emisja lotnych zanieczyszczeń organicznych (LZO) w tym wielopierścieniowych związków organicznych. Lista 18 związków o możliwych działaniach kancerogennych została ogłoszona przez EPA i WHO (Stephen, 1998).

Niezbyt dobrze znanym jest fakt, że przy spalaniu obecnie ok. 637,409 mln t węgla rocznie, emisja związków uranu z pyłem i odpadami stałymi wynosi ok. 828,632 t (zawiera on 5883 t uranu-235), zaś emisja toru sięga 2,039,709 t.

Emisja zanieczyszczeń gazowych powoduje znaczne straty ekonomiczne, wg danych niemieckich wynosiły one dla każdej wyemitowanej tony SO₂, NO_x i PM_{2.5} odpowiednio 6000; 5000; 13000 USD (w cenach roku 1990). Straty EU-15 (1990) związane z efektem cieplarnianym wyniosły $4,6 \times 10^9$ – $1,7 \times 10^{11}$ USD. W latach 1997–2008, od 13 do 62% ludności żyjącej w miastach europejskich była narażona na wdychanie powietrza zawierającego małe cząsteczki pyłu zawieszonego PM₁₀ (o wymiarach mniejszych od 10 mikronów), obecnych w stężeniach przekraczających dopuszczalne limity. Należy pamiętać, że limity te ustalane są dla celów normatywnych, ponieważ tak małe cząsteczki wdychane z powietrzem atmosferycznym są zawsze szkodliwe dla zdrowia człowieka. Jeszcze groźniejsze są cząsteczki mniejsze od 2,5 mikrona (PM_{2.5}), przenikające do systemu oddechowego człowieka i dalej do jego obiegu krwionośnego. Obecność drobnych cząstek stałych i ozonu przygruntowego związane z zanieczyszczeniem powietrza stanowi główne zagrożenie dla zdrowia ludzi. W ramach unijnego programu „Czyste powietrze dla Europy” (CAFE) oszacowano, że 348 000 przedwczesnych zgonów rocznie jest spowodowanych narażeniem na obecność drobnych cząstek stałych (PM_{2.5}). Przy tym poziomie narażenia średnia długość życia zmniejsza się o około rok. W Holandii liczba zgonów powodowanych przez PM₁₀ jest większa od będącej wynikiem wypadków samochodowych (Brunkreef i Holgate, 2002). Oceny prowadzone przez Europejską Agencję Środowiska, dla 27 krajów Unii, mówią o sumarycznym skróceniu lat życia ich obywateli o 5 milionów lat! Stosowane w Polsce systemy odpylania i filtracji aerozoli, nie prowadzą do znacznego ograniczenia emisji tych zanieczyszczeń. Udowodniono również, że skład chemiczny i masa pyłinek wpływa na ich toksyczność. I tak, benzo(a)piren (BaP), jest wskaźnikiem emisji kancerogennych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (PAH), emitowanych głównie ze spalania paliw organicznych w kotłach energetycznych i silnikach spalinowych. Wysokie stężenia BaP są obserwowane w Czechach i w Polsce. Coraz bardziej popularne w niektórych regionach Europy opalanie drewnem domów może stać się wkrótce dominującym źródłem emisji tych niebezpiecznych zanieczyszczeń środowiska (Hardy i inni, 2012). Tragiczne, ale ochrona klimatu i zachęta do spalania drewna i biomasy w gospodarstwach domowych, jest jedną z przyczyn tych niekorzystnych dla człowieka i środowiska działań (EEA, 2008). O ile spalanie biomasy w dużych jednostkach energetycznych (wytwarzających energię elektryczną i ciepło) wyposażonych w wysokosprawne systemy ograniczenia emisji zanieczyszczeń i sterowania procesem spalania, może przynieść spodziewane efekty, to spalanie biomasy w kotłach domowych i kominkach, powoduje większą emisję PAH, VOC i drobnych pyłów, od wynikającej od spalania paliw kopalnych w tych samych lub podobnych, paleniskach domowych. Przykładowo, badania przeprowadzone w Lombardii, wykazały, że emisja PM₁₀ z palenisk przydomowych wyniosła 8100 t/rok, co stanowiło jedną trzecią emisji tych zanieczyszczeń notowanych dla tego regionu (Caserini, 2010).

Mapa opublikowana przez EU (EU, 2005) przedstawia regiony, w których przewidywany czas życia jest krótszy nawet o 36 miesięcy w związku z dużymi stężeniami PM 2.5 (rys.5). Niestety, dotyczy to również szeregu regionów w Polsce. To są ciche Czarnobyle, które spowodowały utratę życia i zdrowia o wiele większej liczby istnień ludzkich niż ta tragiczna w skutkach katastrofa 1986 r.



Rys. 5. Spadek średniej długości życia (w miesiącach) spowodowany antropogenicznymi cząstkami stałymi PM2.5 (Źródło: http://ec.europa.eu/environment/news/efe/20/article_2434_pl.htm).

W Stanach Zjednoczonych, gdzie od prawie 20 lat wprowadzono wysokoefektywne systemy odpylania spalin i filtracji gazów wydechowych z silników Diesla, poprawa stanu zdrowia ludności zamieszkującej regiony miejskie jest wyraźna i wymierna.



Rys. 6. Protest przeciwko budowie nowego bloku opalanego węglem w Elektrowni Plomin, Chorwacja, 30.03.2012 (Źródło: <http://oneworldsee.org/content/zelena-akcija-protests-plans-to-build-new-coal-fired-power-plant>).

Redukcja emisji zanieczyszczeń.

Już w tej chwili energetyka konwencjonalna na przygotowanie paliwa (rozdrabnianie, pulweryzacja etc), oczyszczanie spalin (odpylanie, odsiarczanie, odazotowanie) zużywa do 10% wyprodukowanej energii. Proces sekwestracji dwutlenku węgla, jeszcze nie opanowany technicznie, zwiększy znacznie zużycie energii na potrzeby własne elektrowni. Proces oxyspalania, który jest tylko procesem wspomagającym proces sekwestracji, powiększy dalej jałowe zapotrzebowanie na energię niezbędne dla uzysku tlenu z powietrza lub rozkładu wody. Składowanie dwutlenku węgla w strukturach geologicznych i wyeksploatowanych polach naftowych oraz gazowych czy też głębiach oceanów budzi dużo zastrzeżeń. Dlatego też konwencjonalna technika węglowa z zastosowaniem technologii oczyszczania spalin będzie techniką długo dominująca na rynku energetycznym, nawet przy konieczności wnoszenia opłat za emisję CO₂. Dodatkowe koszty pracy energetyki węglowej będą związane z wprowadzaniem nowych ograniczeń emisyjnych dotyczących emisji cząstek pyłu PM_{2,5} i rtęci, a być może i lotnych niemetanowych zanieczyszczeń organicznych. Trendy światowe dotyczą wprowadzania technologii jednoczesnego usuwania wielu zanieczyszczeń gazowych i stałych.

Schemat sekwestracji CO₂ obejmuje trzy zasadnicze stadia: wychwycenie CO₂ emitowanego ze źródła wraz z jego oczyszczeniem, osuszeniem i sprężeniem, jego transport do miejsca magazynowania, wpompowanie CO₂ w geologiczny zbiornik składowania. Typowy koszt wychwycenia CO₂ z gazów spalinowych elektrowni (przy użyciu najlepiej opanowanej technologii polegającej na absorpcji gazu w roztworze amin) wynosi ok. 40–60 euro/t (Damen i in., 2005). Trzeba sobie zatem zdać sprawę, że wprowadzenie polityki założeń polityki klimatycznej w Polsce będzie olbrzymim obciążeniem zarówno dla gospodarki, jak i dla gospodarstw domowych (KIG, 2012).

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, zatężaniu zanieczyszczeń i analizie opartej o metodę GC/MS (Chmielewski i in., 2003). Dlatego też w praktyce ograniczenia dotyczą głównie emisji dioksyn ze spalarni śmieci.

ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII

Biomasa

Produkcja biomasy musi 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 (El Amin, 2007). Problem zrównoważonego rozwoju przemysłu biopaliw przedstawia ostatni raport wydany przez ONZ (UN Energy, 2007). 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 (holtzgas). Bioetanol jest dodatkiem do paliwa w wielu krajach, w Brazylii wymagane jest, aby silniki samochodowe mogły spalać mieszankę zawierająca 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 będącą o 9% niższą od ciepła spalania normalnego paliwa do silników diesla, produkowanego z ropy naftowej. Rynek biopaliw zaczyna się rozwijać i w Polsce (KIB, 2011). 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 (SCI, 2008).

Ostatnie badania wykazują jednak, że ocena pozytywnego wpływu stosowania biomasy na zmniejszenie efektu cieplarnianego nie jest tak prosta jak się do tej pory wydawało. Wszystko zależy od lokalnych warunków i typu stosowanej biomasy. W naszym klimacie potrzeba ok. 100 lat na odtworzenie lasów i stosowanie biomasy może być neutralne dla składu atmosfery tylko przy przyjęciu odpowiednio długich przedziałów czasowych. Naukowcy podnosząc ten argument postulują aby emisje z energetycznego wykorzystania biomasy nie były dalej wyłączone z LCA (Life Cycle Assessment), lub traktowane tak samo jak emisje z innych procesów energetycznych. Bez wątplenia neutralność użycia biomasy może być udowodniona poprzez pełną ocenę całego procesu jej wytwarzania (uprawa, zbiór, przetwarzanie, transport i spalanie). Niektórzy naukowcy żądają zrewidowania podjętej na konwencji OECD w roku 1991 decyzji, o tym, że emisje CO₂ wynikające z użycia biomasy nie są zaliczane do bilansu emisji poszczególnych krajów członkowskich (UNEP, 2011).



Rys.7. Protest organizacji Zieloni 2004 przeciwko współspalaniu biomasy, 28.02.2012. Źródło: warszawa.naszemiasto.pl, oraz przeciwko budowie biogazowni w Ożarowie, 13.04.2011. Źródło: <http://www.dziennikwschodni.pl/apps/pbcs.dll/tngallery?Site=DW&Date=20110413&Category=galeria03&ArtNo=4004526&Ref=PH>

Energetyka wiatrowa

Rozwój energetyki wiatrowej na lądzie, jest sprzeczny z polityką zalesiania pól i nieużytków. Z drugiej strony energetyka wiatrowa ma negatywny wpływ na rozwój turystyki i życie zwierząt. Ochrona ptaków, tak ważna w Polsce, może też być trudniejsza. Tak np. w Kalifornii na farmie wiatrowej „Altamont Pass” zginęło lub zostało rannych, w ciągu trzech lat, 30 zagrożonych wyginięciem złotych orłów i 75 innych ptaków drapieżnych w tym jastrzębi myszołłowów. Dlatego też w Szkocji będącej zagłębiem wiatrowym Wielkiej Brytanii powstał wielki społeczny ruch przeciwny budowie nowych farm wiatrowych na morzu.



Rys.8. Logo organizacji "Communities Against Turbines Scotland" i zdjęcie z jednego z ostatnich protestów (Źródło: www.communitessagainstturbinescotland.com).

Energetyka słoneczna.

Energetyka słoneczna opiera się o kolektory do podgrzewania wody i fotowoltaikę. Pierwsze z tych zastosowań nie powoduje żadnych szkodliwych dla środowiska efektów, oczywiście podobnie jak pompy ciepła potrzebuje pewnej ilości energii elektrycznej do napędu silniczków pomp przetwarzających wodę. Jeśli chodzi o fotowoltaikę, która w Polsce nigdy nie będzie przedsięwzięciem mającym duże znaczenie w ogólnym bilansie wytwarzania energii elektrycznej, główne zagadnienia środowiskowe, poza zajęciem dużej powierzchni, dotyczą procesów ogniowych stosowanych przy wytwarzaniu materiałów niezbędnych do wyprodukowania fotoogniw. Zawierają one arsen, kadm i krzem będący materiałem o wysokiej temperaturze topnienia.

Hydroenergetyka

Hydroenergetyka jest czystym, nie emitującym zanieczyszczeń źródłem energii elektrycznej, jednak również wpływa, w mniejszym lub większym stopniu, negatywnie na środowisko. Budowa dużych tam zupełnie zmienia stosunki wodne w jej otoczeniu, zakłóca równowagę ekosystemu, która w wielu przypadkach była budowana przez wiele tysięcy lat. Obecnie w świecie istnieje ok. 40 tysięcy dużych tam zakłócających przepływ wielu rzek i kompletnie zmieniających obieg wody w ich systemach. Dlatego też w ostatnich latach wiele krajów wstrzymało budowę nowych tam i zostało zmuszonych do inwestowania w próby ograniczania wpływu na środowisko przez już istniejące.



Rys.9. Protest społeczny przeciwko budowie tamy i hydroelektrowni Xayaburi w Laosie na rzece Mekong, Tajlandia, 26.04.2012 (Źródło: camwatchblogs.blogspot.com/.../thai-protestors-rally-against-xayaburi.html). Łososie które zginęły w wyniku obniżenia poziomu wody przez zapórę w Klamath w roku 2002 (Źródło: www.internationalrivers.org/environmental-impacts-of-dams).

ENERGETYKA JĄDROWA

Opozycja przeciw energetyce jądrowej opiera się o kilka dogmatów : (1) nie istnieje technologia bezpiecznego składowania odpadów z paliwa wypalonego które pozostaną toksyczne przez szereg lat, (2) elektrownie jądrowe mogą być wstępem do produkcji broni jądrowej (3) elektrownie są bardzo drogie i wreszcie, (4) zdarzają się wypadki, takie jak Czarnobyl, czy też Fukushima. Jednakże wielu poważnych badaczy uważa, że właśnie spalanie, czy to paliw kopalnych, czy też biomasy, będzie prowadziło do największej katastrofy jaka czeka świat (Raggio, 2012). Wg niego produkcja elektryczności z wykorzystaniem procesu rozszczepienia jądra atomowego, a następnie fuzji jądrowej, jest jedyną nadzieją na zatrzymanie katastrofy klimatycznej i zapobieżeniu, wymuszonemu przez to zjawisko ograniczeniu wykorzystania energii elektrycznej przez człowieka.

	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%

Tab. 4. Obszar zajęty przez elektrownie wykorzystujące różne pierwotne źródła energii.



Rys.10. Protest przeciwko budowie elektrowni jądrowych, Asheville, USA, 10.03.2012. (Źródło: <http://www.mountainx.com/article/41092/Photos-Fukushima-disaster-remembered-at-protest-against-nuclear-power>).

James Lovelock stwierdził “ Wierzę, że energetyka jądrowa jest jedynym źródłem które zaspokoi nasze potrzeby i nie będzie zagrożeniem dla Gaii, nie wpływając na jej możliwości co do utrzymania znośnego klimatu i składu atmosfery. Wynika to stąd, że reakcje jądrowe są miliony razy bardziej energetyczne od reakcji chemicznych. Reakcje chemiczne polegające na spalaniu 1 kg węgla w tlenie wydzielają ciepło równoważne około dziewięciu kWh. Synteza termojądrowa izotopów wodoru daje miliony razy więcej energii, podobnie jak reakcja rozszczepienia uranu.” (Lovelock,2006).Obszerne analizy nt rozwoju energetyki jądrowej w Polsce przynosi ostatnio wydana obszerna książka na ten temat (Jeleń i Rau, 2012).

Wnioski

A zatem to jest nasz wybór, z niewielu jednak opcji. Siedem milionów ludzi zamieszkuje ziemię, muszą jeść, pić i mieć dach nad głową. Ponad 1,5 miliarda ludzi nie ma dostępu do elektryczności, a ponad 2 miliardy nie mają dostępu do czystej wody pitnej, czy to ma być nasz wybór ?. Amerykańskie powiedzenie głosi – nie ma lunchu za darmo. Nasze przystawie - nie ma róży bez kolców.

Literatura

- BIP, 2010, bip.msp.gov.pl/.../Polityka_energetyczna_Polski_do_2030_roku.html
- Brower M., 1992, *Coal Energy: Renewable Solutions to Environmental Problems*, MIT Press, 220 str
- Brunkreef B., Holgate S.T. 2002, Air pollution and health, *The Lancet*, 360 (9341), 1233-1242
- Caserini S., Livio S., Giugliano M., Grosso M., Rigamonti, 2010, LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy), *Biomass and Bioenergy*, 34(4) 474–482
- Chmielewski A.G., Ostapczuk A., Licki J., Kubica K., 2003, 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*, 37, 142–147
- Chmielewski A.G., 2004, 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, [<http://www.eolss.net>]
- Chmielewski A.G., 2005, Application of ionizing radiation to environment protection, *Nukleonika* 50(3),17–24
- Chmielewski A.G., 2010, Rozwój technologiczny w energetyce jądrowej i jego wpływ na zapotrzebowanie energetyczne świata, *Biuletyn PIG*, 430, 77–80
- Coal Facts, 2006, Edition with 2005 data, www.worldcoal.org
- Cook, E., 1971, "The Flow of Energy in an Industrial Society" *Scientific American*,
- Damen K., Faaij A., van Bergen F., Gale J., Lysen E., 2005, Identification of early opportunities for CO₂ sequestration— worldwide screening for CO₂-EOR and CO₂-ECBM projects, *Energy*, 30(10), 1931–1952
- DESTATIS, 2011, Renewable Energy in Europe, Federal Statistical Office of Germany, www.eds-destatis.de
- DOE US, 2012, GEN IV, Nuclear Power Systems, <http://www.ne.doe.gov/genIV/neGenIV1.html>
- EEA, 2008, http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/particulate-matter-pm10-2007-annual-limit-value-for-the-protection-of-human-health-2/particulate-matter-pm10-annual-2007-update/PM10_Year_2008.eps.75dpi.gif/at_download/image
- EIA, 2007, Oil and Natural Gas Proven Reserves, Energy Information Administration USA, January 9, 2007
- *El Amin A.*, 2007, Food industry calls for a more balanced biofuel policy, *FoodProductionDaily.com*, 05 Feb 2007
- *ENS*, 2012, Nuclear power plants in Europe, <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-europe.htm>
- EU, 2005, http://ec.europa.eu/environment/news/efe/20/article_2434_pl.htm
- Gamble J., 2010, Avoiding Energy Sprawl, nuclearfissionary.com/.../avoiding-energy-sprawl/
- Goldberg S.M., Rosner R., 2011, Nuclear Reactors: Generation to Generation, American Academy of Arts & Sciences, Cambridge
- Hardy T, Musialik-Piotrowska A, Ciolek J, Moscicki K, Kordylewski W, 2012, Negative Effects of Biomass Combustion and Co-combustion in Boilers, *Environment Protection Engineering*. 38 (1): 25-33
- Horn M., Kemfert C., Kalashnikov V., 2006, Can the German Electricity Market Benefit from the EU Enlargement? : Results of Scenario Calculations Using the EMELIE Model, Berlin
- International Energy Agency, 2006, World Energy Outlook <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/table12.html>
- International Energy Agency, 2008, World Energy Outlook
- Institute of Electrical Engineers, 2005, Nuclear Reactors Types, London, UK, www.carnegieendowment.org/.../nuclear_reactors
- Jeleń K., Rau Z., (red.naukowa), 2012, Energetyka Jądrowa w Polsce, LEX
- KIB, 2011, Krajowa Izba Biopaliw, www.kib.pl
- Kowalska A., Wilczyński A., 2007, *Źródła Rozproszone w Systemie Elektroenergetycznym*, KAPRINT, Lublin
- KIG, 2012, *Ocena Wpływu Ustanowienia Celów Redukcji Emisji WG Dokumentu KE „Roadmap 2050” na Sektor Energetyczny, Rozwój Gospodarczy, Przemysł i Gospodarstwa Domowe w Polsce do Roku 2050*, Krajowa Izba Gospodarcza, WWW.kig.pl
- Kusto Z., Porównanie elektrowni wiatrowych w szacowanej produkcji energii elektrycznej oraz dopasowaniu do danych warunków wiatrowych, Politechnika Gdańska
- Lovelock J., 2006, *The Revenge of Gaia*, Penguin Books, N.Y.
- Łucki Z., Misiak W., 2011, Energetyka a środowisko- Aspekty socjologiczne, PWN, Warszawa

- *Motyka J, Czop, M. ; Jończyk, W. ; Stachowicz, Z. ; Jończyk, I. ; Martyniak, R., 2007, Wpływ głębokiej eksploatacji węgla brunatnego na zmiany środowiska wodnego w rejonie Kopalni "Bełchatów", 2007, Górnictwo i Geoinżynieria , 31(2), 477--487*
- Peak Oil, 2005, Association for the Study of Peak Oil and Gas, IV Workshop on Oil and Gas Depletion, 19–20 May 2005, Lisbon, Portugal
- PTN, 2009, ENERGETYKA JĄDROWA – PERSPEKTYWY ROZWOJU W POLSCE, MDI Strategic Solutions & Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Warszawa , s. 71
- Raggio G., 2012, In Praise of Nuclear Power, weconsumetoomuch.com/in-praise-of-nuclear-power
- SCI, 2008, 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>
- **Sołtyk W., 2009, Zmiany chemizmu wód podziemnych zachodzące na skutek odwadniania złoża węgla brunatnego "Bełchatów", Górnictwo i Geoinżynieria 32(2), 307-315**
- Stephen H., 1998, Safe, Hazard and Risk Assessment of Chemical Mixtures Using the Toxic Equivalency, Environ. Health. Perspect. n106 (suppl.4), 1051–1058
- Swieboda P., 2006, The EU's Strategic Challenge Shaping the External Dimension of Energy Policy, demos EUROPA, Warsaw 2006, www.demoseuropa.eu/upload/editor/demos/File/Raport-External-Dim.pdf
- Trainer T., 2007, Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society, Springer
- UN Energy, 2007, Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers, UN Energy, April 2007
- UNEP, 2011, Biomass combustion's green credentials in question http://www.climateactionprogramme.org/news/biomass_combustions_green_credentials_in_question/
- Van Harmelen T., Bakker J., De Vries B., Van Vuuren D., Elzen M., Mayerhofer P., 2002, Long-term reductions in costs of controlling regional air pollution in Europe due to climate policy, Environmental Science & Policy 5, 349–365
- Weem A.P., 2011, Reduction of mercury emissions from coal fired power plants, Working Group of Strategies and Review, Geneva Informal document No.3 www.unece.org/.../Info.doc.3_Reduction_of_mercury_emissions_from_coal_fired_power_plants.pdf http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/pollutioncontrols/overview_mercurycontrols.html
- WMO/UNEP, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch/...and.../publications_and_data_reports.htm
- Referat ten był prezentowany na XXXIII Międzynarodowej Konferencji Ekologicznej, Fundacja Edukacji Ekologicznej i Zrównoważonego Rozwoju Zielonych RP, Łódź, 14.09.2012

Prof. dr hab. inż. Andrzej Grzegorz Chmielewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Politechnika Warszawska

Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej- SEREN



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

PIOTR CZERSKI

ODPOWIEDZIALNOŚĆ OPERATORA ELEKTROWNI JĄDROWEJ



To nie my, to oni ! Zleciliśmy im robotę, a oni mimo posiadanych kwalifikacji i doświadczenia ją spartaczyli. I to było powodem awarii.

Czy takie tłumaczenie jest właściwe dla przedsiębiorstwa eksploatującego elektrownię jądrową – jej operatora ? Czy tak mogli wybrnąć z sytuacji Madziarzy kiedy w kwietniu 2003 r. w elektrowni jądrowej (EJ) Paks na Węgrzech podczas czyszczenia kaset paliwowych doszło do ich uszkodzenia ?

Zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej są jednoznaczne - „Ostateczna odpowiedzialność za bezpieczeństwo EJ spoczywa na organizacji ją eksploatującej. Nie ma sposobu na rozmycie tej odpowiedzialności na działalność projektanta, dostawcy, wykonawcy, konstruktora czy nadzorującego. /.../

Organizacja eksploatująca ponosi odpowiedzialność w obszarach, gdzie jej funkcje nadzoru nie są bezpośrednio, tak jak obszary wykonawstwa. Poprzez użycie swojej własnej załogi i swoich zasobów albo poprzez agencje działające w jej imieniu organizacja eksploatująca w sposób rygorystyczny dokonuje przeglądów, kontroli, oraz jeśli to potrzebne aprobeuje różne procesy, by zapewnić, że wskaźniki, które wyznaczają bezpieczeństwo elektrowni są traktowane z należytą powagą. Tyczy się to dla przykładu badań lokalizacyjnych, projektowania, fabrykacji, budowy, prób sprawdzających i rozruchu.

Ta zasada, że organizacja eksploatująca ponosi główną odpowiedzialność w kwestii bezpieczeństwa jest zasadą numer jeden. Odpowiedzialności innych uczestników są również znaczące dla bezpieczeństwa jak i dla spraw finansowych czy prawnych. /.../” [1] (tłum.nieoficjalne)

No dobrze, ale jak taka „odpowiedzialność” może wyglądać ? Prześledzić to można na przypadku awarii w EJ Paks. Może to być bardziej pożyteczne w polskim przypadku niż skupianie się na ostatniej, spektakularnej awarii w Fukushimie, której „realia” są dalekie od naszej rzeczywistości.

Jak to było ? Kto zawinił ? W drugim bloku EJ Paks wyposażonej w rosyjskie reaktory WWER-440 trwały prace konserwacyjno-remontowe. Przeprowadzane one były w okresie wymiany części paliwa jądrowego na nowe. W ramach tych prac przeprowadzono czyszczenie paliwa z produktów korozji. Osadziły się one na nim w trakcie eksploatacji. Źródłem tych osadów była wytwornica pary, której własności metalurgiczne stanowiły od początku problem. Nie pierwszy raz musiano już przeprowadzać taką operację. Dziwne, że projektant elektrowni nie był obciążony rozwiązaniem tych kłopotów.

Operację czyszczenia kaset paliwowych (zestawów paliwowych) wykonywała po raz kolejny firma Siemens występująca po zmianach własnościowych jako FRAMATOME ANP. Wcześniej projektowana przez nią instalacja czyszcząca okazała się zbyt mało wydajna. Była to instalacja dodatkowa, nieprzewidziana w pierwotnym projekcie przez producenta. Należało zaprojektować ją jeszcze raz na nowo.

Taka łatanina nie wychodzi na dobre. Na domiar złego z dawnego Siemensa odeszła część pracowników, prace konstrukcyjne nad nowym układem wykonywał młody, niedoświadczony inżynier. Było to konsekwencją odchodzenia Niemiec od energetyki jądrowej.

Nowy projekt przewidywał by kasety (30 sztuk) z prętami paliwowymi przeznaczone do oczyszczenia, przetransportowywane były do specjalnego zbiornika zanurzonego w wydzielonej części basenu paliwa wypalonego. Proces obejmował najpierw mycie paliwa wodą o temp. 90°C, następnie chłodzenie wodą i usuwanie rozpuszczonych osadów. Następnie przepływ z instalacji czyszczącej przełączano na układ boczny z pompą nurnikową podającą wodę wprost z basenu. Działanie układu chłodzenia w tym reżimie miało trwać kilka minut, gdyż następowała po niej operacja podnoszenia pokrywy zbiornika i przetransportowywanie kaset paliwowych z powrotem do reaktora. Ten sposób chłodzenia zbiornika przedstawiono na rys.1.

Istnieją podstawowe różnice w konstrukcji między zbiornikiem na 7 kaset (zestawów paliwowych) używanym wcześniej, a nowszym na 30 kaset. Te różnice były rozpatrywane przez projektanta niestety tylko pod kątem wydajności i kryteriów oczyszczania. Nowy układ traktowano jako modyfikację starego, sprawdzonego w działaniu. Nie zauważono, że powiększenie pojemności zmieniło warunki ciepłno-przepływowe.

Najpoważniejszym błędem o charakterze technicznym był brak dogłębnych analiz ciepłno-przepływowych i nowych analiz bezpieczeństwa. Projektanci skupili się prawie wyłącznie na prawidłowości procesu oczyszczania, zaniedbując warunki chłodzenia paliwa jądrowego. Na przykład, w analizach bezpieczeństwa nie wzięto pod uwagę możliwości bocznikowania przepływu wewnątrz zbiornika co niekorzystnie wpłynęło na efektywność chłodzenia. Ponadto po zakończeniu operacji oczyszczania, podczas przygotowania do operacji przeładunku ze zbiornika w którym kasety były czyszczone do reaktora, tylko jedna pompa była dostępna. Jest to sprzeczne z zasadą zabezpieczenia się przed awarią pojedynczego elementu. Poza tym na operację przygotowania do przeładunku paliwa do zbiornika reaktora przeznaczono bardzo krótki czas co też jest sprzeczne z zasadami bezpieczeństwa.

Niezależnie od błędów związanych z działaniem układu chłodzenia instalacji czyszczącej, konstruktor popełnił też inne błędy mające wpływ na bezpieczeństwo pracy projektowanej instalacji. Nie uwzględniono zagrożenia wynikającego z wydostania się ze zbiornika chemikaliów używanych w procesie czyszczenia. Zupełnie błędnie i bezpodstawnie założono też, że całkowita utrata zasilania elektrycznego nie ma wpływu na bezpieczeństwo. Wyposażenie układu oczyszczania w aparaturę kontrolno-pomiarową było zbyt ubogie. Czyżby oszczędności wchodziły w grę? Przemysłowy układ do czyszczenia kaset paliwowych to nie instalacja badawcza, nie potrzeba w niej mnożyć układów pomiarowych – taki mógł być sposób myślenia projektanta. Brak pomiaru temperatury w zbiorniku miał jednak niestety wpływ na nieprawidłową ocenę awarii i przyczynił się do zbyt późnego przedsięwzięcia kroków zaradczych.

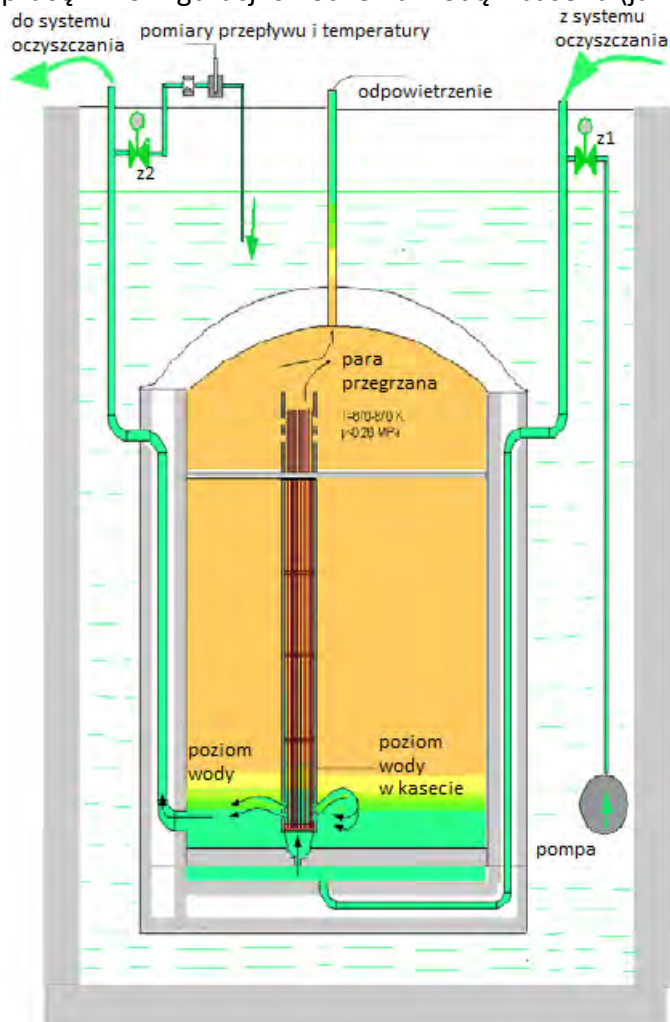
Nie bez winy był też zleceniodawca prac czyli EJ Paks. Wady konstrukcyjne układu oczyszczania winny być wykryte. Zaufanie doświadczeniu Siemens (FRAMATOME ANP) nie usprawiedliwia nie podjęcia prac sprawdzających. To, że tego nie wytknął, przez niedopatrzenie, węgierski dozór jądrowy nie usprawiedliwia elektrowni.

Błędy związane z niewłaściwym zarządzaniem jakością (quality management) nie dotyczyły zresztą tylko projektowania, ale i niepodjęcia ze strony elektrowni właściwych działań związanych z podziałem kompetencji i nadzorem procesu oczyszczania. I tak np. sposób egzekwowania całkowitej odpowiedzialności posiadacza licencji (EJ Paks) nie był nawet dyskutowany.

Techniczne aspekty procesu oczyszczania pełniły pierwszoplanową rolę zamiast spraw związanych z bezpieczeństwem jądrowym. Formalne traktowanie tych zagadnień ilustruje fakt, że analizy bezpieczeństwa procesu powstały przed ukończeniem projektu technicznego. W efekcie ekipa FRAMATOME ANP przeprowadzająca prace (podwykonawcy) przy oczyszczaniu paliwa jak i koordynatorzy ze strony EJ Paks nie byli świadomi wielu zagrożeń.

Sama operacja czyszczenia pozornie byłaby zwykłą procedurą chemiczną, gdyby nie uczestniczyło w niej paliwo jądrowe generujące cały czas ciepło powyłączeniowe i będące potencjalnym źródłem zagrożenia radiacyjnego.

Awaria zdarzyła się 10 kwietnia 2003 r. Zespół FRAMATOME ANP zakończył czyszczenie szóstego kompletu 30 kaset (zestawów) paliwowych, które trwało od poprzedniego dnia. Zgodnie z instrukcją układ przestawiono na pracę w konfiguracji chłodzenia wodą z basenu (jak na rys.1).



Rys.1 Schemat układu chłodzenia zbiornika w którym doszło do zniszczenia kaset paliwowych (uwidoczniono tylko jedną z 30). Obieg chłodzenia: pompa pobierająca wodę z basenu – rura doprowadzająca wodę przez zawór z1 od dołu do zbiornika – przepływ wody przez kasetę – rura wyprowadzająca wodę przez zawór z2 i punkt pomiaru temperatury - basen.

Część instalacji w której realizowane było oczyszczanie, nie jest uwidoczniona na rysunku. (zaczepnięto z [2])

Odłączono wówczas system oczyszczania i podłączono zbiornik z kasetami paliwowymi do układu chłodzenia wodą z basenu wypalonego paliwa. Chłodzenie wymuszane było wówczas przez pompę nurnikową o wydajności kilkunastokrotnie razy mniejszej niż pompa głównego systemu oczyszczania. Pracownicy FRAMATOME ANP zgłosili personelowi remontowemu reaktora zakończenie operacji czyszczenia, ale zespół remontu reaktora odłożył otwarcie zbiornika zawierającego paliwowo jądrowe na później. Spowodowane było to tym, że suwnica potrzebna do uniesienia pokrywy zbiornika była zajęta wykonywaniem innych prac. Nie zdawano sobie sprawy z tego, że analizy cieplne tego sposobu chłodzenia wykonane były jedynie dla czasu przeznaczanego na otwarcie pokrywy zbiornika, określonego na maks. 9 minut. Długie chłodzenie tym sposobem nie było przewidywane.

Brak było jednak wyraźnego zakazu przedłużania tej operacji. Oprócz niepełnej procedury, technologia wymuszająca krótki przebieg operacji przeładunku była z punktu widzenia zasad bezpieczeństwa niedopuszczalna. Także brak koordynacji prac i nadzoru ze strony EJ Paks jest tu rażący. Wypalone paliwo, generujące cały czas ciepło powodowało podnoszenie się temperatury w zbiorniku. Nie zostało to zauważone, gdyż pomiaru temperatury w zbiorniku nie przewidziano w projekcie. Po około trzech godzinach nastąpił wzrost poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia. Zdziwiło to operatorów, ale nie potrafiąc tego wytłumaczyć, zbagatelizowali to zjawisko. Był to kolejny błąd o charakterze proceduralnym. Względy bezpieczeństwa wymagały nie bagatelizowania tych sygnałów.

Po kolejnych trzech godzinach nastąpiło nagłe uwolnienie promieniotwórczego Kr-85 do układu (zasygnalizowane przez detektory), a po kilku minutach obecność tego gazu stwierdzono w hali (po przetłoczeniu wody chłodzącej do basenu krypton wyostał się z niego do atmosfery hali reaktora). Pracownicy FRAMATOME ANP tłumaczyli to uszkodzeniem pręta paliwowego. Błędne kody obliczeniowe nie pozwoliły właściwie ocenić skali nieszczelności. W związku ze wzrostem dawki dyżurny dozymetrysta zarządził ewakuację personelu z hali reaktora.

Nad ranem następnego dnia (11 kwietnia) postanowiono podnieść pokrywę zbiornika w którym kasety paliwowe poddawane były zabiegom czyszczenia. Chciano przenieść paliwo do reaktora i ocenić stan jego uszkodzenia za pomocą kamer. I tu nastąpiła kolejna kompromitacja. Próba zdjęcia pokrywy zbiornika nie udała się, gdyż jedna z lin nośnych zerwała się i pokrywa pozostała w pozycji uchylonej, z kilkunastocentymetrową szczeliną. Urządzenia dźwigowe od dawien dawna kontrolowane są przez krajowe urzędy dozoru technicznego i takie zdarzenie nie miało prawa mieć miejsca, zwłaszcza w elektrowni jądrowej.

Zimna woda, która napłynęła z basenu do zbiornika spowodowała dalsze uszkodzenia rozgrzanego paliwa. Operacja otwarcia zbiornika spowodowała wydostanie się z niego do basenu pary zawierającej substancje promieniotwórcze. Jednocześnie wewnątrz zbiornika wypełnione zostało zimną wodą z basenu. Jak się później okazało szok termiczny spowodował popękanie koszulek prętów paliwowych i rozsypanie się pastylek paliwowych we wnętrzu zbiornika. Uwolnione substancje promieniotwórcze wydostały się do zbiornika, stamtąd do basenu paliwa wypalonego i do hali. Ponieważ zarządzono niefrasobliwie pracą układu wentylacji z maksymalną wydajnością, część z nich wydostała się przez komin na zewnątrz. Spowodowało to zarejestrowanie poza elektrownią wzrostu promieniowania o wartości pięciokrotnie większej od naturalnego poziomu tła. W oparciu o to, awarię zaklasyfikowano jako incydent oznaczany wg międzynarodowej skali jako INES 2. Nastąpiło bowiem zdarzenie prowadzące do znacznego skażenia w miejscach w których nie powinno się ono pojawić, co wymaga podjęcia działań naprawczych.

Wkrótce moc dawki mierzona na stacji monitoringu wróciła do poziomu normalnego.

Kilka dni później, 16 kwietnia udało się całkowicie podnieść pokrywę zbiornika. Inspekcja przy pomocy kamery wykazała, że pastylki paliwowe znajdują się na dnie zbiornika. Było to powodem spekulacji co do możliwości przekroczenia przez nie masy krytycznej. Na terenie wokoło elektrowni ogłoszono alarm i podniesiono klasyfikację wydarzenia do poziomu INES 3 - poważny incydent. Wezwano ekspertów rosyjskich i specjalistów FRAMATOME ANP. Oceniono, że układ pozostawał w stanie głęboko podkrytycznym i nie było żadnego zagrożenia wystąpieniem niekontrolowanej reakcji łańcuchowej. Do zbiornika dodano jednak kwasu borowego (substancji pochłaniającej neutrony, zatrzymującej przez to reakcję łańcuchową) i zainstalowano dodatkowe pompy

chłodzące. 20-go kwietnia opracowano procedury dalszego postępowania, a stan pogotowia alarmowego został odwołany.

Podsumowując przyczyny awarii w EJ Paks stwierdzono, że została ona spowodowana błędami proceduralno-technicznymi, a konkretnie niedostatecznym chłodzeniem czyszczonych kaset paliwowych. Do jej wystąpienia przyczyniła się z jednej strony firma FRAMATOME ANP, która zaprojektowała układ niezgodnie z wymaganiami bezpieczeństwa i niewłaściwie prowadziła proces chemicznego oczyszczania paliwa, a z drugiej strony pracownicy EJ Paks i pracownicy dozoru, którzy zaufali renomowanemu dostawcy urządzenia, nie sprawdzili bezpieczeństwa przed jego zainstalowaniem i nie nadzorowali realizowanej przez firmę FRAMATOME ANP procedury oczyszczania paliwa. Głównym zarzutem wobec EJ Paks było spowodowanie zagrożenie bezpieczeństwa poprzez "ślepe" zaufanie do wykonawcy zadania. Przyczyny awarii zostały starannie przeanalizowane przez specjalistów krajowych i przez misję ekspertów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, zaproszoną przez władze węgierskie. Zarzucano Węgom braki w „kulturze bezpieczeństwa” co przejawiało się między innymi w tym, że decyzje podejmowano kolektywnie, nie stosując zasady jednoosobowej odpowiedzialności. Trwająca reorganizacja w EJ Paks odegrała też negatywną rolę. Analizy potwierdziły, że zagrożenia dla ludności i elektrowni nie było, lecz skutki awarii wewnątrz basenu paliwa wypalonego i hali reaktora były znaczące. Niczyje zdrowie nie ucierpiało, nie było też strat przyrodniczych. Skutki radiologiczne były pomijalnie małe w przypadku pracowników, a żadne w przypadku ludności.

Straty finansowe elektrowni były znaczne. Wynikły one nie tylko ze zniszczenia kaset paliwowych i kosztów dekontaminacji w hali reaktora ale też z tego, że awaria spowodowała ponad roczny przestój jednego bloku elektrowni. Przyczyniła się ona też do zawieszenia na kilka lat budowy nowego bloku energetycznego w EJ Paks.

Konsekwencje personalne nie były specjalnie dotkliwe - prezes urzędu dozoru jądrowego złożył rezygnację, natomiast w samej EJ Paks zwolniono ze stanowiska zastępcę dyrektora do spraw bezpieczeństwa. Były to więc jak widać jedynie konsekwencje o charakterze służbowym, a nie prawnokarnym. Spór kto jest winien – Siemens czy EJ Paks nie został też rozstrzygnięty.

Z odpowiedzialnością operatora elektrowni jądrowej nie było więc na Węgrzech najlepiej.

A jak to jest w Polsce ? Można by się obawiać, że podobnie. Jesteśmy przecież dwa bratanki – i do szabli i do szklanki. Są podobieństwa ale i różnice.

Podobieństwem jest to, że nasze gospodarki i system prawny poddane były przez półwiecze ekonomicznemu eksperymentowi socjalizmu sowieckiego. Problemy mogą więc być podobne. Ale my, jak wskazują przykłady poniżej, bywaliśmy ostrożniejsi.

Węgrzy podobnie rozpoczęli przygodę z energią jądrową. Do dzisiejszego dnia eksploatują bliźniaczy do naszej EWY w Świerku reaktor w Budapeszcie. Węgrzy swój reaktor zmodernizowali, nasz pierwszy reaktor został w latach dziewięćdziesiątych zlikwidowany z powodu jego podeszłego wieku.

Węgrzy uruchomili w latach osiemdziesiątych EJ Paks wyposażoną w rosyjskie reaktory WWER-440. Posiada ona podobny system lokalizacji awarii jak miała mieć niedokończona u nas elektrownia żarnowiecka. U nas w efekcie różnych sporów związanych zarówno z kwestiami finansowymi jak i bezpieczeństwem - budowa została przerwana.

Jak mówi rosyjskie porzekadło: „tolko durak ucitca na swoich oszibkach” - uczmy się na cudzych błędach. Minimalizujemy ryzyko powtórzenia węgierskich niedociągnięć - nieprzemyślanych rozwiązań organizacyjnych motywowanych oszczędnościami i braków kompetencyjnych, ślepego

zaufania do wynajętych zagranicznych firm. Szukajmy lepszych wzorców opartych na sprawdzonych zachodnich rozwiązaniach organizacji pracy.

Pomóc w tym mogą przepisy. Nasze Prawo Atomowe [4] opisuje w swoim 12 rozdziale odpowiedzialność cywilną za szkody jądrowe. Szkada jądrowa rozumiana jest tam jako: szkoda na osobie, szkoda w mieniu, szkoda w środowisku. Prawo obciąża operatora elektrowni jądrowej - przedsiębiorstwo eksploatujące elektrownię, czyli tzw. „osobę eksploatującą” wyłączną odpowiedzialnością za szkodę jądrową spowodowaną wypadkiem jądrowym, z wyłączeniem przypadku jeśli szkoda ta nastąpiła bezpośrednio wskutek działań wojennych lub konfliktu zbrojnego. Jest to jednak odpowiedzialność cywilna ograniczona zresztą do kwoty niespełna półtora miliarda złotych. (W przypadku większych strat tworzony jest specjalny fundusz).

Polskie Prawo Atomowe przewiduje też odpowiedzialność finansową dyrektora elektrowni jądrowej za niedopatrzenia, w tym za niedopełnienie obowiązków w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej przy pracy z materiałami jądrowymi, czy też za dopuszczenie do narażenia pracownika w związku z przekroczeniem dawek dopuszczalnych. Groziłaby mu za to obecnie kara administracyjna w wysokości do około 700 tys. zł. (patrz rozdz. 15 Prawa Atomowego).

Zgodnie z ogólną zasadą dyrektor elektrowni (tzw. kierownik jednostki organizacyjnej) jest odpowiedzialny jednoosobowo, lecz oczywiście za podejmowanie decyzji ruchowych bezpośrednio odpowiadają osoby z dozoru ruchu, wyznaczone przez niego (zgodnie z organizacją i odpowiednimi procedurami administracyjnymi). W razie potrzeby osoby te otrzymują wsparcie "inżyniera ds. bezpieczeństwa" (zmianowego lub pełniącego dyżur domowy) [5].

Powstają nowe rozporządzenia Rady Ministrów stanowiące akty wykonawcze do Prawa Atomowego. Zapowiadane są też wytyczne naszego dozoru jądrowego (Państwowej Agencji Atomistyki). Zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w kwestii odpowiedzialności nie mogą być martwym prawem.

Operator polskiej elektrowni jądrowej będzie musiał czerpać z jak najlepszych rozwiązań zarówno technicznych jak i w dziedzinie organizacji i zarządzania, by eksploatacja elektrowni przebiegała bez zakłóceń. Zbyt wiele jest bowiem do stracenia.

Wykorzystano:

- *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12, IAEA 1999, rozdz. 3.1.2, str. 15* http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf
- *Report to the Chairman of the Hungarian Atomic Energy Commission on the Authority's investigation of the incident at Paks NPP on 10 April 2003, HAEA, 23.5.2003*
- [http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/download_en/056FC7026BD5F6D7C125710B0057E251/\\$file/haecrep_ort041003_corrected.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/download_en/056FC7026BD5F6D7C125710B0057E251/$file/haecrep_ort041003_corrected.pdf)
- *Andrzej Strupczewski, III Szkoła Energetyki Jądrowej, Gdańsk 20-22.10.2010*
- http://www.szkoła-ej.pl/iiiiszkoła/referaty/strupczewski1_pre.pdf
- *Ustawa Prawo atomowe, tekst jednolity, Dz.U. Poz 264, 13.3.2012*
- http://www.dnz.paa.gov.pl/przepisy/prawo_atomowe_tekst_jednolity.pdf
- *Projekt Rozporządzenia RM w sprawie wymagań dotyczących rozruchu i eksploatacji obiektów jądrowych – konsultacje społeczne, 2012.*



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

KRZYSZTOF RZYMKOWSKI

TRENDY W ŚWIATOWEJ ENERGETYCE JĄDROWEJ PO KATASTROFIE W FUKUSHIMIE

Przez lata żyliśmy w cieniu katastrofy w Czarnobylu. Dziś emocje budzi Fukushima. Od chwili katastrofy pojawia się bardzo wiele komentarzy i analiz świadczących pośrednio zainteresowaniu techniką jądrową a przede wszystkim energetyką jądrową. Tocząca się w kraju dyskusja nad celowością rozwoju energetyki jądrowej budzi wiele emocji. Ważnym i interesującym elementem w tej dyskusji jest omówienie światowego stanu energetyki jądrowej i trendów rozwojowych po katastrofie.

Amerykańskie bomby atomowe zrzucone na Hiroszimę (6.08.1945 – bomba uranowa U-235) i Nagasaki (9.08.1945 – bomba plutonowa Pu-239) unaocznily opinii światowej ogromną siłę niszczącą energii jądrowej. Szok spowodowany tymi zniszczeniami wywołał przekonanie o konieczności całkowitej rezygnacji z jej stosowania.

Mimo to, stopniowe osvajanie się z istniejącym nowym źródłem energii, nabywane doświadczenie, oraz postęp fizyki atomowej, a przede wszystkim względy ekonomiczne zdecydowały o tym, że zaczęto wykorzystywać energię jądrową w energetyce.

Energia jądrowa (promieniowanie jonizujące) mimo wielu obaw jest wykorzystywana w:

- ✚ energetyce (nawet konwencjonalnej)
- ✚ przemyśle (spożywczym, ciężkim)
- ✚ medycynie (tomografia, prześwietlenia, diagnostyka, terapia, wpływ promieniowana na zdrowie człowieka)
- ✚ archeologii, sztuce
- ✚ wojsku (broń, napęd okrętów)
- ✚ badaniach naukowych (badania nad nowym źródłem energii – syntezą jądrową, paliwem do rakiet międzyplanetarnych)

Atrakcyjność energetyki jądrowej wynika z: niskiej, stabilnej ceny i dostawy produkowanej energii elektrycznej niezależnej od warunków pogodowych energii, *(co stanowi znaczącą zaletę w stosunku do źródeł odnawialnych)*, zwiększenia niezależności energetycznej kraju i konieczności pokrycia wzrastającego popytu na energię elektryczną, minimalnego szkodliwego wpływu na środowisko naturalne.

Przygotowując się do wprowadzenia energetyki jądrowej można obecnie korzystać z rozległych doświadczeń krajów posiadających i rozwijających energetykę jądrową. Wielka niezawodność oferowanych produktów przez producentów bloków energetycznych i różnorodnych usług związanych z cyklem paliwowym, uwzględniająca, kalkulację ryzyka opartą się na sumarycznym doświadczeniu działania wszystkich elektrowni jądrowych odpowiadaj okresowi przekraczającemu 10 tys. lat zwiększa jeszcze atrakcyjność energetyki jądrowej. Należy ponadto podkreślić, że badania jądrowe przyczyniły się do przyspieszenia postępu technicznego.

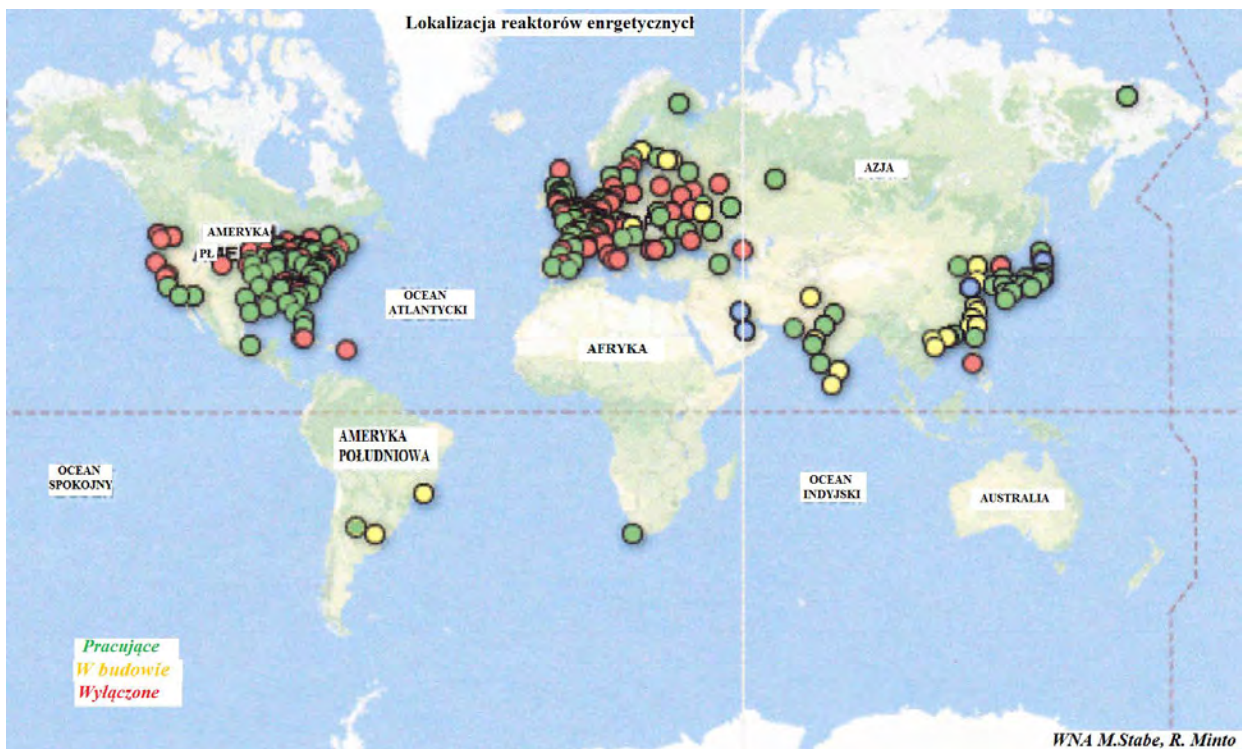
Mimo tych zalet przeciwnicy energetyki jądrowej wskazują na niebezpieczeństwa wyływające ze stosowania energetyki jądrowej wyolbrzymiając zagrożenia związane ze skażeniem środowiska, wzrostem zachorowalności na choroby nowotworowe czy z problemem utylizacji odpadów



promieniotwórczych, niebezpieczeństw zamachów terrorystycznych a nawet niebezpieczeństw konfliktów z wykorzystaniem broni jądrowej.

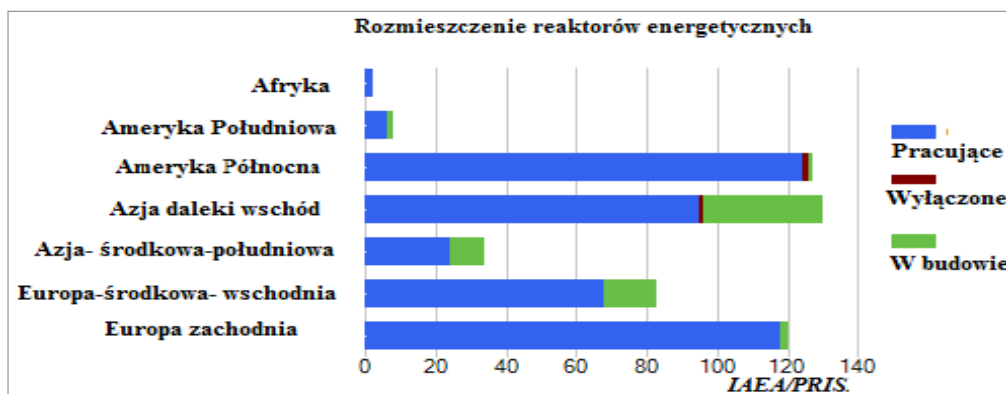
Opinie te są podtrzymywane przez nagłaśnianie i wyolbrzymianie awarii w elektrowniach jądrowych TMI, Czarnobyl, a ostatnio Fukushima.

Światowa opinia publiczna dzieli się zwolenników i przeciwników energetyki jądrowej. Ożywienie w dyskusji obu stron następują zwykle z okazji większych wydarzeń np. światowych konferencji na temat ochrony środowiska ze szczególnym zwróceniem uwagi na problemy przestrzegania zawartych wcześniej porozumień, czy też z okazji większych awarii jądrowych. Mimo wszystkich zastrzeżeń do energetyki jądrowej jest ona dynamicznie rozwijana w wielu krajach. Na Rys. 1 przedstawiono pogładowo aktualne rozmieszczenie elektrowni jądrowych na świecie.



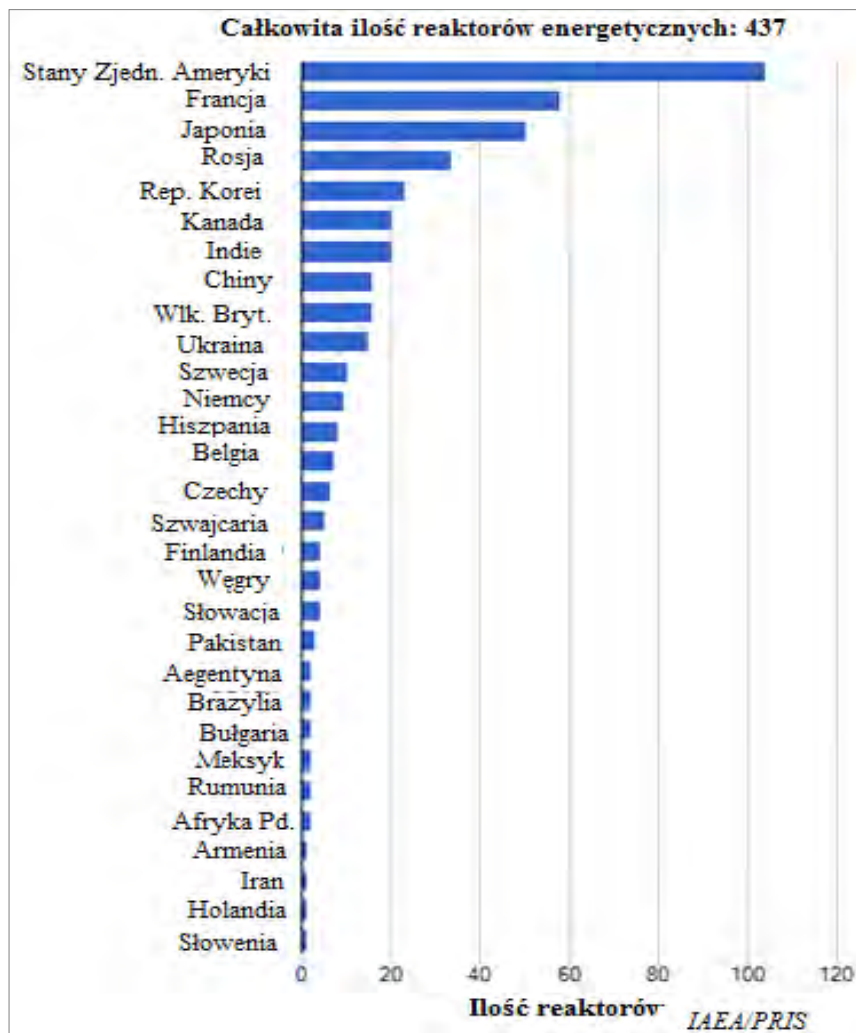
Rys. 1 Lokalizacja reaktorów energetycznych

Uzupełnieniem tej informacji jest wykres przedstawiony na Rys. 2



Rys. 2 Ilość reaktorów energetycznych na poszczególnych kontynentach (dane listopad 2012)

Na wykresie rys.3 przedstawiono ilość reaktorów energetycznych w poszczególnych krajach świata (dane listopad 2012).



Rys. 3 ilość reaktorów energetycznych w poszczególnych krajach

W tabeli 1 przedstawiono rodzaje aktualnie pracujących na świecie reaktorów energetycznych

Typ reaktora	Ilość
PWR (Pressurized Water Reactor)	274
BWR (Boiling Water Reactor)	84
GCR (Gas Cooled Reactor)	15
PHWR(Pressurized Heavy Water Reactor)	47
LWGR (Light Water Graphite Reactor)	15
FBR (Fast Breeder Reactor)	2
Razem	437

Tab. 1 Rodzaje reaktorów

Ponadto w 56 krajach pracuje ok. 240 reaktorów doświadczalnych, a ponadto 180 reaktorów energetycznych wykorzystywanych jest do zasilania 150 okrętów i łodzi podwodnych.

Podobny wpływ, na energetykę jądrową jak ostatnia katastrofa Fukushima Daichii (11 marzec 2011), miały inne wydarzenia w przeszłości: awaria w elektrowni Three Mile Island (28 marzec 1979), katastrofa w elektrowni w Czarnobylu (26 kwiecień 1986) czy zamach terrorystyczny na World Trade Center (11 wrzesień 2001). Wszystkie te zdarzenia przyczyniły się do polepszenia bezpieczeństwa obiektów jądrowych i wprowadzenie nowych rozwiązań legislacyjnych.

Katastrofa w Fukushima Daiichi spowodowała spowolnienie rozwoju światowej energetyki jądrowej ale nie ma to jednak istotnego wpływu na dalszy jej rozwój.

Według zweryfikowanych i uaktualnionych obecnie planów ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w elektrowniach jądrowych w roku 2030 będzie o zaledwie 8 % mniejsza od wcześniejszych przewidywań opracowywanych przed katastrofą.

Plany rozbudowy lub budowy energetyki jądrowej zależą od potrzeb energetycznych poszczególnych państw. W krajach z rozwiniętą energetyką jądrową są prowadzone prace modernizacyjne i będzie kontynuowana rozbudowa. W krajach nie posiadających energetyki jądrowej prowadzona jest weryfikacja planów lub oczekiwane jest odroczenie decyzji.

Katastrofa miała największy wpływ na energetykę jądrową Japonii.

Przed awarią w Fukushima planowano: uruchomienie do 2030 roku 14 nowych elektrowni jądrowych, zwiększenie współczynnika wykorzystania elektrowni do 90 % (współczynnik określający stosunek czasu pracy elektrowni do czasu koniecznych przestoju) i co najważniejsze zwiększenie udziału energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej do 53%.

Obecnie rozważane są różne warianty rozwoju energetyki Japonii do 2030 roku:

Źródła energii	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Stan w 2010	Plan przed awarią
Energia jądrowa	0 %	15 %	20-25 %	26 %	53 %
Paliwa Kopalne	65 %	55 %	50 %	63 %	27 %
Odnawialne	35 %	30 %	25 30 %	11 %	20 %

Dynamikę rozwoju energetyki jądrowej mimo pewno jej spowolnienia obrazuje ilość włączonych do sieci w 2012 roku reaktorów:

- ✚ Shin-Wolsong-1 960 MWe PWR Republika Korei 27 styczeń
- ✚ Shin Kori -2 960 MWe PWR Republika Korei 28 styczeń
- ✚ Bruce-1 772 MWe PHWR Kanada 19 wrzesień
- ✚ Bruce-2 772 MWe PHWR Kanada 16 październik

Rozpoczęto też budowę nowych:

- ✚ Balthsk-1 1082 MWe PWR Rosja 22 luty
- ✚ Shin-Ulhin-1 1340 MWe Republika Korei 10 lipiec

✚ Barakah 1 1340 MWe PWR Zjednoczone Emiraty Arabskie 18 lipiec

Ponadto w najbliższych latach spodziewane jest rozpoczęcie prac budowlanych w krajach nie posiadających dotychczas energetyki jądrowej: Bangladeszu 2 reaktory (2018 rosyjskie), Malezji 2 (2021), Tajlandii 1 (2020) i 1 (2021) Wietnamie 4 (2020 - 2021) 2 rosyjskie, dwa japońskie). Będą to reaktory III i III+ generacji.

W różnych ośrodkach badawczych prowadzone są intensywne badania nad nowymi generacjami reaktorów. Głównym celem tych badań jest jak najekonomiczniejsze wykorzystanie paliwa jądrowego, w postaci tradycyjnej lub opracowanie zupełnie nowej jego wersji, prowadzące jednocześnie do ograniczenia odpadów promieniotwórczych. Przewiduje się nawet składowanie rzadko występujących izotopów do wykorzystania w przyszłości.

Współczesne prace badawcze w dotyczące reaktorów energetycznych koncentrują się na projektach Reaktorów IV generacji stanowiących nową doskonalszą wersję bardzo starych koncepcji powstałych w czasie opracowywania broni jądrowej jeszcze w czasie II Wojny Światowej. Rozwijana jest technika Reaktorów Powielających (*LMFR Liquid Metal Fast Reactor*) których jedną z zalet jest lepsze wykorzystanie paliwa. Powrócono do idei budowy reaktorów solnych (*MSR Molten Salt Reactor*) z wykorzystaniem ich w energetyce. Charakterystyczną cechą tych reaktorów jest paliwo w postaci roztworów soli. Inną bardzo oryginalną konstrukcją wysokotemperaturowych są tzw. reaktory ze złożem usypanym (*PBR Pebble Bed Reactor*) w którym paliwo występuje w postaci luźnych kul ceramicznych zawierających materiał rozszczepialny. Ogólnie dąży się do wykorzystywania różnych materiałów rozszczepialnych oprócz uranu, plutonu i toru. Pojawiła się również koncepcja budowy w oparciu o zdobyte dotychczas doświadczenie (PWR, BWR), małych tzw. modułarnych reaktorów energetycznych do lokalnego wykorzystania. Reaktory te można łączyć w większe zestawy o zwiększonej mocy. Prowadzone są kosztowne badania nad syntezą jądrową.

Nowe rozwiązania mają na celu zmniejszenie ryzyka proliferacji i lepszą ochronę środowiska.

Mimo pewnych oporów rozwijana jest współpraca międzynarodowa.

W maju 2007 roku powołano międzynarodową organizację pod nazwą *Światowe Partnerstwo Energii Jądrowej GNEP (Global Nuclear Energy Partnership)*, przekształconą w czerwcu 2010 w nową organizację pod nazwą **Międzynarodowe Ramy Współpracy w zakresie Energii Jądrowej** (*International Framework for Nuclear Energy Cooperation*). Organizacja zrzesza kraje posiadające lub planujące budować energetykę jądrową. Ponieważ celem organizacji jest: promowanie najnowszych technologii przerobu paliwa jądrowego, minimalizacja ilości odpadów promieniotwórczych, opracowywanie i wprowadzanie w życie nowych metod ich utylizacji, ustanowienie sposobów obsługi przerobu paliwa, ograniczanie poziom zanieczyszczeń powietrza, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, zmniejszenie ryzyka niekontrolowanego rozprzestrzenienia broni jądrowej zyskuje ona powoli nowych członków.

Podstawowym problemem szeroko dyskutowanym w ramach różnych inicjatyw międzynarodowych jest ustalenie zasad postępowania z powstałym w elektrowni paliwem jądrowym, głównie chodzi o ustalenie, kto jest odpowiedzialny za przechowywanie, a ściślej do kogo należą powstałe odpady, czy jest to:

1. Użytkownik, tzn. państwo używające paliwo wyprodukowane w innym kraju i wysyłające je do przerobu w jeszcze innym kraju - wówczas powstałe odpady musiałyby być przetransportowane do użytkownika.

2. Dostawca paliwa, tzn. kraj dostarczający paliwo do użytkownika - wówczas niezależnie od tego, kto przerabia paliwo, odpady wracają do dostawcy.
3. Kraj, w którym utworzono centralne składowisko z uwagi na najkorzystniejsze warunki np. geologiczne - do którego będą przesyłane odpady pochodzące z kilku zakładów przerobu z innych krajów.

Należy podkreślić, że mimo atrakcyjności omówionych powyżej propozycji, szczególnie dla krajów nieposiadających rozwiniętego przemysłu jądrowego, propozycja IFNEC budzi wiele sprzeciwów. Jednym z najczęściej podnoszonych kwestii jest spodziewane umocnienie podziału świata na kraje rozwinięte technologicznie i dodatkowo uprzywilejowane w rozwijaniu nowych technologii, oraz kraje korzystające z tych osiągnięć w ograniczonym zakresie, którym postawiona jest bariera w rozwoju. Wydaje się to stać w sprzeczności z ideą Traktu NPT, zakładającego równość dostępu do technologii jądrowych i ich wykorzystywania w celach pokojowych. Ponadto podnosi się kwestie pogłębianie się ekonomicznej zależności krajów mniej rozwiniętych od państw bogatszych. Problem ten jest jednym z najważniejszych problemów energetyki jądrowej ściśle powiązany z kontrolą materiałów jądrowych.

Katastrofa w Fukushima Daiichi spowodowała ogólny światowy przegląd wszystkich systemów bezpieczeństwa jądrowego. W Europie dla Parlamentu Europejskiego przeglądu dokonuje Europejska Grupa Bezpieczeństwa Jądrowego (*European Nuclear Safety Regulatory Group - ENSREG*). Taką kontrolę i na taką skalę uwzględniającą również elementy projektowe obiektu przeprowadzono po raz pierwszy. W wyniku przeprowadzonej weryfikacji procedur zalecono:

- ✚ kontrolę wszelkich odchyśleń od przewidywanych wskazań przyrządów monitorujących pracę elektrowni (obektu jądrowego)
- ✚ kontrolę awaryjnych urządzeń automatycznych
- ✚ sprawdzenie procedur działania w stanach alarmowych
- ✚ sprawdzenie procedur działań awaryjnych
- ✚ sprawdzenie procedur ochrony fizycznej obiektu
- ✚ sprawdzenie procedur powiadamiania o awarii i ostrzegania
- ✚ organizację zapasowych centrów sterowania w sytuacjach awaryjnych
- ✚ sprawdzenie procedur ewakuacyjne obiektu i ludności
- ✚ sprawdzenie metod szkolenia
- ✚ udoskonalenie ćwiczeń kresowych

Wszystkie procedury i systemy powinny być weryfikowane w czasie ćwiczeń kontrolnych i w czasie normalnej pracy obiektu

Stałym przedmiotem dyskusji w zakresie ochrony radiologicznej, jest problem niskich dawek promieniowania. Z jednej strony występują zwolennicy hipotezy o liniowym bezprogowym wzroście ryzyka wraz z dawką, a z drugiej strony zwolennicy koncepcji hormezy są przekonani o dodatnim działaniu promieniowania na organizm. Dyskusja po katastrofie poruszyła ponownie opinię publiczną.

Wydaje się, że nowe rozwiązania techniczne zależące wprawdzie od ogólnego postępu technologicznego przyczynią się do dalszego rozwoju energetyki jądrowej. Zapewniają one większą niezawodność, ekonomiczność, bezpieczeństwo ludzi i lepszą ochronę środowiska.

Nie ma też w dającej się przewidzieć przyszłości zagrożenia wyczerpania się zasobów paliwa jądrowego.

Rośnie świadomość społeczna i mimo wahnięć akceptacja dla tego sposobu pozyskiwania energii.

Literatura:

- www.iaea.org, *International Status and Prospects for Nuclear Power 2012*
- www.iaea.org, *Updates Projections for Nuclear Power 2030*
- www.jaif.or.jp, *Japan Atomic Industrial Forum raporty 2012*
- www.world-nuclear.org, *World Nuclear Association raporty 2012*
- www.atom.edu.pl, *Stan energetyki jądrowej na świecie*
- www.enserg.eu, *European Nuclear Safety Regulatory Group Brussels, 4.10.2012 SWD(2012) 287 final*
- R.Krymm, J.a. Lans I.S. Zheludev, *Future Trends in Nuclear Power, IAEA 2010*
- S. Machi, *Trends of Nuclear Power and Lessons Learned from Fukushima Daiichi Nuclear, Seminar: Nuclear Power Station Accident, Warsaw Oct. 22-23, 2012*
- K. Rzymkowski, *Energetyka jądrowa po katastrofie elektrowni w Czarnobylu, Konferencja: Od Czarnobyla do Fukushima, Warszawa 07-08 Czerwiec 2011*
- K. Rzymkowski, *Trendy w światowej energetyce jądrowej, Międzynarodowe Forum Energetyki Jądrowej Warszawa 29 listopad*



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

SYLWESTER SOMMER

SKUTKI ZDROWOTNE NISKICH DAWEK PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA PODSTAWIE BADANIA OFIAR ATAKÓW NUKLEARNYCH W HIROSZIMIE I NAGASAKI

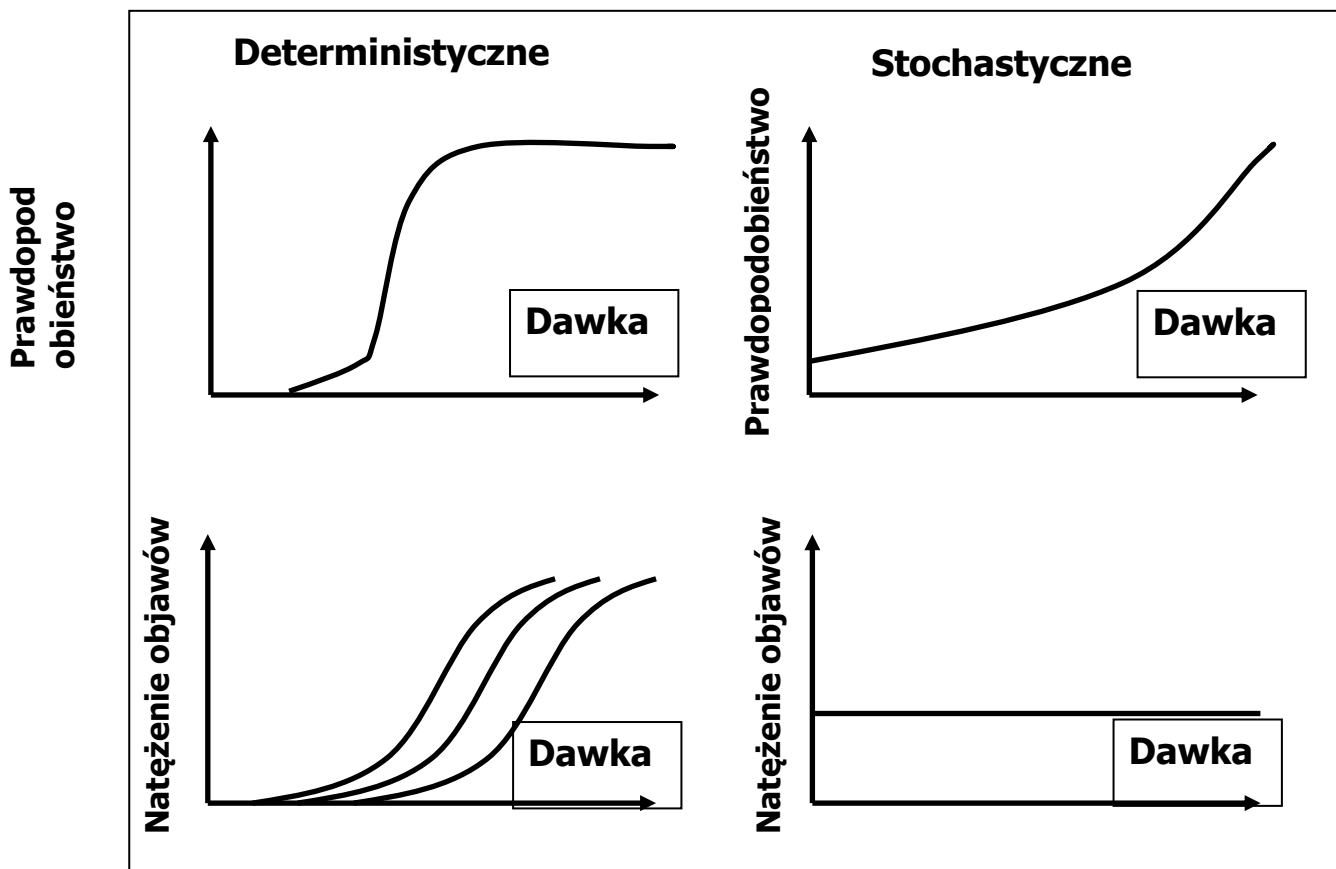
Wstęp

Ochrona radiologiczna w większości cywilizowanych państw na świecie opiera się na dwóch prostych zasadach: wyeliminowania jakichkolwiek skutków deterministycznych promieniowania jonizującego na organizm ludzki oraz ograniczenia do minimum skutków stochastycznych. Dla przypomnienia: deterministyczne skutki promieniowania spowodowane są masowym umieraniem komórek danej tkanki. Mówimy, że po przekroczeniu pewnej dawki promieniowania (dawki progowej), charakterystycznej dla danej tkanki i danej osoby umieranie komórek zajdzie ze 100 % prawdopodobieństwem (Rys. 1) [1]. Natężenie objawów zależy od dawki promieniowania. Skutki stochastyczne promieniowania są wywołane zmianami genetycznymi lub epigenetycznymi spowodowanymi przez promieniowanie w pojedynczych komórkach. Zmieniona komórka musi albo przeżyć i przekazać zmiany komórkom potomnym, albo przekazać zmiany otaczającym ją innym komórkom, poprzez sygnalizację, w procesach zwanych efektem sąsiedztwa czy widza. Jest to początek szeregu zmian, które mogą zakończyć się nowotworem. Według liniowej, bezprogowej hipotezy oddziaływania promieniowania na organizmy żywe (LNT – *Linear No-Threshold hypothesis*), stochastyczne skutki promieniowania mogą być wywołane nawet przez pojedynczy akt jonizacji DNA, a więc nie ma progu dawki, poniżej którego nie będą wywoływane (dotyczy to również indukcji nowotworów przez promieniowanie). Prawdopodobieństwo występowania stochastycznych skutków promieniowania zależy od dawki, ale co ciekawe, stopień nasilenia objawów nie jest w żaden sposób od niej zależny (Rys. 1).

Limity dawek granicznych zalecane przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP - International Commission on Radiological Protection) są zazwyczaj implementowane do przepisów ochrony radiologicznej w poszczególnych państwach, w tym w Polsce [2]. Są one na tyle niskie (Tab. 1), że przy ich przestrzeganiu nie wystąpią nigdy deterministyczne skutki promieniowania, a skutki stochastyczne będą mocno ograniczone. Limity zalecane przez ICRP mają zapobiegać nowotworom będącym skutkiem promieniowania. Są one zgodne z wynikami badań epidemiologicznych nad nowotworami wywołanymi przez ataki nuklearne w Nagasaki i Hiroszimie oraz u osób przechodzących radioterapię [3]. Restrykcyjność tych przepisów jest krytykowana przez wielu specjalistów od ochrony radiologicznej, którzy twierdzą, że tak niskie dozwolone limity dawek są nieuzasadnione ekonomicznie, a nawet absurdalne bo niskie dawki promieniowania nie tylko nie szkodzą, ale raczej mają działanie hormetyczne, dobre dla zdrowia [4, 5, 6 itd.]. Dla przypomnienia pojęcie hormezy pochodzi z toksykologii i używane jest od kilkuset lat w znaczeniu, że czynnik występujący w przyrodzie, szkodliwy dla organizmu w większych dawkach, w małych dawkach działa nań korzystnie. W przypadku promieniowania mówimy o hormezie radiacyjnej. Pogląd ten jest szeroko rozpowszechniony w Polsce i propagowany przez znanych naukowców zajmujących się „atomistyką” czy energią jądrową. W czasie kursu ochrony radiologicznej i radiometrii w medycynie zauważyłem, że hipoteza hormezy radiacyjnej jest bliska w zasadzie wszystkim wykładowcom, którzy otwarcie kwestionują zasadność przyjętych w prawie polskim dawek granicznych. Jest to w sprzeczności z przepisami ochrony radiologicznej oraz zasadą „pesymizacji” dawki. Uważam, że nie do końca odpowiedzialnym jest jednostronne głoszenie takich poglądów, pośród w większości

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

młodych ludzi, którzy mają zajmować się ochroną przed promieniowaniem. Podobne kursy organizowane w Świerku głoszą taki sam przekaz w tym zakresie. A że nie jest to przekaz powszechnie obowiązujący miałem okazję przekonać się na spotkaniu Komitetu Sterującego Organizacji Wsparcia Technicznego dla Energetyki Jądrowej (*Steering Committee of Technical Support Organization Forum– TSO*) w Berlinie (wrzesień 2012). Obecni tam eksperci, w tym dyrektor generalny IRSN (*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*) Jacques Repussard i dyrektor GRS (*Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit*) Frank-Peter Weiss – głosili poglądy, że działanie niskich dawek promieniowania na organizm ludzki nie jest do końca zrozumiane i potrzeba jeszcze więcej badań (biologicznych i epidemiologicznych) w tym zakresie, a na razie nie ma mowy o zmianie obowiązujących kanonów ochrony radiologicznej.



Rys. 1. Deterministyczne i stochastyczne skutki promieniowania.

Brak konsensu w zrozumieniu, jak działają na ludzki organizm niskie dawki promieniowania jonizującego był powodem powstania platformy naukowej MELODI (*Multidisciplinary European Low Dose Initiative*) finansowanej przez Unię Europejską. Zrzesza ona 15 czołowych laboratoriów radiobiologicznych z całej Europy. Jak obliczają niektórzy z zaangażowanych w MELODI naukowców, żeby dokładnie zrozumieć działanie niskich dawek promieniowania potrzebne będą środki w wysokości co najmniej 1 miliarda euro oraz przyciążenie do radiobiologii młodych naukowców, którzy uważają ją za staroświecką i nie perspektywiczną dziedzinę nauki [7].

Za limitami dawek granicznych proponowanymi przez ICRP można przytoczyć jeszcze jeden ważny argument: badania ofiar ataków w Hirosimie i Nagasaki, na podstawie których te dawki

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

zostały zaproponowane, są największymi badaniami epidemiologicznymi w historii ludzkości. Są one prowadzone nieprzerwanie od ponad 60 lat, objęły swoim zasięgiem ponad 200 000 osób i pozwoliły na rozwinięcie wyrafinowanych technik matematycznych oraz algorytmów służących do opisu zapadalności na nowotwory i inne choroby w tak dużych populacjach. Przyjrzyjmy się bliżej projektom realizowanym od kilkudziesięciu lat w Japonii.

Kategoria osób	Roczna dawka graniczna mSv
Pracownicy	20 mSv, może zostać przekroczona w roku kalendarzowym do 50 mSv, jeżeli w ciągu kolejnych 5 lat jej sumaryczna wartość nie przekroczy 100 mSv;
Praktykanci od 16 do 18 lat	6 mSv
Osoby z ogółu ludności	1 mSv, może zostać przekroczona w roku kalendarzowym, jeżeli w ciągu kolejnych 5 lat jej sumaryczna wartość nie przekroczy 5 mSv
Średnia roczna dawka promieniowania dla osób z ogółu ludności	3,4 mSv

Tab. 1. Lista dawek granicznych dla promieniowania jonizującego obowiązujących w Polsce (Prawo Atomowe 2012).

Trochę historii

W 1945 roku, Amerykanie zrzucili 2 bomby jądrowe na japońskie miasta: opartą na uranie, o sile 16 000 ton trotylu na Hiroszimą i skonstruowaną z plutonu, o sile 21 000 ton trotylu na Nagasaki. Bomby zrzucono, żeby przyspieszyć kapitulację Japonii i uniknąć ofiar wśród amerykańskich żołnierzy atakujących archipelag. Z powodu wysokiej temperatury, fali uderzeniowej, zawaleń budynków i w pożarach zginęło 140 000 osób z populacji 360 000 w Hiroszynie i 70 000 osób z populacji 250 000 w Nagasaki [8]. Rannych zostało 80 000 osób w Hiroszynie i tyle samo w Nagasaki. Ci, którzy przeżyli zostali napromienieni wysokimi dawkami szkodliwego dla zdrowia, niewidzialnego i niewyczuwalnego żadnym zmysłem promieniowania. W 1945 roku skutki takiego napromienienia były zupełnie nieznanne.

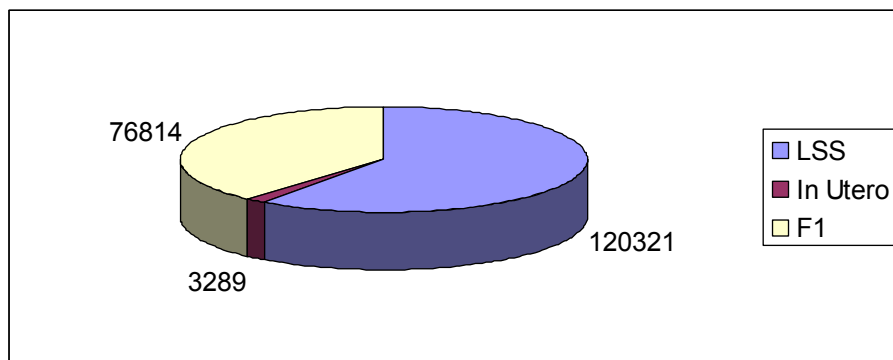
Pierwsze badania nad skutkami zdrowotnymi napromienienia u ofiar bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki podjęto już w 1945 roku, a w 1947 roku powstała finansowana przez rządy Japonii i Stanów Zjednoczonych Komisja Ofiar Bomby Atomowej (*Atomic Bomb Casualty Commission ABCC*) [9]. W roku 1975 przekształciła się ona w Fundację Badania Skutków Promieniowania (*Radiation Effects Research Foundation - RERF*), która kontynuuje badania do dnia dzisiejszego. W ciągu 60 lat przez Fundację przewinęły się dziesiątki naukowców z całego świata. Rezultatem ich pracy są setki artykułów naukowych i raportów, w tym wydawane cyklicznie (dotychczas 13 edycji) Raporty o Śmiertelności pośród Osób które Przeżyły Atak Nuklearny (ostatni: *Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. 2003*) [10].

Czym zajmuje się Fundacja Badania Skutków Promieniowania (*Radiation Effects Research Foundation - RERF*) i jakie uzyskano rezultaty?

Głównym zadaniem fundacji RERF jest opisanie skutków zdrowotnych napromienienia u ofiar ataku przy użyciu bomby jądrowej, a stosowanym narzędziem są badania epidemiologiczne. Badania epidemiologiczne gromadzą wyniki dotyczące stanu zdrowia na poziomie jednostki i analizują uzyskaną informację na poziomie grupowym. Podejście takie pozwala często ujawnić wpływ na zdrowie ludzi jakiegoś czynnika, który na poziomie jednostki wydaje się kompletnie nieszkodliwy. Bada się w ten sposób choroby związane z zanieczyszczeniem środowiska, zawodowe, związane ze stylem życia czy zapadalność na nowotwory. Badanie prowadzone przez fundację RERF są modelowym, bezprecedensowym przykładem badań epidemiologicznych.

Badana populacja osób przewyższała 200 000 [11]. Na liczbę tę składają się 3 grupy (Rys. 2):

1. 120 321 ludzi w projekcie Life Span Study (LSS);
2. 3 289 osób napromienionych w okresie płodowym (In Utero);
3. 76 814 osób które są dziećmi rodziców z których co najmniej jeden został napromieniony w Hirosimie lub Nagasaki (F₁).



Rys. 2. Liczba osób ofiar ataku bomby atomowej w Hiroszimie i Nagasaki w 3 badanych kohortach: Life Span Study (LSS), In Utero i F1 [11].

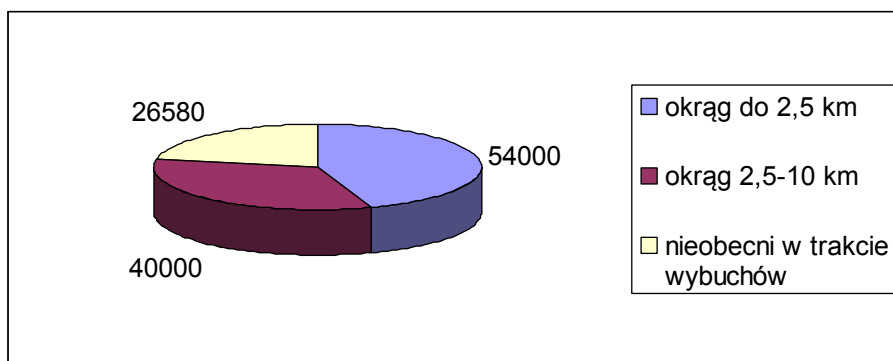
Life Span Study

Skład kohorty 120 000 osób w projekcie LSS oraz rodzaj przeprowadzonych badań zostały zawarte w tabeli 2 oraz na ryc. 3. Do projektu włączono wszystkie osoby, które w trakcie wybuchów były w odległości do 2,5 km od hipocentrum wybuchu i przeżyły oraz nie wyprowadziły się z Hiroszimy i Nagasaki do 1950 roku (musiały również spełnić szereg innych kryteriów). Szacuje się, że ta grupa (54 000) stanowiła około połowy osób, z wewnątrz 2,5 km kręgu wyznaczonego od hipocentrum wybuchu, które przeżyły do 1950 roku [12]. Drugą grupę stanowili mieszkańcy Hiroszimy i Nagasaki przebywający od 2,5 do 10 km od miejsc wybuchu. Było to 40 000 osób, dopasowanych do poprzedniej grupy pod względem wieku, miejsca zamieszkania i płci. Ostatnią grupę stanowiły nienapromienione osoby (26 580), które przeprowadziły się do Hiroszimy lub Nagasaki w latach 1950-52.

Dla 92 % z wszystkich 120 000 osób możliwe było oszacowanie dawki pochłoniętej (Rys. 4). Wzięto pod uwagę nie tylko jak daleko dana osoba była od epicentrum wybuchu, ale również w jaki

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

sposób była osłonięta oraz w jakiej pozycji zastał ją wybuch [8]. Niektóre osoby biorące w badaniu otrzymały dawki powyżej 2 Gy na całe ciało, ale była również grupa kontrolna, która nie została wcale napromieniona. Średnia dawka w grupie osób napromienionych (powyżej 0,005 Gy na całe ciało) była niska i wynosiła około 0,2 Gy [9].



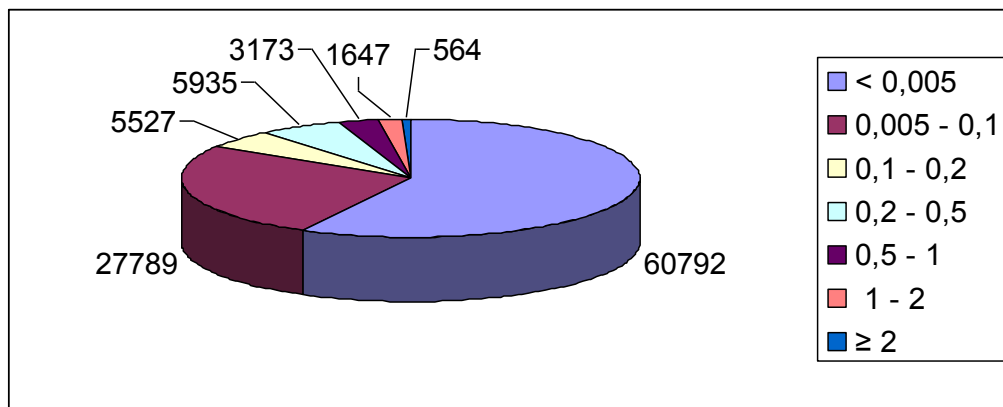
Rys. 3. Skład kohorty Life Span Study: 54 000 osób znajdowało się w czasie ataku do 2,5 km od centrów wybuchów, 40 000 osób znajdowało się w czasie ataku od 2,5 km do 10 km od centrów wybuchów, 26850 osób nie było w czasie eksplozji ani w Hiroszimie ani w Nagasaki, ale przeprowadzili się do jednego z tych miast w latach 1950-1952 [12].

Kohorta	Opis	Badania
Life Span Study (LSS) – około 120 000 osób	54 000 osoby z 2,5 km kręgu od centrum wybuchów 40 000 osoby z odległości 2,5 do 10 km od centrum wybuchów; 26850 osób, które przenieśli się do Hiroszimy lub Nagasaki w latach 1950-52;	Śmiertelność (1950 - ...); Zapadalność na raka (1958 - ...); Program autopsji (1950 – 1985); Ankiety pocztowe dotyczące kwestii socjoekonomicznych, stylu życia i zdrowia (1965, 1969, 1979, 1991, 2008);
Adult Health Study (AHS) – 19 961 osób	Podgrupa LSS, w tym 4993 osoby napromienione wysokimi dawkami;	Coroczne badania lekarskie (1958 - ...); Różne badania dotyczące nowotworów; Badania tarczycy; Badania gęstości kości; Badania okulistyczne;

Tab. 2. Badania prowadzone w kohorcie LSS oraz w jej podgrupie AHS przez ABCC oraz REFR [12]

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

Jakie badania przeprowadzono w ramach studiów LSS (tab. 2)? Od 1950 roku prowadzony jest rejestr zgonów w badanej grupie z określeniem prawdopodobnej przyczyny śmierci. Od 1959 roku prowadzony jest również rejestr zachorowań na raka, z dokładnymi informacjami diagnostycznymi. Przeprowadzono szereg badań ankietowych dotyczących czynników mogących zmieniać efekty promieniowania: pytano między innymi o kwestie socjoekonomiczne i styl życia. W 1958 roku z grupy osób biorących udział w LSS zaproszono 19 961 osoby do tzw. *Adult Health Study (AHS)*. Połowa z wybranych osób otrzymała wysokie dawki promieniowania w trakcie wybuchu. Osoby z kohorty AHS poddawane są co roku różnego typu badaniom klinicznym oraz testom laboratoryjnym, takim jak: ogólne badanie zdrowia, badania tarczycy, badania gęstości kości czy badania okulistyczne. Dodatkowo, co roku mają pobieraną krew, która jest zamrażana i stanowi materiał do testów biologicznych.

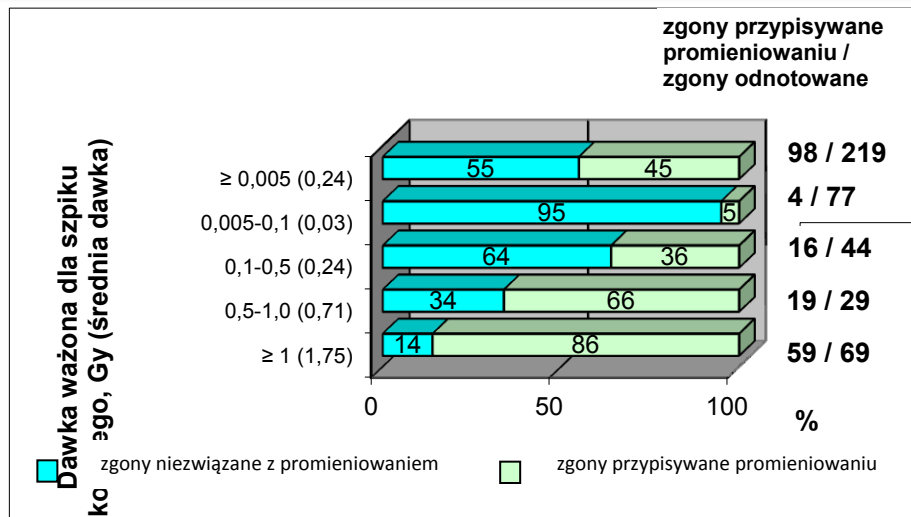


Rys. 4. Dawki ważone dla okężnicy w grejach (Gy) dla osób z kohorty LSS [9]. Średnia dawka w grupie osób napromienionych (powyżej 0,005 Gy na całe ciało) była niska i wynosiła około 0,2 Gy.

Warto wymienić cechy projektu LSS, które powodują, że jest on najważniejszym badaniem epidemiologicznym, dotyczącym ryzyka powodowanego przez promieniowanie, jakie kiedykolwiek do tej pory przeprowadzono:

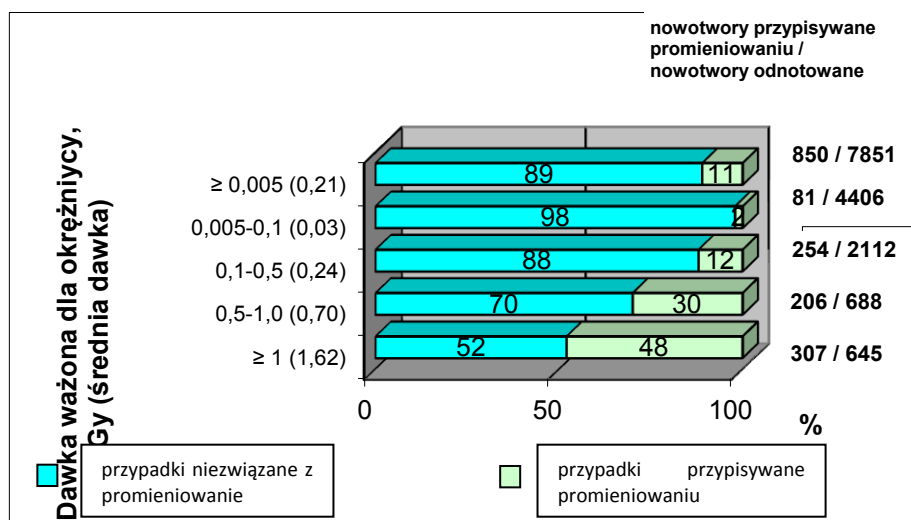
- duża kohorta badanych osób;
- dokładne dobranie kontroli pod względem wieku i płci;
- już ponad 60 letni czas trwania, a dalej jest ono kontynuowane;
- badana kohorta jest bardzo różnorodna, składała się z osób w różnym wieku, różnej płci, które otrzymały różne dawki promieniowania, nie była w żaden sposób selekcyjowana pod względem: kondycji zdrowotnej uczestników, ich zawodów czy z żadnych innych powodów;
- japoński rejestr zgonów ze 100 % pewnością pozwala odnotować wszystkie zgony i ich przyczyny w grupie badanych osób.

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE



Rys. 5. Dodatkowe zgony w wyniku popromiennych białaczek w latach 1950 – 2002. Na podstawie Preston 2004, zmienione [13]. Z 219 przypadków odnotowanych zgonów w wyniku białaczki, promieniowaniu przypisywane jest 98 (45 %).

W tak krótkim artykule nie sposób omówić nawet drobnej części wyników uzyskanych w trakcie projektu LSS. Można tylko przedstawić te najbardziej znaczące. Nie ma też miejsca na analizę metod statystycznych czy krytyczne podejście do niepewności uzyskanych wyników. Wiadomo, że dane epidemiologiczne obarczone są ogromnymi niepewnościami i często od interpretującego zależy, jakie wnioski się sformułuje na ich podstawie. Przedstawię w dalszej części tekstu, bardzo krótko i w dobrej wierze, interpretacje zrobione przez naukowców pracujących w projekcie LSS, ufając zarówno w ich doświadczenie, jak rzetelność i warsztat matematyczny, którym dysponują. Jednocześnie czytelnik powinien zostać ostrzeżony, że to nie są jedyne możliwe interpretacje i w zakresie efektów niskich dawek promieniowania toczy się spór – te same dane są przedstawiane jako szkodliwy wpływ promieniowania lub przeciwnie, jako hormetyczny.

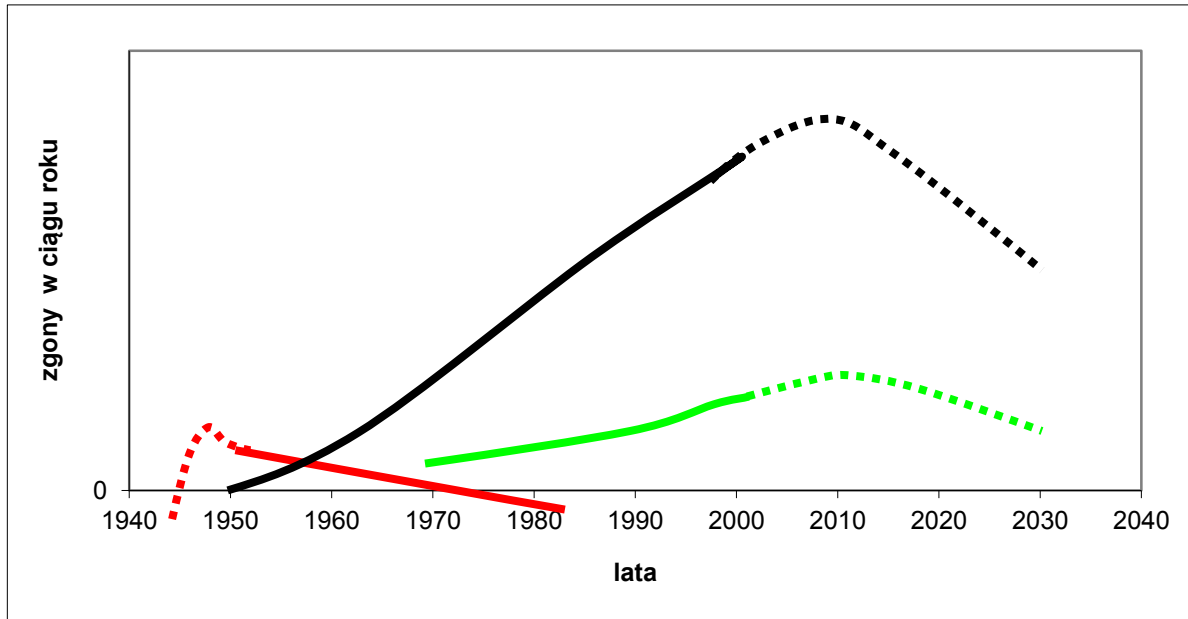


Rys. 6. Dodatkowe przypadki nowotworów litych (incidence of cancer) przypisanych promieniowaniu w latach 1959 – 1998. Na podstawie Douple 2011, zmienione [9]. Z 7851 przypadków odnotowanych przypadków wystąpienia nowotworów litych, promieniowaniu przypisywane jest 850 (11 %).

Głównym wynikiem całych badań prowadzonych w projekcie LSS jest stwierdzenie, że **u osób napromienionych zapadalność na nowotwory (incidence of cancer) i śmiertelność z powodu nowotworów (mortality) jest większa niż u osób nienapromienionych [8]**. Metodami statystycznymi szacuje się dodatkowe zgoni spowodowane promieniowaniem, w zależności od dawki, w stosunku do grupy kontrolnej (Rys. 5 i 6). Rys. 5 prezentuje dane o dodatkowych zgonach w wyniku popromiennych białaczek w latach 1950-2002 [13]. Z ogólnej liczby 219 zgonów aż 98 (45%) przypisuje się działaniu promieniowania. Oczywiście, największy procent zgonów na białaczkę przypisywany promieniowaniu oszacowano dla grupy najbardziej napromienionej – 86% (59 z 69), ale w grupie osób, która otrzymała dawki z zakresu 0,005 – 0,1 Gy (średnia 0,03 Gy) również 5% zgonów przypisano działaniu promieniowania. Rys. 6 przedstawia dane o dodatkowych przypadkach nowotworów litych (incidence of cancer) przypisanych promieniowaniu w latach 1959 – 1998 [9]. W podgrupie 100 000 osób z kohorty LSS zarejestrowano 17448 przypadki nowotworów litych, z których tylko 853 (4,9%) przypisano promieniowaniu. Jeżeli ograniczymy się tylko do osób, które otrzymały dawki powyżej 0,005 Gy, to w tej grupie spośród 7851 przypadków nowotworów 850 (11%) przypisywanych jest działaniu promieniowania. Tak jak w przypadku leukemii (białaczek), procent ten jest tym wyższy, im wyższą dawkę otrzymała dana grupa, ale nawet w przedziale 0,005 – 0,1 Gy (średnia dawka 0.03 Gy) 81 przypadków z 4406 (2%) przypisano promieniowaniu.

Rozpatrując zależność częstości zgonów na nowotwory lite od dawki promieniowania otrzymujemy zależność liniową w całym zakresie dawek [15]. Należy podkreślić, że z danych LSS wynika, że zależność ta widoczna jest również w zakresie od 0 do 0,15 Gy, z nachyleniem krzywej analogicznym jak dla wyższych zakresów dawek. Znakomita większość osób z kohorty LSS otrzymała niską dawkę promieniowania (Rys. 4), co daje dobrą moc statystyczną przyporządkowania krzywej dawka-efekt w tym zakresie dawek. Analogiczna krzywa dawka-efekt dla białaczek jest liniowo kwadratowa z kątem nachylenia (współczynnikiem beta) wyższym niż dla krzywej dla nowotworów litych [12]. Warto zauważyć, że większą śmiertelność zanotowano dla białaczek (1,8 razy większa śmiertelność) niż dla nowotworów litych (1,1 razy większa śmiertelność), co jest zgodne w przebiegami opisanych krzywych [8]. Na podstawie danych z badań LSS można wyliczać różne obrazowe współczynniki dotyczące ryzyka zdrowotnego promieniowania. I tak, amerykański *National Research Council* (2005) wyliczył, że jeżeli 100 obywateli USA zostanie napromienionych podaną w krótkim czasie (acute exposure) dawką 0,1 Gy, to 1 z tych osób umrze na raka spowodowanego promieniowaniem, podczas gdy 42 inne osoby umrą na raka spowodowanego innymi czynnikami [16].

Warto jeszcze zwrócić uwagę na zależność dodatkowej liczby zgonów na białaczki, nowotwory lite i inne choroby od czasu jaki upłynął od napromienienia (Rys. 7). Zależność ta pokazuje, że białaczki (czerwona linia) pojawiają się już 2-3 lata po napromienieniu, a szczyt zachowań jest 5-10 lat po napromienieniu i potem liczba zachorowań zmniejsza się [13, 14]. Nowotwory lite pojawiają się dopiero w około 10 lat po ekspozycji, a szczyt zachorowań na nie występuje (czarna linia) – nawet 60 lat po ekspozycji. Przewidywany spadek liczby zachorowań na nowotwory lite po 2010 roku nie jest spowodowany tym, że starsi ludzie nie chorują na nowotwory, tylko spadkiem liczby osób z kohorty LSS, które dożyły do tego czasu.



Rys. 7. Dodatkowe zgony, spowodowane promieniowaniem, w zależności od czasu od wybuchów w Hiroszimie i Nagasaki. Linia ciągła to obliczenia na podstawie rejestru zgonów, a przerywane to przewidywania. Linia czerwona dotyczy białaczek, czarna nowotworów litych, a zielona - chorób nienowotworowych. Na podstawie Preston 2004 i Furukawa 2009 [13, 14], zmienione.

Rezultatem napromienia nie są tylko nowotwory, ale również inne choroby. W ramach studiów nad kohortą AHS, czyli grupą około 20 000 osób, które przechodzą coroczne badania medyczne, zdiagnozowano różne typy chorób czy objawów, które przypisuje się działaniu promieniowania:

- katarakty pojawiły się 3 – 4 lata po wybuchach u osób, które otrzymały dawki wyższe niż 1,5 – 2 Gy na gałki oczne [17]. Wartość progowej dawki w granicach 2 Gy została zakwestionowana przez późniejsze prace, które obniżają ją aż do 0,1 Gy, sugerując, że oczy są bardzo wrażliwe na promieniowanie, co musi znaleźć odzwierciedlenie w przepisach ochrony radiologicznej [18];
- choroby tarczycy – dokładne badania tarczycy przeprowadzono dopiero w 2000 roku stosując wszelkie możliwe metody diagnostyczne. Zdiagnozowano dodatkowe w stosunku do kontroli przypadki zarówno guzków jak i nadczynności tarczycy [19];
- podwyższony poziom chorób układu krążenia, układu pokarmowego, układu oddechowego, chorób serca, udarów, chronicznych chorób wątroby;
- efekty psychologiczne, takie jak poczucie niepewności oraz symptomy somatyzacji;
- skrócenie długości życia. Oblicza się, że 1 Gy promieniowania skraca życie o średnio 1,3 roku, z tym, że dla niskich dawek jest to trochę mniej, a dla wyższych znacząco więcej [20].

Projekt In Utero

Jednym z głównych powodów do niepokoju po ataku w Hiroszimie i Nagasaki były defekty genetyczne dzieci napromienionych w okresie płodowym w łonach ich matek. W powszechnej świadomości społeczeństwa funkcjonuje przeświadczenie, że napromienienie nienarodzonych dzieci powoduje drastyczne deformacje, rodzenie się mutantów i potworów, a w najlepszym razie dzieci niedorozwiniętych. Przyjrzyjmy się wobec tego wynikom badań z Japonii.

Badana grupa obejmowała 3300 dzieci, dla których rejestrowano śmiertelność, częstość występowania nowotworów oraz wykonywano coroczne ogólne badania medyczne. Niespodziewanie, w ciągu pierwszych 15 lat od urodzenia tylko jedno z dzieci umarło na raka [21]. Wprawdzie zaobserwowano zwiększoną, zależną od dawki, zapadalność na nowotwory w tej grupie, ale była ona niższa niż w kohorcie osób napromienionych, które wówczas były dziećmi [22].

Obserwowano zwiększoną liczbę upośledzeń umysłowych, szczególnie u dzieci napromienionych pomiędzy 8 a 25 tygodniem ciąży [23]. Większość przypadków zanotowano u dzieci napromienionych dawką powyżej 1 Gy i wydaje się, że dla tego typu upośledzenia istnieje dawka progowa w wysokości 0,3 Gy. Grupa dzieci, które otrzymały dawki promieniowania około 1 Gy, między 8 a 25 tygodniem życia płodowego miała niższe o 25 IQ od swoich rówieśników [24]. I to wszystko.

Projekt F1

Projekt obejmował 77 000 dzieci urodzonych przez rodziców, z których co najmniej jedno było napromienione w Hiroszimie bądź Nagasaki. Powszechna świadomość (podsycana sensacyjnymi artykułami prasowymi, filmami z pogranicza horroru i sf, działalnością eko-oszołomów oraz katastrofą w Czarnobyli) podpowiada ogromną liczbę deformacji, mutacji i innych zmian genetycznych, które powinny być zostać znalezione pośród takich dzieci. Tymczasem nie znaleziono żadnych zmian w badanej kohorcie w porównaniu do grupy kontrolnej [8, 9]. Napiszę to jeszcze raz – żadnych zmian. W trakcie porodów nie było zwiększonej śmiertelności pośród noworodków ani matek, zwiększonej częstości wad rozwojowych, pogorszenia kondycji noworodków [25]. Nie udowodniono zwiększonej zapadalności na nowotwory ani żadne inne choroby [26]. Wszystkie badania cytogenetyczne i molekularne również nie wykazały żadnych negatywnych efektów w grupie tych dzieci [27-29].

Zakończenie

Chociaż toczy się spór o to, jakie są skutki działania niskich dawek promieniowania jonizującego na organizm ludzki, to nie można twierdzić, że prace popierające liniową bezprogową hipotezę (LNT) są niewiarygodne, lub tylko ekstrapolują skutki działania promieniowania po wyższych dawkach do zakresu niskich dawek. Największe i najlepiej udokumentowane badanie epidemiologiczne w dziejach ludzkości – trwające już ponad 60 lat studium zdrowia i śmiertelności ponad 200 000 ofiar ataku w Hiroszimie i Nagasaki, na wynikach którego oparte są dawki graniczne używane w ochronie radiologicznej, w pełni popiera hipotezę LNT. Można twierdzić, że ponieważ od tysięcy lat ludzie żyją w środowisku, gdzie występuje promieniowanie tła, a nawet sami są promieniotwórczy, to muszą być do niego przystosowani i że przyjęcie tak niskich dawek granicznych dla ogółu ludności (w Polsce dozwolony jest 1 mSv dodatkowo w ciągu roku, przy dawce naturalnej ponad 3 mSv rocznie) nie ma sensu. Z drugiej jednak strony, jako populacja żyjemy bardzo

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

długo (70 – 80 lat) i prawie połowa z nas umrze na nowotwór. Możliwe, że ‘przystosowania’ do życia w polu promieniowania obowiązywały wtedy, kiedy ludzie umierali wcześniej, zanim osiągnęli wiek, kiedy zagrożenie nowotworami jest największe. I dlatego, jeżeli chcemy w dobrym zdrowiu i zadowoleniu dożyć starości, a nie wiemy czy niskie dawki są czy nie są szkodliwe, bezpieczniej jest chronić się w rozsądny sposób przed promieniowaniem.

Autor artykułu w żaden sposób nie chce negować wykorzystania promieniowania w przemyśle, medycynie czy energetyce. Odwracając myśl zawartą w poprzednim akapicie: normy ochrony radiologicznej są tak rygorystyczne, że przestrzegając je możemy się czuć bezpieczni. I należy pamiętać, że:

- promieniowanie jonizujące jest słabym carcinogenem i w naszym życiu nie unikniemy spotkania z silniejszymi carcinogenami np. dymem tytoniowym, infekcjami wirusowymi czy zanieczyszczeniem środowiska;
- nawet w przypadku Hiroszimy i Nagasaki więcej osób zginęło od fali uderzeniowej, temperatury i pożarów niż od promieniowania;
- energetyka jądrowa generuje dawki do środowiska o kilka rzędów wielkości niższe niż dawki graniczne (bardzo rygorystyczne) zapisane w prawie dotyczącym ochrony radiologicznej, a korzyści wynikające z niej (również jeżeli chodzi o ochronę środowiska) są ogromne.

Bibliografia:

1. Szumiel I. Wójcik A.: Wczesne, późne, stochastyczne czy deterministyczne? *Post. Techn. Jądr.* 44 (4) 55- 56 (2001);
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP) 2007. *The 2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP 37 (2-4).* Elsevier Science Ltd. Oxford;
3. Little M.P., Wakeford R., Tawn E.J., Bouffler S.D., Berrington de Gonzalez A.: *Risks Associated with Low Doses and Low Dose Rates of Ionizing Radiation: Why Linearity May Be (Almost) the Best We Can Do.* *Radiology: Volume 251: Number 1—April 2009;*
4. Tubiana M., Feinendegen L.E., Yang C., Kaminski J.M.: *The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data.* *Radiology: Volume 251: Number 1—April 2009;*
5. Fornalski K.W., Dobrzyński L., *Pooled Bayesian analysis of twenty-eight studies on radon induced lung cancers.* *Health Phys.* 2011 Sep; 101 (3): 265-73;
6. Jaworowski Z.: [Dobroczynne promieniowanie](#), *Wiedza i Życie* str. 20-29, 03/1997;
7. Editorial. *The low-level nuclear threat.* *Nature*, 5, Feb 2012, vol. 482;
8. *Radiation Effects Research Foundation. Basic Guide to Radiation and Health Science.* 2008;
9. Duple E.B., Mabuchi K., Cullings H.M., Preston D.L., Kodama K., Shimizu Y., Fujiwara S., Shore R.E., *Long-term Radiation Related Health Effect in a Unique Human Population: Lessons Learned from the Atomic Bomb Survivors of Hiroshima and Nagasaki.* *Disaster Med Public Health Prep.* 2011 Mar;5 Suppl 1: S122-33;
10. Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A., Suyama A., Mabuchi K.: *Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997.* *Radiat Res.* 2003, 160 (42): 381-407;
11. Mabuchi K., Fujiwara S., Preston D.L., et al. *Atomic-bomb survivors: long-term health effects of radiation.* In: Shrieve DC, Loeffler JS, eds. *Human Radiation Injury.* Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2011: 89-113;
12. Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K. *Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990.* *Radiat Res.* 1996; 146 (1): 1-27.
13. Preston DL, Pierce DA, Shimizu Y, et al. *Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates.* *Radiat Res.* 2004; 162 (4): 377-389;
14. Furukawa K, Cologne JB, Shimizu Y, Ross NP. *Predicting future excess events in risk assessment.* *Risk Anal.* 2009; 29 (6): 885-899;
15. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, et al. *Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998.* *Radiat Res.* 2007; 168 (1): 1-64;
16. National Research Council, *Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2.* Washington, DC: National Research Council; 2005;
17. Otake M, Neriishi K, Schull WJ. *Cataract in atomic bomb survivors based on a threshold model and the occurrence of severe epilation.* *Radiat Res.* 1996; 146 (3): 339-348;
18. Neriishi K, Nakashima E, Minamoto A, et al. *Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold.* *Radiat Res.* 2007; 168 (4): 404-408;
19. Imaizumi M, Usa T, Tominaga T, et al. *Radiation dose-response relationships for thyroid nodules and autoimmune thyroid diseases in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors 55-58 years after radiation exposure.* *JAMA.* 2006; 295 (9): 1011-1022;



20. Cologne JB, Preston DL. Longevity of atomic-bomb survivors. *Lancet*. 2000; 356 (9226): 303-307;
21. Jablon S, Kato H. Childhood cancer in relation to prenatal exposure to atomic-bomb radiation. *Lancet*. 1970; 2 (7681): 1000-1003;
22. Schull WJ, Nishitani H, Hasuo K, et al. Brain Abnormalities Among the Mentally Retarded Prenatally Exposed Atomic Bomb Survivors. RERF Technical Report 13-91. Hiroshima, Japan: Radiation Effects Research Foundation; 1991;
23. Otake M, Schull WJ. In utero exposure to A-bomb radiation and mental retardation; a reassessment. *Br J Radiol*. 1984; 57 (677): 409-414;
24. International Commission on Radiological Protection. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). Publication 90. *Ann ICRP*. 2003; 33: 1-200;
25. Neel JV, Schull WJ. The Effect of Exposure to the Atomic Bombs on Pregnancy Termination in Hiroshima and Nagasaki. Washington, DC: National Academy of Sciences/National Research Council; 1956;
26. Izumi S, Suyama A, Koyama K. Radiation-related mortality among offspring of atomic bomb survivors: a half-century of follow-up. *Int J Cancer*. 2003; 107 (2): 292-297;
27. Awa AA, Bloom AD, Yoshida MC, Meriishi S, Archer PG. Cytogenetic study of the offspring of atom bomb survivors. *Nature*. 1968; 218 (5139): 367-368;
28. Neel JV, Satoh C, Goriki K, et al. Search for mutations altering protein charge and/or function in children of atomic bomb survivors: final report. *Am J Hum Genet*. 1988; 42 (5): 663-676;
29. Nakamura N. Genetic effects of radiation in atomic-bomb survivors and their children: past, present and future. *J Radiat Res (Tokyo)*. 2006; 47 (Suppl B): B67-B73;

Sylwester Sommer

Centrum Radiobiologii i Dozymetrii Biologicznej w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie



Artykuł przygotowany w ramach kampanii
Ministerstwa Gospodarki
Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią.

Mała encyklopedia energii jądrowej

Mini Encyclopedia of Nuclear Energy

Mała encyklopedia energii jądrowej

Mini Encyclopedia of Nuclear Energy

Warszawa
Grudzień 2012

