Władysław Walkowiak, Katarzyna Sobianowska

Promieniotwórczość naturalna i sztuczna – korzyści i zagrożenia wynikające z jej stosowania : energetyka jądrowa w Polsce

Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy 11 (2), 71-93

2014

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

MUZEUM HISTORII POLSKI

Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy
ISSN 1896-8333 nr 11(2)/2014

Władysław Walkowiak
Wydział Nauk Społecznych i Humanistycznych
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Witelona w Legnicy
e-mail: walkowiakw@gazeta.pl

Katarzyna Sobianowska
Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny
e-mail: katarzyna.sobianowska@pwr.wroc.pl

Promieniotwórczość naturalna i sztuczna – korzyści i zagrożenia wynikające z jej stosowania. Energetyka jądrowa w Polsce

STRESZCZENIE

Autorzy w pracy opisali promieniotwórczość naturalną, charakteryzując występowanie substancji promieniotwórczych w środowisku ziemskim oraz ich zastosowanie praktyczne. Omówiono też promieniotwórczość sztuczną, w tym reakcje rozszczepienia jądrowego uranu-235, użytą do produkcji bomby atomowej oraz w energetycznych reaktorach jądrowych. Zdefiniowano promieniowanie jonizujące oraz ochronę radiologiczną przed tym promieniowaniem. Omówiono dawki promieniowania jonizującego, a także dopuszczalne dawki graniczne w Polsce. Opisano udział poszczególnych paliw energetycznych w światowej i polskiej produkcji elektryczności, wskazując zanieczyszczenia atmosfery z tym związane. Przedstawiono stan i perspektywy energetyki jądrowej na świecie. Pokazano dotychczasowe najpoważniejsze awarie elektrowni jądrowych. Opisano przygotowania do budowy elektrowni jądrowych w Polsce, wskazując potencjalne lokalizacje oraz omawiając koszty budowy, projektowane technologie oraz problematykę szkolenia kadr.

Słowa kluczowe: promieniotwórczość naturalna i sztuczna, energetyka jądrowa, ochrona radiologiczna, elektrownie jądrowe w Polsce.

Wprowadzenie

Od zarania dziejów promieniotwórczość towarzyszy człowiekowi, ale jej podstawy znane są dopiero od około 100 lat. Do odkrycia promieniotwórczości naturalnej w znacznym stopniu przyczyniła się Maria Skłodowska-Curie. A z kolei jej córka, Irena Joliot-Curie ma swój udział w odkryciu sztucznej promieniotwórczości. W tym artykule opisane zostaną podstawy oraz zastosowania dotyczące naturalnej i sztucznej promieniotwórczości. Omówione też zostanie promieniowanie jonizujące – dawki tego promieniowania, osłony przed promieniowaniem i detekcja promieniowania, a także poziom promieniowania jonizującego w Polsce.

Najważniejsze zastosowanie sztucznej promieniotwórczości, jakim jest energetyka jądrowa, zostanie przedstawione na tle stosowanych dotychczas na świecie i w Polsce nieodnawialnych (węgiel, ropa naftowa i gaz) i odnawialnych źródeł energii (energia słoneczna, wiatrowa, wodna oraz biomasa). Kolejne rozdziały artykułu poświęcone są energetyce jądrowej na świecie oraz perspektywie budowy elektrowni jądrowych w Polsce.

Promieniotwórczość naturalna

Odkrycia promieniotwórczości naturalnej dokonał w roku 1896 francuski fizyk Henri Becquerel[1]. Naświetlał on minerały światłem słonecznym, ale z powodu niepogody nie zdążył naświetlić światłem słonecznym posiadanej próbki rudy uranowej – z tego powodu umieścił ją w kieszeni fartucha. Próbka rudy była przechowywana w ten sposób przez kilka dni, po czym Becquerel przypomniał sobie o kliszy i ją wywołał. Okazało się, że klisza uległa prześwietleniu, w tych miejscach, w których stykała się z próbką rudy uranowej.

Zadanie wyjaśnienia tego problemu Becquerel powierzył swojej współpracownicy Marii Skłodowskiej-Curie, która ze swoim mężem Piotrem wykryła, że rudy uranowe wykazują znacznie wyższą radioaktywność niż to wynikało z obecności samego uranu, co może świadczyć o istnieniu w rudzie uranowej jakichś innych promieniotwórczych substancji. Rozpoczęła więc żmudne chemiczne prace badawcze mające na celu wydzielenie tych substancji z rudy uranowej[2]. W efekcie Maria Skłodowska-Curie odkryła nowy pierwiastek chemiczny – rad[3]. Wyodrębnienie radu umożliwiło zbadanie zależności emisji energii od zawartości pierwiastka promieniotwórczego w próbce i odkrycie, że radioaktywność polega na emisji różnych rodzajów promieniowania przy jednoczesnej przemianie jednego pierwiastka w drugi. W tym przypadku była to przemiana radu w gazowy radon. W podobny sposób Maria Skłodowska-Curie wydzieliła z rudy uranowej polon, wykrywając kolejny nowy pierwiastek promieniotwórczy, który otrzymał nazwę na cześć jej ojczyzny – Polski[4]. O randze naukowych odkryć Marii Skłodowskiej-Curie w zakresie promieniotwórczości naturalnej świadczą dwie nagrody Nobla, jakie jej przyznano – w roku 1903 z fizyki (wspólnie z mężem i Becquerelem) oraz samodzielnie w roku 1911 z chemii[5].

Zjawisko promieniotwórczości naturalnej, zwane też często radioaktywnością, związane jest z samorzutnymi przemianami niestabilnych jąder atomów określonych pierwiastków (zwanych izotopami promieniotwórczymi lub radionuklidami), z którymi wiąże się emisja promieniowania jądrowego, w tym przede wszystkim obdarzonych ładunkiem cząstek typu alfa, beta minus oraz promieniowania elektromagnetycznego typu gamma. Każdy izotop promieniotwórczy jest nietrwały i rozpada się wg zasady, że po tzw. jednym okresie półtrwania jest jego połowa, a po dalszym okresie już jedna czwarta itd. Okresy półtrwania izotopów promieniotwórczych są bardzo różne i tak np. dla izotopów wodoru, węgla, potasu i uranu, tj. dla H-3, C-14, K-40 i U-238, wynoszą odpowiednio 12 lat, 5700 lat, 1,3 mld lat i 4,5 mld lat. Są to izotopy średnio- lub długożyciowe. Ale są też izotopy krótkożyciowe, jak np. izotopy

---

[1] E. Curie, *Maria Curie*, PWN, Warszawa 1958.
[2] Tamże.
[3] Tamże.
[4] Tamże.
[5] Tamże.

polonu i radu, tj. Po-218 i Rn-222 o okresach półtrwania wynoszących odpowiednio 3 min. i 3,8 dnia.

Promieniowanie jądrowe wpływa na przyrodę ożywioną, w tym na człowieka od początku jego dziejów. W naturalnym środowisku ziemskim występują w różnych ilościach następujące promieniotwórcze izotopy naturalne[6]:

– 29 naturalnych izotopów promieniotwórczych powstałych już przy formowaniu się Układu Słonecznego o okresie półtrwania porównywalnym z wiekiem Ziemi (4,5 mld lat). Są to m.in. izotopy potasu, rubidu, toru i uranu, takie jak: K-40, Rb-87, Th-232, U-238 i U-235.

– 43 radionuklidy pochodzące z trzech naturalnych szeregów promieniotwórczych, w tym m.in. izotopy radu, radonu, ołowiu, bizmutu i talu: Ra-226, Rn-222, Pb-214, Bi-214 i Tl-208.

– Ponad 30 izotopów promieniotwórczych pierwiastków od wodoru do bizmutu. Są one wytwarzane w sposób ciągły w wyniku reakcji jądrowych wysokoenergetycznych cząstek pochodzących z kosmosu (najczęściej są to neutrony) z jądrami atomów pierwiastków występujących w atmosferze. W ten sposób powstają m.in. izotopy wodoru, berylu, węgla i bizmutu: H-3, Be-7, C-14 i Bi-207.

W sumie w naturalnym środowisku ziemskim, tj. w atmosferze, wodach, glebie, a także wewnątrz skorupy ziemskiej, występuje w mniejszych lub większych ilościach ponad 100 różnych naturalnych izotopów promieniotwórczych.

Naturalne izotopy promieniotwórcze znalazły szereg zastosowań praktycznych, m.in.[7]:

1. W balneologii – do kąpieli leczniczych i inhalacji radonowych (izotop radonu Rn-222).
2. W archeologii – do określania wieku przedmiotów, w tym szczątków ludzkich, zwierzęcych i roślinnych za pomocą izotopu węgla, C-14. Jest to tzw. metoda datowania radiowęglowego. Innym radionuklidem pochodzenia kosmogenicznego używanym do oznaczania wieku różnego rodzaju próbek, w tym zwłaszcza próbek wód, jest izotop wodoru H-3 (zwany trytem).
3. W tzw. zegarach geologicznych, opartych na zjawisku rozpadu promieniotwórczego długożyciowych izotopów naturalnych stosowanych w geologii i archeologii. Metody te polegają na określeniu proporcji pomiędzy pierwotną zawartością danego izotopu promieniotwórczego a aktualną zawartością tego izotopu w próbce. Do tych metod zalicza się:
   a) metodę helową – izotop uranu U-238 po 8 przemianach typu alfa przechodzi w stabilny izotop ołowiu Pb-206,
   b) metodę argonową – izotop promieniotwórczy potasu K-40 w wyniku przemiany typu beta minus przechodzi w niepromieniotwórczy izotop argonu Ar-40,
   c) metodę strontową – izotop promieniotwórczy rubidu Rb-87 na skutek przemiany typu beta minus przechodzi w stabilny izotop strontu Sr-87.

Znaczący udział (ok. 40%) w sumarycznej promieniotwórczości naturalnej posiada radon. Jest to ciężki gaz (ok. 8 razy cięższy od powietrza), którego 3 izotopy promieniotwórcze Rn-219, Rn-220 i Rn-222 wchodzą w skład 3 szeregów naturalnych izotopów promieniotwórczych. Rn-222 jest naturalnym izotopem radonu o najdłuższym okresie półtrwania wynoszącym 3,6 dnia i pochodzi z szeregu uranowo-radowego rozpoczynającego się od izotopu uranu U-238. Zawartość izotopu radonu Rn-222 w atmosferze bliskiej powierzchni ziemi jest dość wysoka, gdyż jego przeciętna koncentracja wynosi 10 $Bq \cdot m^{-3}$ (1 Bq to 1 rozpad promieniotwórczy

---

[6] A. Polański, *Izotopy w geologii*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1979.

[7] J. Sobkowski, *Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna*, Wyd. Adamanton, Warszawa 2009.

na 1 sekundę)[8]. Najwyższe koncentracje radonu (głównie Rn-222) w przyziemnej atmosferze obserwuje się w Sudetach i innych obszarach górskich, gdzie występują surowce uranonośne. Radon może stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka, gromadzi się bowiem w budynkach mieszkalnych, przedostając się tam z wnętrza ziemi. Dotyczy to szczególnie podłoża granitowego, zawierającego wyższe zawartości uranu niż inne skały. Radon może też pochodzić z niektórych materiałów budowlanych.

Promieniotwórczość sztuczna

Sztucznymi reakcjami jądrowymi zainteresowało się następne pokolenie badaczy, którzy w latach 1919–1933 przeprowadzili reakcje jądrowe polegające na bombardowaniu tarcz zawierających różne stabilne izotopy za pomocą neutronów, protonów i cząstek typu alfa i w wyniku tych reakcji otrzymywali stabilne izotopy innych pierwiastków. W ten sposób zrealizowano odwieczne marzenie człowieka, aby z jednego pierwiastka otrzymać inny pierwiastek (niestety w bardzo małych ilościach).

W roku 1934 córka Marii Skłodowskiej-Curie, Irena Joliot-Curie, razem z mężem Fryderykiem Joliot bombardowali tarczę zawierającą Al-27 za pomocą cząstek alfa, otrzymując jako produkt pierwszy sztuczny izotop promieniotwórczy, tj. izotop fosforu, P-30, który samorzutnie emitował cząstki beta plus[9]. Za te prace w roku 1935 uzyskali oni nagrodę Nobla. Przy pomocy cząstek typu alfa, a także protonów otrzymano następnie kilkadziesiąt innych sztucznych izotopów promieniotwórczych.

Inne epokowe odkrycie dokonane zostało w roku 1938 przez Otto Hahna i Fritza Strassmanna, którym udało się rozszczepić jądra uranu-235, bombardując je powolnymi neutronami z wydzieleniem olbrzymiej ilości energii, tj. około 207 MeV (w przeliczeniu na 1 jądro uranu-235)[10]. Energia ta pochodzi z różnicy między masą jądra przed jego rozszczepieniem a masami produktów rozszczepienia, czyli nowo powstałych jąder pierwiastków promieniotwórczych – jest to tzw. defekt masy. Powstałe fragmenty rozszczepienia są jądrami nietrwałymi i ulegają one dalszym rozpadom typu β plus i β minus oraz gamma. Emitowane są też szybkie neutrony oraz wydzielana jest energia cieplna. Przykładową reakcję rozszczepienia jąder U-235 daje się przedstawić jako[11]:

$$\text{U-235} + \text{n} \rightarrow \text{U-236*} \rightarrow \text{Ba-141} + \text{Kr-92} + 3\text{n} + 207\ \text{MeV}$$

Gwiazdka przy symbolu U-236 wskazuje na stan wzbudzony tego izotopu. Powstałe produkty rozszczepienia, tj. Ba-141 i Kr-92, są jednymi z wielu powstających izotopów promieniotwórczych. Wśród nich są izotopy o wysokiej energii promieniowania gamma (a więc relatywnie łatwej detekcji tego promieniowania), jak np. Cs-134, Cs-137 i I-131. Warto tutaj podkreślić, że ilość energii cieplnej wydzielanej przy rozszczepieniu jednostki masy uranu-235 jest ok. 300 tysięcy razy wyższa niż podczas spalania tej samej masy węgla kamiennego.

---

[8] J. Sobkowski, *Chemia radiacyjna…*, dz. cyt.
[9] Tamże.
[10] Tamże.
[11] Tamże.

Po wybuchu II wojny światowej do USA wyemigrowali wybitni europejscy naukowcy: Albert Einstein, Niels Bohr, Robert Oppenheimer, Enrico Fermi, Leo Szilard i inni. Wiara tych badaczy w możliwości użycia reakcji rozszczepiania uranu do wyprodukowania broni jądrowej o niespotykanej do tej pory sile niszczenia oraz obawa przed opanowaniem tej broni przez hitlerowskie Niemcy sprawiły, iż zwrócili się w tej sprawie do rządu USA. Tak powstał tzw. „Projekt Manhattan", w wyniku którego została wyprodukowana bomba atomowa, po raz pierwszy użyta w 1945 roku w Japonii (Hiroshima i Nagasaki).

Sztuczne izotopy promieniotwórcze znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki[12]. Poza energetyką jądrową, która zostanie omówiona w następnym rozdziale, znalazły one szerokie zastosowanie w medycynie. Stosowane są w diagnostyce oraz w leczeniu niektórych chorób. Dla przykładu izotop technetu, Tc-99, pełni rolę znacznika diagnostycznego w chorobie nerek, płuc, kości, mózgu i tarczycy. W celu wykrycia nieprawidłowej pracy płuc stosuje się inhalację izotopem ksenonu, Xe-133. W procesie leczenia tarczycy używa się promieniotwórczego izotopu jodu, I-131. W radioterapii stosuje się tzw. bombę kobaltową, czyli silnie gamma promieniotwórczy izotop kobaltu, Co-60. Izotop ten znalazł też zastosowanie w procesie utrwalania żywności, gdyż zabija on bakterie, pleśnie i inne drobnoustroje.

Wiele zastosowań znalazły sztuczne izotopy promieniotwórcze (oraz niektóre naturalne, jak C-14 czy H-3) jako wskaźniki izotopowe w badaniach naukowych w zakresie fizyki, chemii i biologii. Wiele sztucznych radionuklidów znalazło szerokie zastosowania w przemyśle, np. do badania szczelności rurociągów (izotop sodu Na-24), badania grubości foli metalowych i papieru (izotop irydu Ir-192), określania masy materiałów transportowanych taśmociągiem w tzw. wagach izotopowych (izotopy irydu i kobaltu, tj. Ir-192, Co-60) i w czujkach dymu (izotop ameryku Am-241)[13].

Promieniowanie jonizujące

Promieniotwórczość naturalna i sztuczna powoduje, że ciągle jesteśmy narażeni na tzw. promieniowanie jonizujące. Promieniowanie jonizujące to wszystkie rodzaje promieniowania, które wywołują jonizację jakiejkolwiek materii żywej lub martwej, czyli na poziomie molekularnym powodują oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki[14]. Promieniowaniem jonizującym jest więc promieniowanie typu alfa oraz beta plus i beta minus. Do promieniowania jonizującego zalicza się również promieniowanie elektromagnetyczne, którego fotony posiadają energię wyższą od energii fotonów światła widzialnego. Tak więc promieniowaniem jonizującym jest pochodzące z jądra promieniowanie gamma, ale także szeroko stosowane w medycynie promieniowanie rentgenowskie.

W ochronie radiologicznej do oceny skutków oddziaływania określonego rodzaju promieniowania jonizującego na materię żywą, np. na człowieka, wprowadzono pojęcie dawki promieniowania, która jest taką ilością energii, jaką przyjmuje tkanka narażona na działanie promieniowania jonizującego[15]. Istnieją różne sposoby oceny tych dawek i ich mie-

---

[12] Tamże.

[13] Tamże.

[14] J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, *Chemia jądrowa*, Wyd. Adamanton, Warszawa 2006.

[15] J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, *Chemia…*, dz. cyt.

rzenia. Wyróżnia się następujące dawki: dawkę pochłoniętą, dawkę równoważną, dawkę ekspozycyjną i dawkę skuteczną. Dawka pochłonięta to ilość energii promieniowania jonizującego, jaka zostanie pochłonięta przez jednostkę masy materii narażonej na to promieniowanie. Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI (układ jednostek obecnie obowiązujący w nauce) jest grej (1 Gy = 1 $J \cdot kg^{-1}$), wcześniej jednostką obowiązującą był rad. Z kolei dawka równoważna jest dawką uwzględniającą rodzaj promieniowania, na jakie narażona jest dana materia. Okazało się bowiem, że od rodzaju promieniowania zależą skutki, jakie wywiera ono na daną materię. Skuteczność promieniowania jest wyrażana przez współczynnik, który w zależności od rodzaju i energii promieniowania przyjmuje wartości od 1 do 20. Jednostką dawki równoważnej w układzie SI jest siwert (Sv), a wcześniej obowiązującą jednostką był rem.

Dla osób z ogółu ludności w Polsce dawka graniczna wyrażona jako dawka skuteczna wynosi 1 mSv w ciągu roku kalendarzowego[16]. Wyznaczając tę dawkę skuteczną, zmniejsza się ją o dawkę wynikającą z naturalnego tła promieniowania jonizującego występującego na danym terenie, biorąc pod uwagę rzeczywisty czas narażenia. Jeżeli tło naturalne nie jest znane, przyjmuje się jego wartość roczną równą 2,4 mSv[17].

Dla osób pracujących zawodowo z promieniowaniem jonizującym, w tym dla pracowników przemysłu jądrowego, dopuszczalna dawka roczna wynosi 20 mSv[18]. Wynika to z faktu, że pracownicy ci objęci są dokładną kontrolą radiologiczną, polegającą m.in. na częstych badaniach lekarskich. Limity te mogą być jednak w wyjątkowych warunkach przekraczane (np. w trakcie awarii jądrowej) i wtedy dopuszczalna dawka wzrosnąć może nawet do 100 mSv. W takiej sytuacji obowiązują jednak dodatkowe obostrzenia, np. jeżeli pracownik otrzyma jednorazową dawkę 60 mSv, to wówczas jest odsuwany od pracy z narażeniem na promieniowanie jonizujące przez 3 lata, tak aby w ciągu 3 kolejnych lat nie przekroczyć rocznej dopuszczalnej dawki 20 mSv.

Ważną a zarazem skuteczną metodą ochrony przed promieniowaniem jonizującym jest stosowanie odpowiednich osłon[19]. Każdy rodzaj promieniowania jonizującego wymaga dobrania odpowiedniej osłony, tak aby była ona najbardziej efektywna, tzn. maksymalnie zmniejszała natężenie promieniowania. W przypadku promieniowania typu alfa skuteczną osłoną jest zwykła kartka papieru, a w przypadku promieniowania typu beta (plus lub minus) wystarczy stosunkowo cienka blacha aluminiowa lub osłona ze szkła organicznego. Najbardziej przenikliwe jest promieniowanie typu gamma, które wymaga zastosowania osłon z materiałów bardzo ciężkich, np. z ołowiu lub specjalnych gatunków betonu. Znane są sposoby obliczania grubości osłon promieniowania gamma w zależności od wymaganej krotności osłabienia tego promieniowania[20].

Promieniowanie jonizujące można relatywnie łatwo wykryć, używając do tego celu detektorów wykorzystujących oddziaływanie danego rodzaju promieniowania (alfa, beta, gamma, neutronowe itp.) z materią. Detektorami tymi są m.in. liczniki Geigera-Mullera, komory

---

[16] Rozporządzenie Rady Ministrów z 2005 r. w sprawie dopuszczalnych dawek granicznych promieniowania jonizującego, Dz. U. z 2005 r., nr 20, poz. 168.

[17] Tamże.

[18] J. Sobkowski, *Chemia radiacyjna…*, dz. cyt.

[19] Tamże.

[20] Polska Norma PN/86/J80001: Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma. Obliczanie osłon stałych. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, www.pkn.pl dostęp: 7 lutego 2014 r.

jonizacyjne, liczniki proporcjonalne, detektory scyntylacyjne, detektory półprzewodnikowe, klisze fotograficzne i detektory chemiczne[21].

Od kilkunastu lat działa w Polsce system monitoringu radiacyjnego. W systemie tym pracują stacje wykrywania skażeń promieniotwórczych[22]. Pomiary te są prowadzone przez:

– stacje pomiarowe tworzące system wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych,

– podstawowe placówki pomiarowe prowadzące pomiary skażeń promieniotwórczych materiałów środowiskowych i żywności,

– placówki specjalistyczne jednostek badawczych, szkół wyższych oraz innych jednostek.

Działania te koordynuje Państwowa Agencja Atomistyki, która na tej podstawie ocenia sytuację radiacyjną Polski i publikuje ją w komunikatach kwartalnych i w raportach rocznych[23]. Przykładowo komunikat w sprawie sytuacji radiologicznej Polski w I kwartale 2013 roku informuje, że poziom promieniotwórczości w Polsce przedstawia się następująco[24]:

– moc dawki – *średnio* 90 $nSv \cdot h^{-1}$,

– Cs-137 w mleku – *średnio* 0,59 $Bq \cdot dm^{-3,}$

– Cs-137 w powietrzu – *średnio* 1,4 $\mu Bq \cdot m^{-3}$.

Dane te pokazują, że narażenie osób z ogółu ludności Polski spowodowane obecnymi w środowisku sztucznymi izotopami promieniotwórczymi (na podstawie pomiaru izotopu cezu Cs-137) pozostaje na bardzo niskim poziomie, który wynosi kilka procent wartości dawki granicznej dla ogółu ludności, tj. 1 $mSv \cdot rok^{-1}$.

Odnawialne i nieodnawialne surowce energetyczne

Energia potrzebna jest człowiekowi w jego codziennym życiu. Jej postać i wykorzystanie mogą być różne, ale głównie potrzebujemy jej przy produkcji przemysłowej, w rolnictwie, transporcie oraz ogrzewaniu i oświetleniu domostw i obiektów użyteczności publicznej. Początkowo energia pochodziła z zasobów naturalnych: drewna, węgla kamiennego i brunatnego, torfu, ropy naftowej oraz gazu. Od dawna przetwarzano także energię w wiatrakach oraz młynach wodnych. Od kilkudziesięciu lat zaczęto coraz powszechniej używać bardzo wygodnej postaci energii, tj. enerii elektrycznej. Z drugiej strony bardzo rozwinął się transport, w tym samochodowy. Spowodowało to jeszcze większe zapotrzebowanie na pierwotne źródła energii i w konsekwencji w latach 70-tych XX wieku pojawił się kryzys energetyczny, który doprowadził do skokowego wzrostu cen ropy naftowej, a następnie wszystkich innych paliw. Z drugiej strony konwencjonalne elektrownie i elektrociepłownie mają znaczący wpływ na czystość powietrza atmosferycznego, gleby i wód, a za ich pośrednictwem na rośliny, zwierzęta i ludzi. Na środowisko naturalne oddziałują przede wszystkim spaliny zawierające lotne pyły, dwutlenek i tlenek węgla, dwutlenek siarki, tlenki azotu i inne.

---

[21] Tamże.

[22] Rozporządzenie Rady Ministrów z 2002 r. w sprawie stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych i placówek prowadzących pomiary skażeń promieniotwórczych, Dz. U. z 2002, nr 239, poz. 2030.

[23] Strona Spółki PGE EJ1: www.PGEEJ1.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

[24] Komunikat Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 15 kwietnia 2013 r. w sprawie sytuacji radiacyjnej kraju w I kwartale 2013 r., Monitor Polski z 2013 r., poz. 340.

Potrzeba opanowania tego kryzysu, jak również problemy ochrony środowiska zwiększyły zainteresowanie nowymi, niekonwencjonalnymi źródłami energii, które można podzielić na źródła odnawialne i nieodnawialne:

– odnawialne źródła energii elektrycznej to energia słoneczna, energia wiatru, energia geotermalna, energia pływów i fal morskich,

– źródła nieodnawialne to wodór, energia jądrowa i ogniwa paliwowe.

Energię wewnętrzną ziemi (geotermalną) można zaliczyć do obu rodzajów źródeł: gejzery są źródłem nieodnawialnym, a energia gorących skał jest zaś energią odnawialną.

Obecnie w zakresie produkcji elektryczności na świecie dominującym surowcem energetycznym jest węgiel. Udział poszczególnych paliw w roku 2010 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Udział paliw energetycznych w światowej produkcji elektryczności w 2010 roku

Rodzaj paliwa	Udział [%]
Węgiel kamienny	35,8
Gaz ziemny	21,3
Elektrownie wodne	16,2
Energetyka jądrowa	13,5
Surowce ropopochodne	5,5
Węgiel brunatny	4,2
Pozostałe źródła	3,5

Źródło: Electricity Information – IEA Statistics, OECD/IEA, Parys: www.iea.org, dostęp: 5 lutego 2014 r.

67% paliw używanych do produkcji elektryczności wiąże się z emisją dwutlenku węgla do atmosfery, przy czym 40% energii produkowane jest z najmniej ekologicznych paliw, tj. węgla kamiennego i brunatnego.

W Unii Europejskiej udział energii elektrycznej produkowanej ze źródeł odnawialnych w roku 2010 wynosił 12,4%. Przodują w tym zakresie Niemcy z 18-procentowym udziałem energii odnawialnej, a Polska z 9,9-procentowym udziałem zajmuje 16. miejsce wśród krajów UE.

Tabela 2. Produkcja energii elektrycznej (w TWh) w Polsce w 2010 roku oraz prognoza na 2020 rok

Surowiec energetyczny	2010 r.	2020 r.
Węgiel kamienny	68,2	62,7
Węgiel brunatny	44,7	40,0
Gaz ziemny	4,4	8,4
Produkty ropopochodne	1,9	2,8
Energia odnawialna	8,0	30,1
Inne	1,6	2,1
Razem	128,7	146,1

Źródło: Polska Norma PN/86/J80001: Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma. Obliczanie osłon stałych. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, www.pkn.pl, dostęp: 7 lutego 2014 r.

Polska produkuje prąd elektryczny głównie z węgla kamiennego i brunatnego. W sumie aż 88% energii elektrycznej pochodzi z tych dwóch rodzajów węgla. W tabeli 2 przedstawiono produkcję energii elektrycznej w 2010 roku i prognozę na 2020 rok. Z tej prognozy wynika, że za 6 lat udział procentowy energii odnawialnej w Polsce ma wzrosnąć do 30%.

Energetyka jądrowa na świecie

Energetyka jądrowa oparta jest jak dotychczas na paliwie uranowym. Uran jest najcięższym naturalnym pierwiastkiem promieniotwórczym występującym w przyrodzie, a w jego skład wchodzą 3 izotopy: U-238 (99,27 %), U-235 (0,72 %) i U-234 (0,006 %)[25]. Rozpowszechnienie tego pierwiastka w przyrodzie jest dość wysokie, gdyż wynosi $4 \cdot 10^{-4}$ %[26]. Izotopy uranu U-238 i U-235 poprzez kolejne samorzutne przemiany promieniotwórcze tworzą dwa szeregi naturalnych izotopów promieniotwórczych. Już od lat 40-tych XX wieku było wiadomo, że jedynym naturalnym izotopem uranu zdolnym do rozszczepienia pod wpływem neutronów o niskiej energii, zwanych neutronami termicznymi, jest uran-235. Jednak zawartość U-235 w naturalnym uranie jest za niska, aby możliwy był proces rozszczepienia. Dlatego należy wzbogacić naturalny uran w uran-235 do stężenia kilku procent. Aby doszło do reakcji rozszczepienia jąder U-235 należy je bombardować strumieniem neutronów o niskiej energii, tzw. neutronów termicznych. W wyniku reakcji rozszczepienia powstają dwa fragmenty jąder promieniotwórczych oraz 2–3 neutrony o wysokiej energii, tzw. neutrony szybkie. Neutrony te muszą być spowolnione, aby nadawały się do zawrotu w przebiegającej łańcuchowo reakcji rozszczepienia – w tym celu przepuszcza się je przez tzw. moderatory, którymi są zwykła woda, ciężka woda lub grafit.

Przebieg tej reakcji rozszczepienia kontrolowany jest przez wprowadzanie do reaktora jądrowego substancji pochłaniających termiczne neutrony w postaci prętów regulacyjnych. Ponadto reaktor wyposażony jest dodatkowo w pręty bezpieczeństwa, które stosowane są w przypadku awaryjnego wyłączenia reaktora. Substancjami stosowanymi do pochłaniania neutronów termicznych są kadm lub bor. Odprowadzenie wydzielanego w olbrzymich ilościach ciepła odbywa się za pomocą tzw. chłodziwa, którym najczęściej jest woda.

Znanych jest kilka kryteriów klasyfikacji reaktorów jądrowych, z których najistotniejsze to[27]:
- przeznaczenie reaktora,
- szybkość (energia) neutronów do reakcji rozszczepienia,
- rodzaj, postać i stopień wzbogacenia paliwa jądrowego,
- konstrukcja reaktora,
- rodzaj chłodziwa i moderatora,
- sposób odprowadzania ciepła z reaktora.

Paliwa jądrowe. Paliwem reaktorowym są głównie izotopy rozszczepialne uranu (U-235 i U-233) lub plutonu (Pu-239). W zasadzie w reaktorach z neutronami termicznymi używa się jako paliwa uranu, a w reaktorach z neutronami prędkimi – plutonu. W reaktorach z paliwem uranowym stosuje się różny stopień wzbogacenia uranu w izotop rozszczepialny (U-235), stąd rozróżnia się reaktory pracujące na:

---

[25] A. Polański, *Izotopy…*, dz. cyt.

[26] Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku, Ministerstwo Gospodarki RP, 2009. Uchwała Rady Ministrów nr 202/2009: www.mg.gov.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

[27] Portal Energetyka Jądrowa: www.atom.edu.pl/, dostęp: 5 lutego 2014 r.

– uranie naturalnym (reaktory gazowe i reaktory ciężkowodne),

– uranie słabo wzbogaconym (3–5% U-235) używanym w reaktorach lekko wodnych i w niektórych reaktorach gazowych,

– uranie średnio wzbogaconym stosowanym w reaktorach badawczych,

– uranie wysoko wzbogaconym (ponad 90% U-235) używanym w reaktorach wysokotemperaturowych.

Najczęściej spotykane postaci chemiczne, pod jakimi stosuje się paliwo reaktorowe, to:

– uran metaliczny używany w niskotemperaturowych reaktorach gazowych,

– dwutlenek uranu stosowany w reaktorach wodnych, niektórych reaktorach wysokotemperaturowych oraz w niektórych niskotemperaturowych reaktorach gazowych,

– węglik uranu używany w niektórych reaktorach wysokotemperaturowych.

Konstrukcje reaktorów. W praktyce spotyka się dwa zasadnicze rodzaje konstrukcji jądrowych reaktorów wodnych, tj. zbiornikowe (reaktory typu PWR i BWR) oraz kanałowe (reaktory typu RBMK i CANDU). W reaktorze zbiornikowym rdzeń jest umieszczony wewnątrz grubościennego zbiornika stalowego, który potrafi wytrzymać ciśnienia rzędu 15 MPa. Z kolei w reaktorach kanałowych pod wysokim ciśnieniem znajdują się jedynie kanały, które zawierają paliwo jądrowe. Każde z rozwiązań ma swoje zalety i wady. Przede wszystkim należy zauważyć, że szczelna obudowa jest istotnym elementem bezpieczeństwa sytemu reaktora jądrowego (patrz uwagi dotyczące awarii reaktorów jądrowych). Z punktu widzenia eksploatacyjnego reaktory można podzielić na reaktory z ciągłą wymianą paliwa (w czasie pracy reaktora nie ma konieczności jego odstawiania) oraz z okresową wymianą paliwa (po przerwaniu pracy reaktora). Oba typy reaktorów różnią się zasadniczo rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Do pierwszej grupy należą reaktory typu kanałowego, a do drugiej – reaktory typu zbiornikowego.

Rodzaj chłodziwa i moderatora. W tzw. lekkowodnych reaktorach jądrowych woda spełnia jednocześnie dwie funkcje: moderatora i chłodziwa. W innych typach reaktorów funkcje te są oddzielone od siebie. Jako moderator może służyć lekka woda (H_2O), ciężka woda (D_2O) lub grafit. Jako chłodziwa używa się: lekkiej lub ciężkiej wody, dwutlenku węgla, helu lub ciekłego sodu. Z tego powodu spotykane są określenia: reaktory wodne, ciężkowodne, gazowe, sodowe, helowe, grafitowe itd. W sytuacji gdy ciekłe chłodziwo, jak np. lekka woda lub ciężka woda, doprowadzane są w reaktorze do stanu wrzenia, to reaktory takie nazywane są wrzącymi (np. typ BWR).

Reaktory jądrowe dzieli się również wg ich generacji:

– pierwszej generacji – reaktory, które powstały w latach 1950–1970,

– drugiej generacji – reaktory przemysłowe powstałe w latach 1970–1990,

– trzeciej generacji – reaktory, które zostały uruchomione po 1995 roku,

– czwartej generacji – najnowsze konstrukcje, obecnie w fazie projektów, mające z założenia bardzo wysoką efektywność ekonomiczną i cieplną, bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa oraz minimalną ilość odpadów.

Obecnie wdraża się reaktory trzeciej generacji, ale nadal w użyciu są reaktory drugiej generacji. W najbliższych latach rozpocznie się uruchomianie reaktorów czwartej generacji.

Pierwsza elektrownia atomowa na świecie została uruchomiona w Obnińsku (były ZSRR) w roku 1954[28]. Ta niewielka elektrownia posiadała moc energetyczną 36 MW, z czego 5 MW przetwarzane było na energię elektryczną, a pozostała część dostępna była w formie energii

[28] Portal Energetyka Jądrowa: www.atom.edu.pl/, dostęp: 5 lutego 2014 r.

cieplnej. Reaktor był prototypową konstrukcją chłodzoną wodą, a moderatorem był grafit; został on wyłączony z pracy w 2002 roku. Następcami tej konstrukcji były reaktory rosyjskie zaliczane do grupy RBMK.

W ciągu ponad pół wieku wybudowano w różnych krajach ok. 500 reaktorów jądrowych. Według stanu na dzień 12 kwietnia 2013 roku w 30 krajach i na Tajwanie pracowało łącznie 437 jądrowych bloków energetycznych o łącznej mocy 373 GW[29]. Udział elektrowni jądrowych w światowej produkcji energii elektrycznej wynosił w 2013 roku 14%. Tabela 3 zawiera wykaz czynnych elektrowni jądrowych na świecie.

Tabela 3. Elektrownie jądrowe na świecie wg stanu na 2013 rok

L.p.	Kraj	Liczba reaktorów energetycznych	Łączna moc zainstalowana [MW]	Udział w produkcji energii elektrycznej kraju [%]
1.	Argentyna	2	935	4,7
2.	Armenia	1	375	39,4
3.	Belgia	7	5927	51,2
4.	Brazylia	2	1884	3,1
5.	Bułgaria	2	1906	33,1
6.	Chiny	18	13 860	1,8
7.	Czechy	6	3678	33,3
8.	Finlandia	4	2716	28,4
9.	Francja	58	63130	74,8
10.	Hiszpania	8	7514	20,1
11.	Holandia	1	482	3,4
12.	Indie	20	4391	2,8
13	Iran	1	915	0,1
14.	Japonia*	50		
15.	Kanada	18	12 569	15,1
16.	Korea Pd.	21	18 698	32,2
17.	Meksyk	2	1300	3,6
18.	Niemcy**	9	12 068	16,1
19.	Pakistan	3	725	2,6
20.	RPA	2	1800	5,2
21.	Rosja	33	23 643	17,8
22.	Rumunia	2	1300	19,5
23.	Słowacja	4	1816	51,8
24.	Słowenia	1	688	37,3
25.	USA	103	101 240	19,6

[29] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl, dostęp: 9 lutego 2014 r.

26.	Szwajcaria	5	3263	38,0
27.	Szwecja	10	9298	38,1
28.	Ukraina	15	13 107	48,1
29.	Węgry	4	1889	42,1
30.	Wielka Brytania	19	10 137	15,7
31.	Tajwan	6	5018	18,4

* Od początku 2014 roku wszystkie 50 reaktorów jądrowych w Japonii jest wyłączonych i poddawanych modernizacji, aby nie dopuścić do powtórzenia się wydarzeń z marca 2011 roku.

** Po awarii w Fukushimie w marcu 2011 r. rząd Niemiec nakazał w wyłączyć 8 najstarszych bloków energetycznych oraz przedstawił terminarz wyłączenia pozostałych bloków do końca 2022 r.

Źródło: Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl, dostęp: 9 lutego 2014 r.

Obecnie w fazie budowy w 15 krajach i na Tajwanie znajduje się 68 jądrowych bloków energetycznych o sumarycznej mocy 63 GW. Dalszych 250 jądrowych bloków energetycznych w 40 krajach jest planowanych do oddania do 2030 roku. Ich zestawienie podano w tabeli 4.

Tabela 4. Państwa budujące i planujące do roku 2030 nowe jądrowe bloki energetyczne – stan na 2013 r.

L.p.	Kraj	Liczba budowanych bloków	Moc budowanych bloków [MW]	Liczba planowanych bloków	Moc planowanych bloków [MW]
1.	Argentyna	1	692	3	1419
2.	Bangladesz			2	2000
3.	Białoruś			2	2000
4.	Brazylia	1	1270	4	6270
5.	Bułgaria			1	1000
6.	Chile			4	4400
7.	Chiny	28	27 844	77	86 570
8.	Czechy			3	3450
9.	Egipt			1	1000
10.	Finlandia	1	1600	3	4700
11.	Francja	1	1630	2	2820
12.	Holandia			1	1600
13	Indie	7	4824	18	15 500
14.	Indonezja			6	6000
15.	Iran			2	2000
16.	Japonia	2	2650	4	5850
17.	Jordania			1	1000
18.	Kazachstan			2	600

19.	Kanada			2	3000
20.	Korea Pd.	4	4980	5	7000
21.	Litwa			1	1350
22.	Meksyk			2	2000
23.	Nigeria			4	4000
24.	Pakistan	2	630	2	2000
25.	Polska			6	6000
26.	RPA			6	9600
27.	Rosja	11	9297	17	24 180
28.	Rumunia			2	1300
29.	Słowacja	2	782	1	1200
30.	Słowenia			1	1000
31.	USA	3	3399	11	13 260
32.	Szwecja			2	b.d.
33.	Tajlandia			5	1000
34.	Turcja			8	10 400
35.	Ukraina	2	1900	11	12 000
36.	Węgry			2	2200
37.	Wielka Brytania			13	18 680
38.	Wietnam			10	10 700
39.	Zjedn. Emiraty Arabskie	1	1345	3	4200
40.	Tajwan	2	2527		

Źródło: Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl, dostęp: 9 lutego 2014 r.

Dane z tej tabeli pokazują, że największy wzrost energetyki jądrowej planowany jest w Rosji i w krajach azjatyckich, takich jak Chiny, Korea Południowa i Indie. W Unii Europejskiej takie kraje jak Francja, Słowacja, Czechy, Rumunia i Finlandia chcą nadal rozbudowywać energetykę jądrową. Z drugiej strony niektóre inne państwa Unii Europejskiej, jak Niemcy, Austria, Wielka Brytania i Szwecja, zapowiedziały ograniczenie liczby czynnych elektrowni jądrowych.

Należy podkreślić, że w odległości do 300 km od granic Polski czynnych jest 9 elektrowni jądrowych posiadających ogółem 24 bloki energetyczne o sumarycznej mocy równej 15,5 GW. Wymienione elektrownie jądrowe obejmują[30]:

– 14 reaktorów typu WWER-440 (każdy o mocy 440 MW) znajdujących się w elektrowniach Równe (Ukraina), Paks (Węgry), Mochovce (Słowacja) i Dukovany (Czechy),

– 6 reaktorów typu WWER-1000 (każdy o mocy 1000 MW) pracujących w elektrowniach Równe i Chmielnicki (Ukraina) oraz Temelin (Czechy),

[30] Strona Spółki PGE EJ1: www.PGEEJ1.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

– 4 reaktory typu BWR znajdujące się w elektrowniach Krümmel (Niemcy) o mocy 1316 MW oraz Oskarshamn (Szwecja) o mocy 2307 MW.

Tak więc Polska sąsiaduje z krajami, które posiadają czynne elektrownie jądrowe. Z jednej strony niektóre kraje, jak Niemcy, chcą znacznie ograniczyć energetykę jądrową, a inne, jak Czechy, planują ją nadal rozbudowywać. W tej sytuacji nie należy dziwić się, że Niemcy wywierają nacisk na Polskę, aby zrezygnowała z planów budowy elektrowni jądrowych. Trzeba jeszcze dodać, że inny nasz sąsiad – Litwa zamknęła wprawdzie swoją elektrownię jądrową w Ignalinie, ale zamierza przystąpić do budowy nowej elektrowni atomowej Visaginas, która ma być wspólnym przedsięwzięciem Litwy, Łotwy i Estonii. Również Rosja planuje budowę elektrowni jądrowej w Obwodzie Kaliningradzkim. Plany w zakresie budowy nowych elektrowni atomowych mają także Ukraina i Białoruś.

Największą grupą reaktorów stosowanych obecnie w energetyce jądrowej na świecie są ciśnieniowe reaktory wodne (nazywane też lekkowodnymi) typu PWR. Chłodziwem i jednocześnie moderatorem neutronów jest bardzo czysta woda pod wysokim ciśnieniem, w warunkach nie dopuszczających do wystąpienia wrzenia w obiegu chłodzenia rdzenia. Ze względu na znaczne pochłanianie neutronów przez wodór stosowanie wody jako moderatora zmusza do stosowania jako paliwa uranu lekko wzbogaconego (2–4% uranu-235). Reaktory ciśnieniowe pracują w układzie dwóch obiegów. Obieg pierwotny tworzą: reaktor, wymiennik ciepła, pompy recyrkulacyjne i stabilizator ciśnienia, obieg wtórny natomiast: wytwornica pary (sprzęgająca oba obiegi), turbina parowa, skraplacz i układ regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej. Rdzeń reaktora wraz z prętami regulacyjnymi znajduje się w ciśnieniowym zbiorniku reaktora, który musi wytrzymać ciśnienie do ok. 160 atmosfer. Zbiornik ten w znacznym stopniu podnosi bezpieczeństwo pracy reaktora wodnego typu BWR. Obecnie jest ok. 200 reaktorów typu PWR pracujących w różnych krajach.

Innym typem reaktora lekkowodnego jest reaktor BWR. Jest to tzw. reaktor wodny wrzący. Woda chłodząca reaktor pełni tu rolę zarówno moderatora, jak i czynnika roboczego w cyklu parowo-wodnym. Jej odparowanie następuje bezpośrednio w rdzeniu reaktora, ale wykorzystana jest też do napędzania turbin generatora. Wadą tego typu obiegu wody w elektrowni jest przechodzenie zanieczyszczonej izotopami wody chłodzącej poprzez wszystkie elementy obiegu. Zmusza to do zabezpieczenia urządzeń osłonami chroniącymi przed promieniowaniem jonizującym, co znacznie utrudnia eksploatację tego typu reaktora. W eksploatacji na świecie jest obecnie ok. 90 reaktorów tego typu.

Lekkowodne reaktory kanałowe z moderatorem grafitowym są eksploatowane w krajach byłego ZSRR. Reaktor typu RBMK był celem sowieckiego programu budowy reaktorów jądrowych służących do produkcji plutonu do celów militarnych. Chłodzenie lekką wodą i moderacja grafitem umożliwiła stosowanie jako paliwa naturalnego uranu, bez potrzeby jego wzbogacania. Powoduje to jednak wzrost reaktywności przy zwiększaniu się ilości pary w rdzeniu reaktora, co utrudnia jego sterowanie i może doprowadzić do utraty stabilności pracy reaktora. Ta wada tego typu reaktorów była jedną z przyczyn bardzo poważnej awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu w 1986 roku.

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej wprowadziła w roku 1990 siedmiostopniowy system oceny awarii jądrowych, tzw. INES[31]. Poziom 0 oznacza brak albo zakłócenie mało znaczące dla technicznego bezpieczeństwa elektrowni, poziom 1 – anomalia, poziomy 2 i 3 – incydenty, a poziomy od 4 do 7 obejmują poważne awarie (wypadki). Poniżej

[31] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl, dostęp: 9 lutego 2014 r.

przedstawiono kilka najpoważniejszych awarii elektrowni jądrowych, jakie wydarzyły się na świecie do chwili obecnej:

1. **Rosyjskie zakłady Mayak (byłe ZSRR) (INES 6)**. W 1957 roku Kombinacie Chemicznym „Majak" w Kysztymie na Uralu miała miejsce awaria systemu chłodniczego, co spowodowało eksplozję zbiornika odpadów promieniotwórczych. Napromieniowanych zostało ok. 270 tys. osób. Przez wiele lat nie było nic wiadomo o tym tragicznym wypadku. 30 skażonych wsi zniknęło z sowieckich map. Według niezależnych źródeł pełna liczba śmiertelnych ofiar mogła wynosić do kilkunastu tysięcy osób.
2. **Three Mile Island w Pensylwanii (USA) (INES 5)**. W dniu 28 marca 1979 roku doszło do największej awarii w historii amerykańskiej energetyki jądrowej. W położonej w pobliżu Harrisburga elektrowni atomowej Three Mile Island doszło do stopienia rdzenia reaktora. Awaria ta była skutkiem błędnych decyzji załogi elektrowni. W jej wyniku nikt nie zginął, jednak trzeba było ewakuować około 200 tys. osób. Likwidacja skutków wypadku trwała przez 11 lat.
3. **Czarnobyl, Ukraina (b. ZSRR) (INES 7)**. 26 kwietnia 1986 roku miała miejsce katastrofa w Czarnobylu, która uzyskała najwyższą notę – 7 w skali INES. Nieudany eksperyment z reaktorem typu RBKM doprowadził do wybuchu i dostania się do atmosfery ok. 200 ton radioaktywnych odpadów. Skażony został obszar o rozmiarach ok. 135 tys. km^2. Chmura radioaktywnego pyłu dotarła do wielu krajów Europy, w tym do Polski. Kilkadziesiąt osób zmarło na skutek zachorowań w wyniku napromieniowania.
4. **Fukushima, Japonia (INES 7)**. 11 marca 2011 roku położona ok. 250 km na północ od Tokio elektrownia jądrowa Fukushima I została poważnie uszkodzona na skutek tsunami po silnym trzęsieniu ziemi w tych okolicach.

Przyszłość energetyki jądrowej wiąże się z zastosowaniem jako materiału rozszczepialnego innego naturalnego pierwiastka promieniotwórczego, tj. toru (Th-232). W wyniku rozszczepienia toru powstają jądra atomowe o niższej masie niż przy rozszczepieniu uranu i jest wśród nich więcej jąder niepromieniotwórczych. Jednak w trakcie rozszczepienia toru powstaje zbyt mało neutronów, aby uzyskać stan krytyczny, w związku z tym do reaktora takiego trzeba wprowadzić neutrony z zewnątrz. W celu uzyskania dużej ilości neutronów planuje się stosować zjawisko spalacji. W zjawisku tym jądra ciężkich pierwiastków, np. ołowiu, są bombardowane wiązką protonów o wysokiej energii, w wyniku czego ulegają wzbudzeniu. Jądra pozbywają się energii wzbudzenia, wyrzucając z siebie m.in. neutrony. Reaktor jądrowy oparty o tor jako paliwo jądrowe przygotowywany jest obecnie w Indiach.

W jeszcze bardziej odległej perspektywie czasowej można rozważać wykorzystanie reakcji termojądrowych do produkcji energii elektrycznej. Reakcje te mogą zachodzić jedynie w bardzo wysokich temperaturach. Przykładowa reakcja syntezy pomiędzy jądrami izotopów wodoru-2 (Deuteru) i wodoru-3 (Trytu) zachodzi wg schematu[32]:

$$D + T \rightarrow He\text{-}4 + n + 17{,}6\ MeV$$

Warto zaznaczyć, że w tej reakcji termojądrowej nie powstają w ogóle promieniotwórcze izotopy, a więc nie istnieje w tym przypadku problem odpadów promieniotwórczych.

Elektrownie jądrowe w Polsce

[32] J. Sobkowski, *Chemia radiacyjna…*, dz. cyt.

Pierwsze podejście Polski do energetyki jądrowej miało miejsce ok. 30 lat temu. Elektrownia jądrowa w Żarnowcu miała być pierwszym etapem programu energetyki jądrowej w Polsce, który obejmował wybudowanie kilku elektrowni i elektrociepłowni jądrowych. Decyzja dotycząca rozpoczęcia budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej i wykonania prac przygotowawczych zapadła już w 1971 roku, ale samą budowę rozpoczęto w roku 1982. Elektrownia miała się składać z czterech bloków energetycznych wyposażonych w ciśnieniowe reaktory wodne typu WWER-440 o mocy elektrycznej 440 MW każdy[33]. Reaktory zaprojektowane miały być w byłym ZSRR, a wyprodukowane w zakładach Skoda w byłej Czechosłowacji. Turbozespoły do reaktora miały być produkowane w Polsce przez Zakłady Zamech z Elbląga, a generatory przez Zakłady Dolmel z Wrocławia. Uruchomienie pierwszego bloku planowane było pierwotnie na rok 1989, a drugiego rok później. Jednak zmiany społeczno-polityczne, jakie zaszły w Polsce w roku 1989, a także długotrwałe protesty przeciwników budowy elektrowni oraz negatywny odbiór części społeczeństwa, który wystąpił zwłaszcza po awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu w roku 1986, spowodowały, że pod koniec 1990 roku Rada Ministrów postawiła inwestycję Elektrownia Jądrowa „Żarnowiec" – w budowie w stan likwidacji.

Jedyny obecnie działający w Polsce reaktor jądrowy to doświadczalny reaktor Maria o mocy cieplnej 30 MW[34]. Jego budowę rozpoczęto w roku 1970, a uruchomiony został cztery lata później w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku k. Otwocka. Jednak pierwszym reaktorem jądrowym w Polsce był doświadczalny reaktor Ewa, który pracował w Świerku w latach 1958–1995.

Pomysł powrotu do energetyki jądrowej w Polsce pojawił się oficjalnie w 2005 r., kiedy to Rada Ministrów RP przyjęła dokument *Polityka Energetyczna Polski do 2030 r.*[35] W dokumencie tym stwierdzono, że należy ponownie rozważyć możliwość budowy elektrowni atomowych oraz że z punktu widzenia polskiej elektroenergetyki wskazane byłoby oddanie do użytku w latach 2021–2025 dwóch elektrowni atomowych.

W 2007 roku powołano specjalną komisję sejmową ds. energetyki jądrowej. Jednocześnie Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (dziś Polska Grupa Energetyczna S.A.) podjęły wstępne prace opierające się na zebraniu i przeanalizowaniu starych opracowań oraz zweryfikowaniu ich przydatności dla aktualnych potrzeb. W styczniu 2009 r. Rada Ministrów RP przyjęła uchwałę o rozpoczęciu prac nad *Programem Polskiej Energetyki Jądrowej* oraz o powołaniu Pełnomocnika Rządu ds. Polskiej Energetyki Jądrowej[36]. Celem programu jest uruchomienie pierwszej elektrowni jądrowej w roku 2021. Głównym inwestorem będzie Polska Grupa Energetyczna S.A (PGE). Pełnomocnik Rządu sprawuje swoje obowiązki w randze wiceministra w Ministerstwie Gospodarki.

W lipcu 2009 roku Ministerstwo Gospodarki opracowało harmonogram działań dla energetyki jądrowej, natomiast w sierpniu 2010 roku skierowało do konsultacji międzyresortowych i konsultacji społecznych projekt programu polskiej energetyki jądrowej. Projekt ten

---

[33] Portal Gospodarczy „Wirtualny Nowy Przemysł": wnp.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

[34] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl, dostęp: 9 lutego 2014 r.

[35] Polska Norma PN/86/J80001: Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma. Obliczanie osłon stałych. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, www.pkn.pl, dostęp: 7 lutego 2014 r.

[36] Portal Gospodarczy „Wirtualny Nowy Przemysł": wnp.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

określa szczegółowy zakres oraz terminy realizacji czynności mających na celu uruchomienie w Polsce elektrowni jądrowej.

W grudniu 2009 roku PGE utworzyła spółkę-córkę o nazwie *PGE Energia Jądrowa*[37]. Firma ta zamierza utworzyć konsorcjum do budowy i eksploatacji pierwszych elektrowni jądrowych, w których będzie posiadać jako pakiet kontrolny 51% udziałów. Jako potencjalnych kandydatów do tego konsorcjum bierze się pod uwagę takie firmy jak:

– EDF (Francja),
– Vattenfall (Szwecja),
– Electrabel (Belgia),
– EON (Niemcy),
– CEZ (Czechy).

Spółka celowa do budowy pierwszej elektrowni została powołana w styczniu 2010, pod nazwą *EJ1 Sp. z.o.o*[38]. Zajmie się ona opracowaniem procesu inwestycyjnego, przeprowadzi badania lokalizacyjne oraz uzyska wszelkie niezbędne decyzje warunkujące budowę elektrowni jądrowej. Spółka odpowiada także za wybór partnerów, z którymi utworzy konsorcjum do budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce. PGE podpisało memoranda o współpracy z kilkoma dużymi firmami zajmującymi się projektowaniem, budową oraz eksploatacją elektrowni jądrowych; są to firmy: francuska EDF, amerykańsko-japońska GE Hitachi i amerykańska Westinghouse Electric Company.

Ministerstwo Gospodarki w roku 2010 przedstawiło listę potencjalnych lokalizacji elektrowni jądrowych. W kolejności alfabetycznej są to lokalizacje[39]:

1. Bełchatów, gmina Kleszczów, woj. łódzkie
2. Chełmno, gmina Chełmno, woj. kujawsko-pomorskie.
3. Choczewo, gmina Choczewo, woj. pomorskie.
4. Chotcza, gmina Chotcza, woj. mazowieckie.
5. Dębogóra, gmina Widuchowa, woj. zachodniopomorskie.
6. Gościeradów, gmina Gościeradów, woj. lubelskie.
7. Karolewo, gmina Nowy Duninów, woj. kujawsko-pomorskie.
8. Kopań, gmina Darłowo, woj. zachodniopomorskie.
9. Kozienice, gmina Kozienice, woj. mazowieckie.
10. Krzymów, gmina Chojna, woj. zachodniopomorskie.
11. Krzywiec, gmina Marianowo, woj. zachodniopomorskie.
12. Lisowo, gmina Marianowo, woj. zachodniopomorskie.
13. Lubatowo-Kopalino, gmina Choczewo, woj. pomorskie.
14. Małkinia, gmina Zaremby Kościelne, woj. mazowieckie.
15. Nieszawa, gmina Nieszawa, woj. kujawsko-pomorskie.
16. Nowe Miasto, gmina Nowe Miasto, woj. mazowieckie.
17. Pątnów, gmina Konin, woj. wielkopolskie.
18. Pniewo, gmina Gryfino, woj. zachodniopomorskie.
19. Pniewo-Krajnik, gmina Gryfino, woj. zachodniopomorskie.
20. Połaniec, gmina Połaniec, woj. świętokrzyskie.
21. Stepnica, gmina Stepnica, woj. zachodniopomorskie.

---

[37] Strona Spółki PGE EJ1: www.PGEEJ1.pl, dostęp: 5.02.2014.
[38] Tamże.
[39] Portal Gospodarczy „Wirtualny Nowy Przemysł": wnp.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.

22. Tczew, gmina Tczew, woj. pomorskie.
23. Warta-Klempicz, gmina Lubasz, woj. wielkopolskie.
24. Wiechowo, gmina Marianowo, woj. zachodniopomorskie.
25. Wyszków, gmina Zabrodzie, woj. mazowieckie.
26. Żarnowiec, gmina Krokowa, woj. pomorskie.

Do badań lokalizacyjnych i środowiskowych wybrano lokalizacje Choczewo i Żarnowiec (pozycje 3 i 26 z wykazu). Australijska firma WorleyParsons wygrała rozpisany przez spółkę PGE EJ1 przetarg na te badania oraz na usługi związane z uzyskaniem stosownych pozwoleń i uprawnień, niezbędnych w procesie inwestycyjnym budowy elektrowni jądrowych[40].

Prace przygotowawcze do budowy elektrowni jądrowej w Polsce już są opóźnione. Jednak pod koniec stycznia 2014 roku polski rząd przyjął do realizacji program polskiej energetyki jądrowej, który przygotowało Ministerstwo Gospodarki[41]. Harmonogram przewiduje ustalenie lokalizacji i zawarcie kontraktu na dostarczenie wybranej technologii do pierwszej elektrowni jądrowej do końca 2016 roku. Budowa pierwszego bloku energetycznego miałaby się rozpocząć w 2019 roku, a zakończyć pod koniec 2024 roku. Na drugą połowę przyszłej dekady przewidziano kontynuację budowy kolejnych bloków pierwszej elektrowni oraz rozpoczęcie budowy drugiej elektrowni, która miałaby zostać ukończona w roku 2035. W Choczewie występuje problem konfliktu z obszarem Natura 2000. Obszar ten znajduje się na potencjalnym terenie elektrowni. Natomiast w Żarnowcu niezbędna będzie budowa chłodni kominowych ze względu na ograniczoną ilość wody do chłodzenia. W tej sytuacji nie będzie potrzeby pobierania znacznych ilości wody morskiej z Bałtyku.

Koszty inwestycyjne budowy elektrowni jądrowych w naszym kraju będą wysokie. Ocenia się, że budowa pierwszego bloku energetycznego o mocy 1000 MW pochłonie ok. 50 mld zł. Do tego trzeba doliczyć koszty eksploatacyjne. Według francuskiego eksperta Herve Bernarda, zastępcy administratora generalnego francuskiego Komisariatu ds. Energii Atomowej i Alternatywnych Źródeł Energii, w cenie 1 kWh prądu elektrycznego z elektrowni atomowej nakłady inwestycyjne to 57%, koszty eksploatacyjne – 23%, a paliwo jądrowe – 20%. Do tego trzeba doliczyć jeszcze koszty likwidacji wyeksploatowanego bloku, które w przeliczeniu na 1000 MW zainstalowanej mocy wynoszą ok. 1,4 mld zł.

W związku z budową elektrowni atomowej w Polsce istnieje pilna potrzeba rozpoczęcia przez rząd RP szeroko zakrojonej kampanii informacyjnej mającej na celu uzyskanie poparcia dla tej inwestycji. Obecnie poziom poparcia nie jest wystarczający, by zyskać przychylność opinii publicznej w przewidywanym projekcie. Wynika to z kilku powodów, ale głównym źródłem braku poparcia jest niewystarczająca wiedza Polaków na temat działania elektrowni jądrowych oraz złe doświadczenia poważnych awarii elektrowni atomowych w Czarnobylu i Fukushimie.

Planowane uruchomienie elektrowni atomowych w Polsce wymagać będzie przygotowania odpowiedniej kadry, tj. ekspertów i pracowników dysponujących profesjonalną wiedzą i doświadczeniem w obsłudze tego typu obiektów. Przyszłą kadrę stanowić będą nie tylko osoby z wykształceniem technicznym, ale i reprezentanci takich zawodów jak mechanicy, spawacze, elektrycy, monterzy, a także kadry administracyjne (księgowość, zarządzanie, administracja, marketing, public relations, prawo). Poniżej podano główne specjalizacje,

---

[40] Portal Gospodarczy „Wirtualny Nowy Przemysł": wnp.pl, dostęp: 5 lutego 2014 r.
[41] Tamże.

których przedstawiciele będą potrzebni przy budowie i obsłudze jądrowych bloków energetycznych w Polsce:

– fizyka (specjalność: bezpieczeństwo jądrowe oraz ochrona radiologiczna),
– chemia (specjalności: chemia jądrowa, radiochemia),
– elektrotechnika,
– energetyka (specjalność: energetyka jądrowa),
– elektroenergetyka,
– ochrona środowiska,
– automatyka,
– elektronika,
– informatyka.

W ramach harmonogramu działań dla energetyki jądrowej zauważa się, że w Polsce w chwili obecnej nie ma odpowiednich kadr przygotowanych do realizacji zadań w zakresie energetyki jądrowej. Kierunki studiów związane z energetyką jądrową w Polsce pokazano w tabeli 5.

Tabela 5. Kierunki studiów w Polsce związane z energetyką jądrową

1. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie:
- Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, kierunek: fizyka techniczna; specjalność: fizyka jądrowa
- Międzywydziałowa Szkoła Energetyki, kierunek: energetyka; specjalność: zaawansowane technologie energetyczne

2. Konsorcjum „Kadry dla Energetyki Jądrowej i Technologii Jądrowej w przemyśle i medycynie" (UMCS w Lublinie, Politechnika Wrocławska i Uniwersytet Warszawski), Politechnika Wrocławska:
- Wydział Mechaniczno-Energetyczny, kierunek: energetyka; specjalność: budowa i eksploatacja systemów energetycznych

3. UMCS w Lublinie:
- Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, specjalność: bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna

4. Uniwersytet Warszawski:
- Wydziały Chemii i Fizyki, makro kierunek: Energetyka i Chemia Jądrowa,studia I stopnia od roku akademickiego 2011/2012, studia II stopnia odroku akademickiego 2012/2013.

5. Politechnika Gdańska:
- Międzywydziałowe studia na kierunku energetyka (Wydziały: Oceanotechnika i Okrętownictwo, Mechanika i Elektrotechnika i Automatyka)
- Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, kierunek: energetyka

6. Politechnika Krakowska:
- Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, kierunek: energetyka

7. Politechnika Łódzka:
- Wydział Mechaniczny, kierunek: energetyka

8. Politechnika Poznańska:
- Wydziały: Elektryczny, Technologii Chemicznej, Budownictwa Lądowego, Fizyki Technicznej, kierunek: energetyka; specjalność: energetyka jądrowa

9. Politechnika Śląska:
- Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, specjalność: inżynieria jądrowa

10. Politechnika Warszawska:
- Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa, kierunek: energetyka jądrowa.

Następnym poważnym problemem jest potrzeba dostosowania prawa w Polsce

do uruchomienia i eksploatacji elektrowni atomowych. Wynika to z faktu, że dotychczasowe prawo w tym zakresie tworzone było w czasach, kiedy energetyka atomowa nie była rozpatrywana z punktu widzenia procesu inwestycyjnego. Polskie prawo energetyczne powstało w czasach, kiedy nie myśleliśmy o energetyce atomowej. Mamy obecnie działającą od 2000 roku Ustawę – Prawo atomowe[42], która zawiera już pewne przepisy dotyczące składowania materiałów rozszczepialnych. W roku 2011 w związku z koniecznością transponowania do polskiego prawa przepisów Dyrektywy Rady 2009/71/Euratom z dnia 25 czerwca 2009 r.[43] oraz podjęciem prac nad programem energetyki jądrowej w Polsce została dokonana nowelizacja ustawy – Prawo atomowe.

Niezbędna jest jednak kompleksowa ustawa, która szczegółowo ureguluje cały proces inwestycyjny związany z budową elektrowni i ujmie konsekwencje tego procesu na bazie prawa. Ta regulacja prawna powinna więc zawierać takie zagadnienia jak: proces przygotowawczy, w tym decyzje i pozwolenia administracyjne, problematyka nabycia tytułu do nieruchomości, procedura wyboru partnerów do konsorcjum i wykonawcy inwestycji budowy pod klucz, a także zagadnienia podatkowe. Równie istotna kwestia to pozwolenia administracyjno-prawne dotyczące planowanej inwestycji. Zmiany legislacyjne dotyczyć będą również problematyki dozoru technicznego.

Aby w Polsce działały elektrownie jądrowe, musimy dysponować odpowiednimi zasobami paliwa uranowego lub je importować. W chwili obecnej nie jest czynna w Polsce żadna kopalnia uranu, posiadany jednak zasoby, których ewentualne wydobycie wraz ze wzrostem ceny tego surowca na światowym rynku mogłoby być opłacalne. Złoża rudy uranowej w Polsce zawierają od 0,025 do 0,11% uranu, podczas gdy dochodowe kopalnie wykorzystują rudę o koncentracji uranu wynoszącej 0,030%, a nawet 0,012%. W tabeli 6 podano zasoby rud uranowych w Polsce[44]. Warto zaznaczyć, że złoża rud uranu eksploatowane w latach 50-tych XX wieku w Kowarach zawierały 0,20% tego pierwiastka. Ocenia się, że Polska dysponuje w sumie zasobami ok. 100 tys. ton uranu. Jest to wystarczająca ilość surowca uranowego, aby uruchomić energetykę jądrową w Polsce.

Tabela 6. Zasoby rudy uranowej Polsce – stan na 2012 r.

Rejon	Zasoby uranu zidentyfikowane [tony]	Zasoby uranu prognozowane [tony]	Zawartość uranu w rudzie [%]
Rajsk (woj. podlaskie)	5320	88 850	0,0250
Okrzeszyn (woj. dolnośląskie)	940		0,0500–0,1100
Grzmiąca (woj. dolnośląskie)	790		0,0500
Wambierzyce (woj. dolnośląskie)	220	2 000	0,0236
Rejon Mierzei Wiślanej		10 000	b.d.
Razem	7270	100 000	

b.d. – brak danych

Źródło: Portal Energetyka Jądrowa: www.atom.edu.pl/, dostęp: 5 lutego 2014 r.

[42] Ustawa – Prawo atomowe z 2000 r. tj., Dz. U. z 2012 r. nr 0, poz. 264.

[43] Dyrektywa Rady nr 2009/7/Erratom ustanawiająca wspólnotowe ramy bezpieczeństwa jądrowego obiektów jądrowych, Dz. Urzędowy U. E. nr 2.7.2009.

[44] Portal Energetyka Jądrowa: www.atom.edu.pl/, dostęp: 5 lutego 2014 r.

Polskie złoża uranu należą wprawdzie do dość ubogich, ale niektóre z nich (Wambierzyce, Grzmiąca, Okrzeszyn) mają tę zaletę, że możliwa jest ich eksploatacja przez szereg lat. Złożami z rejonu Dolnego Śląska interesuje się australijska firma Wildhorse Energy specjalizująca się w poszukiwaniach i wydobyciu uranu. Należy zaznaczyć, że nawet gdyby Polska nie zdecydowała się na korzystanie z rodzimego uranu, to możliwy jest jego import z takich stabilnych politycznie krajów jak Kanada czy Australia.

Poważnym problemem, z jakim Polska musi się dodatkowo uporać, jeżeli chce uruchomić elektrownie jądrowe, są odpady promieniotwórcze, jakie powstają w wyniku pracy elektrowni. Miejscem składowania powstających w Polsce odpadów promieniotwórczych jest Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie[45]. Według klasyfikacji MAEA jest to składowisko powierzchniowe przeznaczone do ostatecznego składowania krótkożyciowych, nisko- i średnioaktywnych odpadów (o okresie połowicznego rozpadu zawartych w nich izotopów poniżej 30 lat) i zamkniętych źródeł promieniotwórczych. Składowisko w Różanie istnieje od 1961 roku i jest już nieomal całkowicie zapełnione. Dlatego należy zbudować nowe składowisko odpadów promieniotwórczych, w którym będzie można przechowywać odpady długożyciowe. Przygotowano już kilka potencjalnych rejonów, w których można by składować również odpady promieniotwórcze związane z reaktorami jądrowymi[46]:

- Łanięta (woj. łódzkie, powiat kutnowski),
- Damasławek (woj. wielkopolskie, powiat wągrowiecki),
- Kłodawa (woj. wielkopolskie, powiat kolski),
- Jarocin (woj. wielkopolskie, powiat jarociński),
- Pogorzel (woj. warmińsko-mazurskie, powiat gołdapski).

W Łaniętach, Damasławku i Kłodawie znajdują się wsady solne, które są najbardziej odpowiednie do umieszczania odpadów promieniotwórczych. W Jarocinie i Pogorzeli znajdują się pokłady iłowe, które również umożliwiają lokalizację w tym miejscu takiego obiektu.

Wreszcie należy zauważyć, że bez poparcia budowy elektrowni jądrowej przez polskie społeczeństwo trudno będzie rządowi zdecydować się na podjęcie decyzji o budowie elektrowni atomowych w naszym kraju. Niestety klimat dla budowy elektrowni jądrowej w Polsce po awarii elektrowni jądrowej w Fukushimie nie jest zbyt sprzyjający. I to pomimo że prawdopodobieństwo wystąpienia tsunami w Polsce jest znikome.

Podsumowanie

Energetyka jądrowa, tak jak pokazano w tym artykule, niesie ze sobą zarówno korzyści, jak i zagrożenia. Są kraje Unii Europejskiej, jak np. Francja, gdzie czynnych jest aż 58 jądrowych reaktorów energetycznych. Z drugiej strony w Polsce jak dotąd nie udało się wybudować ani jednej elektrowni jądrowej. Polska powinna zdecydować się na budowę dwóch elektrowni jądrowych. W tym artykule wykazano, że chociaż promieniotwórczość wiąże się z zagrożeniami, to jednak stosując odpowiednie systemy bezpieczeństwa, można nie obawiać się awarii jądrowych. Najtrudniejszym zadaniem dla władz warunkującym uruchomienie energetyki jądrowej w Polsce będzie przekonanie społeczeństwa do tego typu inwestycji.

---

[45] Międzynarodowa Agencja Energii Jądrowej, www.iaea.org – data wejścia 5.02.2014.
[46] Tamże.

Działania rządu RP w tym zakresie powinny się już dawno rozpocząć i być prowadzone w sposób profesjonalny.

Powyższy artykuł ma za zadanie pomóc przekonać społeczeństwo Polski do konieczności budowy elektrowni jądrowych w Polsce. Dalszy rozwój naszego kraju wiąże się z coraz większym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, a poleganie jedynie na węglu jako paliwie energetycznym, którego wykorzystywanie wiąże się ze znaczną emisją dwutlenku węgla, innych zanieczyszczeń gazowych oraz pyłów, jest bardzo ryzykowne.

Bibliografia

Curie E., *Maria Curie*, PWN, Warszawa 1958.

Dyrektywa Rady nr 2009/7/Erratom ustanawiająca wspólnotowe ramy bezpieczeństwa jądrowego obiektów jądrowych, Dz. Urzędowy U. E. nr 2.7.2009.

Electricity Information – IEA Statistics, OECD/IEA, Parys: www.iea.org.

Komunikat Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 15.04.2013 r. w sprawie sytuacji radiacyjnej kraju w I kwartale 2013 r., Monitor Polski z 2013 r., poz. 340.

Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, Różan: www.zuop.pl.

Międzynarodowa Agencja Energii Jądrowej, www.iaea.org.

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk: www.ncbj.gov.pl.

Polański A., *Izotopy w geologii*, Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa 1979.

Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku, Ministerstwo Gospodarki RP, 2009. Uchwała Rady Ministrów nr 202/2009: www.mg.gov.pl.

Polska Norma PN/86/J80001: Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma. Obliczanie osłon stałych. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, www.pkn.pl.

Portal dot. budowy elektrowni atomowej w Polsce: www.elektrownia-jadrowa.pl.

Portal Energetyka Jądrowa: www.atom.edu.pl/.

Portal Gospodarczy „Wirtualny Nowy Przemysł": wnp.pl.

Rozporządzenie Rady Ministrów z 2002 r. w sprawie stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych i placówek prowadzących pomiary skażeń promieniotwórczych, Dz. U. z 2002, nr 239, poz. 2030.

Rozporządzenie Rady Ministrów z 2005 r. w sprawie dopuszczalnych dawek granicznych promieniowania jonizującego, Dz. U. z 2005 r., nr 20, poz. 168.

Sobkowski J., *Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna*, Wyd. Adamanton, Warszawa 2009.

Sobkowski J., Jelińska-Kazimierczuk M., *Chemia jądrowa*, Wyd. Adamanton, Warszawa 2006.

Strona Państwowej Agencji Atomistyki, www.paa.gov.pl.

Strona Spółki PGE EJ1: www.PGEEJ1.pl.

Ustawa – Prawo atomowe z 2000 r. tj., Dz. U. z 2012 r. nr 0, poz. 264.

SUMMARY

Władysław Walkowiak, Katarzyna Sobianowska

Natural and artificial radioactivity - the benefits and risks of its use. Nuclear energy in Poland

The authors of this work have described natural radioactivity characterizing the occurrence of radioactive substances in the environment and their practical application. Artificial radioactivity was also described, including the nuclear fission of uranium-235 applied in the production of the atomic bomb and nuclear power reactors. Ionizing radiation and radiological protection against radiation was defined. Doses of ionizing radiation were discussed as well as the permissible dose limits in Poland. The contribution of energy fuels in the world and Polish electricity production indicating associated pollution was described. The paper shows the status and prospects of nuclear powers in the world. The most serious accidents of nuclear power reactors in the history were shown. Paper presents the preparations for the construction of nuclear power plants in Poland showing the potential locations, construction costs, the proposed technology and staff training issues.

Key words: natural and artificial radioactivity, nuclear energy, radiological protection, nuclear power plants in Poland.