eko atom

Kwartalnik popularno naukowy marzec 2014 nr 12

12

CZAS WYBORU

SKŁADOWISKA GEOLOGICZNE

NUCLEAR POWER FOR POLAND

REAKTORY PODKRYTYCZNE STEROWANE AKCELERATORAMI

PGE EJ 1 Sp. z o.o.

ISSN 2083-442X

Wyniki europejskiego testu wytrzymałościowego dla bloków MO - 34

W następstwie wypadków w elektrowni Fukushima Dai-ichi Rada Europy wystąpiła w dniach 24-25 marca 2011 r. z propozycją przeprowadzenia testów wytrzymałościowych (odpornościowych) we wszystkich europejskich elektrowniach jądrowych. Rada zaprosiła Europejską Grupę Dozorów Jądrowych (ENSREG - European Nuclear Safety Regulators Group), Komisję Europejską oraz Zachodnioeuropejskie Stowarzyszenie Regulatorów Jądrowych (WENRA - Western European Nuclear Regulators Association) do opracowania zakresu i sposobów wykonania testów wytrzymałościowych. Wstępne specyfikacje testów wytrzymałościowych WENRA naszkicowało w kwietniu 2011 r. W dniu 24 maja 2011 r. uzyskano zgodę ENSREG i Komisji Europejskiej na przeprowadzanie testów wytrzymałościowych, aczkolwiek format i zawartość sprawozdań końcowych zostały ustalone przez ENSREG znacznie później, bo dopiero w październiku 2011 r.

Jako główne tematy do dokonania przeglądu wyszczególniono naturalne zagrożenia, włącznie z trzęsieniami ziemi, tsunami i ekstremalnymi warunkami pogodowymi, utratę systemów bezpieczeństwa, a także zarządzania w sytuacji poważnego wypadku. Uzgodniono, że wszystkie elektrownie jądrowe posiadające bądź to ważną licencję na pracę, albo zezwolenie na budowę, będą poddawane testom wytrzymałościowym. Dlatego też bloki MO 34 - jako elektrownia w budowie - zostały włączone do testów wytrzymałościowych. Testy wytrzymałościowe w przypadku takich elektrowni bazują na dokumentacji projektowej.

Czytaj w numerze
13

Testy wytrzymałościowe oceniały te tematy w trzech etapach. Pierwszy etap wymagał, aby operatorzy dokonali oceny i przedstawili propozycje kierując się specyfikacją ENSREG [1]. W drugim etapie państwowe organy dozoru jądrowego miały opracować jeden narodowy raport z testów wytrzymałościowych, zawierający niezależny przegląd ocen operatorów oraz wydać dodatkowe wymagania, jeżeli byłoby to stosowne. W przypadku Słowacji istniały 3 sprawozdania opracowane przez firmę SE a.s. (Slovenske Elektrarne a.s.) jako organizację eksploatatora (dla EBO 34, dla EMO 12 oraz dla MO 34), które stworzyły podstawę do opracowania jednego raportu ogólnokrajowego

W TYM NUMERZE:

Wicepremier Piechociński o energetyce jądrowej	5
Tysiące miejsc pracy w czasach kryzysu	5
Otwarcie ofert w przetargu na Inżyniera Kontraktu	7
Trzy lata po katastrofie - co się dzieje w elektrowni jądrowej Fukushima	7
Andrzej G. Chmielewski Doświadczenia Europy, a polityka energetyczna Polski.	9
Krzysztof Wojciech Fornalski, Sięgając źródeł – czyli co w tym jądrze siedzi…	19
Jerzy Chmielewski Chińska energetyka jądrowa. Droga do wzrostu gospodarki i redukcji CO2	23
Jan Skladzień Problemy bezpieczeństwa energetyki jądrowej . Perspektywy jej rozwoju w Polsce	31
Maciej Lipka Postępowanie z wysokoaktywnymi odpadami promieniotwórczymi - głębokie składowiska geologiczne.	46
Piotr Darnowski Reaktory podkrytyczne sterowane akceleratorami	53
Nuclear Engineering International iMechE Marie (in English)	60

Do nabycia w sklepie internetowym

Szanowni Państwo,

Z satysfakcją prezentujemy dwunasty numer kwartalnika EKOATOM. Po blisko trzech latach ukazywania się czasopisma (pierwszy numer ukazał się w maju roku 2011) odnotowujemy jego wzrastającą popularność, czego potwierdzeniem czasopismo jest częstotliwość odwiedzania naszej strony. Potwierdzeniem popularno naukowej wartości czasopisma jest zarejestrowanie go przez Ministerstwo Nauki na swojej liście czasopism. EKOATOM jest również zarejestrowany w międzynarodowej bazie indeksowej - INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL o czym już informowaliśmy. .

Najważniejszym wydarzeniem w ostatnim czasie było przyjęcie przez Rząd Polskiego Programu Energetyki Jądrowej (PPEJ). Nawiązując do tej tematyki przedstawiamy bardzo ciekawe opracowanie A. G. Chmielewskiego „Doświadczenia Europy a polityka energetyczna Polski" w którym analizowany jest udział różnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w Polsce i w Europie. W opracowaniu wykorzystano oficjalne raporty rządowe Niemiec, Danii i Finlandii oraz przedstawiono informacje związane z wdrażaniem Polskiego Programu Energetyki Jądrowej (PPEJ), na tle podobnych, już istniejących i dalej rozwijanych programów w Czechach i na Słowacji.

W artykule J. Chmielewskiego przedstawiono jak powstaje energetyka jądrowa w Chinach. Zagadnienia związane z bezpieczeństwem i rozwojem energetyki jądrowej w Polsce omówiono w opracowaniu J. Składzienia.

W kwartalniku przedstawiamy również ciekawy materiał o mało znanych a obecnie rozwijających się reaktorach sterowanych akceleratorami (P. Darnowski) pozwalających lepiej wykorzystać paliwo jądrowe. Innym ważnym problemem związanym z energetyka jądrową jest budowa składowisk odpadów wysokoaktywnych przedstawiona w artykule M. Lipki.

Na interesujące pytanie **co w tym jądrze siedzi?** Stara się odpowiedzieć w swoim artykule K. Fornalski.

Zgodnie z sugestiami przekazanymi nam przez międzynarodowa bazę indeksową COPERNICUS by czasopismo o takim unikalnym przekroju tematycznym miało szerszy zasięg międzynarodowy zamieszczamy również przedruk wywiadu Willyego Dalrymple naczelnego redaktora Nuclear Engineering Innternational i proponujemy autorom przesyłanie tekstów w języku angielskim ze streszczeniem po polsku. Ambicją redakcji EKOATOM jest przedstawianie polskim czytelnikom (z różnym przygotowaniem zawodowym) najważniejszych osiągnięć w dziedzinie technik jądrowych najlepiej w języku polskim.

Jak już wspominano w poprzednich numerach postanowiono, by czasopismo było powszechnie dostępne w Internecie bez żadnych dodatkowych opłat ze strony czytelników.

Jednakże oszczędności budżetowe powodują znaczne spowolnienie programu promocji i mogą przyczynić się do zawieszenia lub zakończenia wydawania kwartalnika. Dlatego też zwracamy się ponownie 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.

K. Rzymkowski

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

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.

Wydawca
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

Wicepremier Piechociński o energetyce jądrowej

***Przyjęty Program polskiej energetyki jądrowej to pierwszy dokument, w którym pojawiły się zapisy dotyczące nowego polskiego miksu energetycznego. Znajdzie się w nim miejsce zarówno dla energetyki konwencjonalnej, OZE oraz atomu* - powiedział wicepremier, minister gospodarki Janusz Piechociński podczas konferencji prasowej poświeconej przyjętemu 28 stycznia 2014 r. przez Radę Ministrów Programowi polskiej energetyki jądrowej (PPEJ). Spotkanie odbyło się 29 stycznia 2014 r. w Ministerstwie Gospodarki.**

Wicepremier Piechociński przypomniał, że jednym z priorytetów jest zapewnienie Polsce i Polakom własną, tanią energię, która będzie fundamentem naszej konkurencyjności. – *Takie podejście gwarantuje nam rozwój przemysłu Jednak dla zaspokojenia rosnących potrzeb w zakresie konsumpcji energii elektrycznej konieczne będzie zwiększenie produkcji energii* – powiedział. – *Obok nowych wysokosprawnych elektrowni węglowych niezbędna będzie budowa mocy wytwórczych innego typu w tym również jądrowych. Moc zainstalowana w źródłach wytwórczych powinna wzrosnąć z ok. 33,5 tys. MW do ok. 44,5 tys. MW w 2030* – dodał. Przypomniał również, że do 2020 r. Polska musi obniżyć emisyjność energetyki o 20 proc., a Komisja Europejska dąży do dalszych radykalnych wzrostów tego celu. – *Uzasadnione jest zatem wprowadzenie do struktury źródeł wytwórczych zeroemisyjnego źródła jakim jest energetyka jądrowa* – zauważył.

Wiceminister Hanna Trojanowska wyjaśniła, że przyjęty wczoraj przez RM PPEJ to kompleksowy katalog działań jakie towarzyszyć będą przyszłym inwestycjom w sektorze. -*To także swoista „mapa drogowa" dla budowy i bezpiecznej eksploatacji elektrowni jądrowej* – dodała.

W spotkaniu wzięli również udział Janusz Włodarski prezes Państwowej Agencji Atomistyki, Marek Woszczyk prezes PGE S.A. i Aleksander Grad prezes PGE EJ 1 Sp. z o.o

Tysiące miejsc pracy w czasach kryzysu

Ponad 100 przedsiębiorstw ze wszystkich zakątków kraju zostało zaangażowanych w ten projekt.

W Słowacji podejmowana jest ogromna inwestycja, która stworzy miejsca pracy dla prawie 10,000 obywateli. Mowa jest o zakończeniu 3-go i 4-go. bloku Elektrowni Jądrowej "Mochovce".

Broszura EJ Mochovce ENG

Projekt ten, z budżetem przewyższającym 3 miliardy €, jest jedną z największych inwestycji w najnowszej historii tego kraju. Po jego zakończeniu elektrownia zaspokoi prawie połowę zapotrzebowania gospodarstw domowych i zatrudni tysiące innych ludzi w ciągu dziesięcioleci!

Budowa elektrowni Mochovce, którą rozpoczęto wtedy, kiedy cała gospodarka Słowacji była w stanie kryzysu, zmierza ku zakończeniu. Ważnym kamieniem milowym, jaki miał miejsce we wrześniu, jest budowa instalacji wodnościekowych i elementów składowych tak zwanego Systemu Wody Technicznej w niejądrowej części 3-go bloku elektrowni. Może to się wydawać zbyt skomplikowane, ale budowa elektrowni jądrowej nie jest prostą sprawą. Jana Burdová, rzeczniczka d/s dystrybucji mocy w przedsiębiorstwie Slovenské Elektrárne, powiedziała, że jest to kolejny krok mający na uwadze bezpieczeństwo przyszłej elektrowni. Mówiąc wprost, system ten ma zapewnić chłodzenie wszystkich kluczowych urządzeń w elektrowni, zarówno podczas codziennej pracy, jak również w przypadkach sytuacji zagrożeń. Oznacza to, że w razie trzęsienia ziemi lub jakiegoś wypadku, zostanie zabezpieczone odprowadzanie ciepła powyłączeniowego powstającego w reaktorze jądrowym. Nie trzeba się jednak bać takich wydarzeń, ponieważ elektrownia została tak zaprojektowana, aby wytrzymać nawet trzęsienie ziemi o sile nigdy nie zaobserwowanej na Słowacji. Potwierdziły to także badania Urzędu Dozoru Jądrowego,

jak i ogólnoeuropejskie testy wytrzymałościowe.

Pewność zatrudnienia

Przedstawiany projekt, unikalny w skali europejskiej, posiada wszelkie konieczne pozwolenia i jego wdrażanie wchodzi w fazę końcową. Jest to dobra wiadomość, ponieważ ponad 4,600 ludzi znajdzie pracę w tej nowej elektrowni. Oczekuje się, że przeciętne zarobki wyniosą €1,600 – co oznacza, że będą dwukrotnie wyższe od przeciętnej płacy na Słowacji. Ponad 81 % pracowników będą stanowili wysoko kwalifikowani eksperci, tacy jak profesjonalni informatycy, technicy i fizycy jądrowi. Po ukończeniu 3-go i 4-go bloku Mochovce zaspokoją prawie 48 % zapotrzebowania gospodarstw domowych na energię elektryczną. Tym sposobem będzie to niewątpliwie najważniejsze źródło energii elektrycznej na Słowacji. Poza uzyskaniem stabilnego i bezpiecznego źródła energii, Słowacja stanie się tym sposobem ponownie eksporterem energii. Taką pozycję utracono po zamknięciu elektrowni V1 w Jaslovskich Bohunicach, bo zostało to obiecane podczas przystępowania do Unii Europejskiej.

Udało się nawet obejść bez bodźców i subwencji

Duże projekty inwestycyjne często opierają się na różnych bodźcach, subwencjach państwowych, czy też ulgach podatkowych. To z kolei napotyka na krytykę ze strony mediów, jak też krajowych przedsiębiorców małej i średniej wielkości, którzy domagają się takich samych warunków dla wszystkich. Dlatego zaskakującym może być uświadomienie sobie tego, że inwestycja o kluczowym znaczeniu, jaką jest zakończenie budowy elektrowni jądrowej, może odbywać się bez takiego poparcia. Nowe bloki są budowane całkowicie w ramach własnych zasobów przedsiębiorstwa Slovenské Elektrárne. Oznacza to, że inwestowanie nie stanowi żadnego obciążenia dla finansów publicznych. Przeciwnie, zarówno budżet państwa, jak i słowaccy przedsiębiorcy odniosą korzyści z tego projektu.

Państwo też skorzysta

Słowacki przemysł energetyki jądrowej stał się, po przemyśle motoryzacyjnym, kolejnym ważnym filarem gospodarki, głównie dzięki stworzeniu znacznej ilości stanowisk pracy. Eksperci firmy konsultingowej BDO obliczyli, że od każdego Euro zainwestowanego w elektrownię jądrową w Mochovcu, do gospodarki wróci €2.36. W jaki sposób? Przez wypłatę zarobków, inwestowanie w dostawców, ich przychody po wykonaniu prac oraz udziały słowackich przedsiębiorstw w całość inwestycji. Tym sposobem w ciągu siedmiu lat realizacji projektu gospodarka Słowacji będzie mogła wzrosnąć o około €5.2 milionów. Budżet państwa będzie mógł uzyskać około pół miliarda euro tylko w samych podatkach i opłatach.

Pracuj dla domowych przedsiębiorców

Przedsiębiorstwo Slovenské Elektárne buduje elektrownię korzystając z pomocy możliwie największej ilość słowackich dostawców. Tym sposobem ponad połowa wszystkich zamówień trafiła do dostawców krajowych. Ponad 100 przedsiębiorstw ze wszystkich zakątków kraju jest zaangażowanych w ten projekt, włączając w to regiony o najwyższymi stopniu bezrobocia. Przedsiębiorstwa te zatrudniają tysiące ludzi o różnych zawodach, włączając w to budowniczych, spawaczy, inżynierów budownictwa lądowego, majstrów, specjalistów od logistyki, techników i administratorów systemów informatycznych. A zatem pojawiło się ogółem prawie 10,000 stanowisk pracy, w tym ponad 3,650 zostało utworzonych bezpośrednio na miejscu budowy, a około 6,000 jest zaangażowanych w inną działalność towarzyszącą. Nad tym projektem wraz z przedsiębiorstwami słowackimi pracują również firmy czeskie, włoskie, niemieckie, francuskie, rosyjskie i brytyjskie. W takim międzynarodowym zespole poziom doświadczenia, jak również dostęp do najnowocześniejszych technologii, zwiększa umiejętności przemysłowe i poziom edukacji w ramach tego projektu. Eksperci mówią, że w Słowacji ponownie zaistniała dobrze działająca sieć przedsiębiorstw, które są w stanie świadczyć usługi na najwyższym poziomie jakości, – co w przypadku sektora energetyki jądrowej jest koniecznością. Ponadto firmy te w przeszłości osiągały sukcesy w podobnych projektach zarówno w kraju jak i za granicą.

Czy wiedziałeś to? Energia atomowa = czyste powietrze

Nowa elektrownia pomoże również chronić środowisko naturalne Słowacji. Jakim sposobem? Otóż w przeciwieństwie do elektrowni,

które spalają paliwa kopalne, elektrownie jądrowe nie emitują do atmosfery żadnych toksycznych gazów cieplarnianych. Eksperci obliczyli, że bez wykorzystywania energii jądrowej, emisja dwutlenku węgla w Unii Europejskiej byłaby o dwie trzecie wyższa. Wytwarzanie energii "czystej" z punktu widzenia środowiska naturalnego jest również częścią biznesowej filozofii Grupy Enel, która jest większościowym właścicielem przedsiębiorstwa Slovenské Elektrárne. W ostatnim roku wyprodukowało ono 89 procent energii elektrycznej bez emisji CO_2 , natomiast kiedy Mohovcach zostaną ukończone bloki 3. i 4, to ten udział wyniesie więcej niż 93 %. Innymi słowy, ta nowa elektrownia jądrowa zapobiegnie emisji 7.5 milionów ton CO_2 rocznie. Można to dalej zostać zilustrować faktem, że neutralizacja 7.5 miliona ton emisji CO_2 wymagałaby 344,162 drzew.

Na podstawie :
http://www.seas.sk/en/power-plants/fuel-type/nuclear/mochovce-npp

PGE EJ 1 Sp. z o.o.

Otwarcie ofert w przetargu na Inżyniera Kontraktu

W dniu 17.02.2014 r. czterech Wykonawców złożyło oferty w przetargu publicznym na Inżyniera Kontraktu, realizowanym przez PGE EJ 1 sp. z o.o.

W prowadzonym przez PGE EJ 1 sp. z o.o. w trybie negocjacji z ogłoszeniem przetargu publicznym pn. „Świadczenie przez Doradcę Technicznego (ang. Owner's Engineer) usług doradztwa technicznego w procesie inwestycyjnym związanym z budową przez PGE EJ 1 Sp. z o.o. pierwszej polskiej elektrowni jądrowej o mocy ok. 3000 MW", w dniu 17 lutego 2014 r. oferty złożyło czterech Wykonawców:

- *AMEC Nuclear UK Ltd;*
- *Exelon Generation Company, LLC;*
- *Konsorcjum firm: Mott MacDonald Limited, AF-Consult Ltd.;*
- *Konsorcjum firm: URS Polska sp. z o.o. Tractebel Engineering S.A.*

Komisja przetargowa przystąpiła do badania i oceny złożonych ofert. Spółka planuje wybór Wykonawcy w przedmiotowym postępowaniu w III kwartale br. Inżynier Kontraktu stanowić będzie integralną część organizacji Inwestora (PGE EJ 1) wspierając go w przygotowaniu i realizacji projektu budowy elektrowni jądrowej. Wybrany wykonawca wspierać będzie Spółkę w realizacji zadań i wypełnianiu obowiązków w stosunku do dostawcy technologii reaktora/głównego wykonawcy EPC (Engineering Procurement Construction) oraz pozostałych wykonawców kluczowych prac.

Zakres prac przewiduje cztery główne obszary współpracy:

- *udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu postępowania zintegrowanego, w szczególności w zakresie wyboru dostawcy technologii reaktora oraz głównego wykonawcy EPC,*
- *zarządzanie projektem, jakością i bezpieczeństwem oraz rozwój kompetencji własnych Inwestora,*
- *nadzór nad realizacją inwestycji oraz uzyskiwanie wymaganych zezwoleń (m.in. dozoru jądrowego) i pozwoleń,*
- *zarządzanie łańcuchem dostaw i kontraktami.*

wnp.pl PORTAL GOSPODARCZY

Trzy lata po katastrofie - co się dzieje w elektrowni jądrowej Fukushima

11 marca 2014 r. mijają trzy lata od awarii w elektrowni jądrowej Fukushima. Obecnie Japonia zamierza zdywersyfikować miks energetyczny poprzez większy udział paliw kopalnych, możliwe jest także uruchomienie wyłączonych elektrowni jądrowych - wynika z opracowania przygotowanego przez polskie Ministerstwo Gospodarki.

11 marca 2011 r. wywołane trzęsieniem ziemi 15 metrowe tsunami zniszczyło systemy zasilania i chłodzenia w trzech reaktorach elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi. W ciągu pierwszych trzech dni znacznemu stopieniu uległy rdzenie w tych reaktorach. Kolejno nastąpiły eksplozje wywołane wybuchem wodoru nagromadzonym w reaktorach, które doprowadziły do zniszczenia budynków czterech reaktorów i spowodowały uwolnienie substancji radioaktywnych do otoczenia.

Awarii nadano najwyższy poziom w 7-stopniowej skali INES, z powodu znacznego uwolnienia materiałów promieniotwórczych, jakie nastąpiło w ciągu pierwszych 4-6 dni, w sumie ok. 940 PBq (Peta = biliard, 1015) - to ok. 10 proc. uwolnienia w Czarnobylu. W wyniku następstw i zniszczeń cztery reaktory wyłączono całkowicie. Po dwóch tygodniach ustabilizowano temperaturę w trzech zniszczonych reaktorach za pomocą zewnętrznego zasilania w wodę. W grudniu 2011 r. uzyskano stan zimnego wyłączenia reaktorów.

Elektrownia Fukushima I.
Zdj. KEI, Creative Common

Głównym problemem i zadaniem, które wymaga ciągłego doskonalenia jest zapobieganie dalszym uwolnieniom substancji radioaktywnych, szczególnie wycieku skażonej wody służącej do chłodzenia reaktorów i wypalonego paliwa. Nie stwierdzono przypadków zgonu ani choroby popromiennej wywołanych awarią. Ponad 100 tysięcy ludzi zostało wyewakuowanych ze 20 km strefy do wokół elektrowni.

Sytuacja w Fukushimie

Efekt rozcieńczenia skażonej wody, która przedostała się do oceanu, wywołany prądami morskimi powoduje, że nie odnotowuje się skażeń wody oceanicznej. Skażenie występuje na dnie oceanu w bezpośredniej bliskości zniszczonej elektrowni. Materiał promieniotwórczy przedostaje się wraz z wodą ściekającą z gór do morza i można odnotować jego obecność w niektórych gatunkach ryb. Cała żywność z rejonów dotkniętych awarią podlega ciągłej kontroli i jest niedopuszczana do sprzedaży w przypadku przekroczenia dopuszczalnych poziomów wprowadzonych w 2012 r.

Na terenie elektrowni zbudowano zakład oczyszczania wody chłodzącej oraz zbiornik o dużej pojemności do przetrzymywania skażonej wody i powstrzymywania jej wydostawaniu się do otoczenia. Utrzymywanie wody w zbiornikach stanowi obecnie największy problem techniczny dla operatora elektrowni. Stwierdzone skażenie wód głębinowych w rejonie elektrowni mogło zostać spowodowane mieszaniem się wody spływającej z gór ze skażoną wodą zalegającą fundamenty zniszczonych reaktorów. W celu zapobieżenia przedostawania się skażonej wody do oceanu pobudowano specjalne zapory w gruncie.

wnp.pl | PORTAL GOSPODARCZY

Jarosław Kaczyński o elektrowni jądrowej w Gąskach: to głupota

Ponad pół tysiąca osób wysłuchało w niedzielę w Koszalinie (Zachodniopomorskie) wystąpienia prezesa PiS Jarosława Kaczyńskiego, który m.in odniósł się do ewentualnej lokalizacji elektrowni jądrowej w Gąskach. "To głupota" - ocenił.

Kwestii ulokowania elektrowni w położonych nad Bałtykiem Gąskach, które znajdują w gminie Mielno, w powiecie koszalińskim, poświęcone było jedno z pytań zadanych liderowi PiS z sali.

Chodziło o utrzymanie w mocy na początku marca br. przez Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju decyzji wojewody zachodniopomorskiego z czerwca 2013 r. zezwalającej spółce PGE EJ1 na przeprowadzenie w Gąskach badań lokalizacyjnych. Decyzję wojewody m.in. zaskarżyła gmina Mielno.

"Tutaj są tereny turystyczne, jest morze. Nie ma żadnych przesłanek, żeby tutaj umieszczać elektrownię" - powiedział Kaczyński.

Jak dodał, nie ukrywa, iż jest zwolennikiem energii jądrowej i jeśli dojdzie do zapowiadanego przez PiS ogólnopolskiego referendum w tej sprawie, będzie namawiał Polaków do głosowania "za".

"Kto prowadzi kampanię przeciwko elektrowniom atomowym? Ci, którzy zarabiają na innych paliwach. To jest kampania odwołująca się do skojarzenia: elektrownia atomowa - bomba atomowa. W ten sposób bardzo łatwo ludzi przekonać. Tak naprawdę we Francji są tylko elektrownie atomowe i od dziesięcioleci nic się tam złego nie stało. Tutaj nie przesadzajmy. Polska powinna mieć wysokie technologie" - powiedział Kaczyński.

pap

Graf. PTWP

Doświadczenia Europy, a polityka energetyczna Polski

Andrzej G. Chmielewski [1,2]

Streszczenie

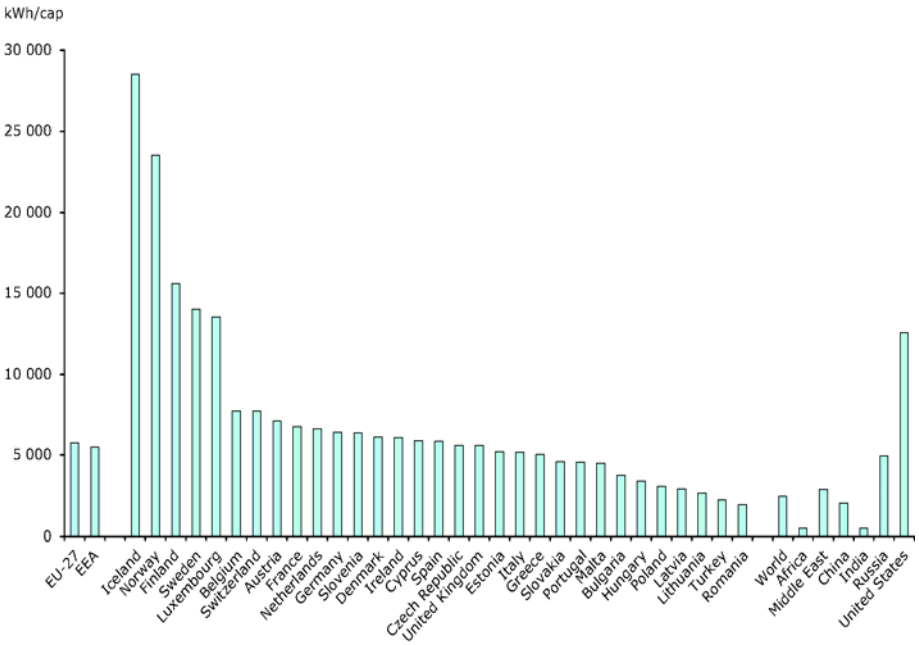
W artykule analizowane jest zagadnienie dotyczące udziału różnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w Polsce i w Europie. Rezultaty wdrożenia niskowęglowej polityki EU w najbardziej rozwiniętych krajach kontynentu dostarczyły już wiele danych eksperymentalnych pozwalających na ocenę poprawności tej strategii. W niniejszym opracowaniu analizy oficjalnych rządowych raportów sporządzanych dla Niemiec, Danii i Finlandii, zostały wykorzystane dla przeprowadzenia takiej oceny. Technologie spalania niestety będą głównym źródłem energii jeszcze przez wiele lat. Krótko też omówiono wpływ energetyki wykorzystującej procesy spalania na środowisko. W końcowej części pracy przedstawiono informacje związane z wdrażaniem Polskiego Programu Energetyki Jądrowej (PPEJ), na tle podobnych, już istniejących i dalej rozwijanych programów w Czechach i na Słowacji.

Summary

The question concerning the share of various ways to produce electric energy in Poland and in Europe is analysed in this article. Results of "low-carbon" EU policy implementation in the most developed countries on the continent have already provided significant amount of experimental data, which enable evaluation of correctness of such strategy. Analysis of the official government reports, prepared for Germany, Denmark and Finland, was used to carry out such evaluation in the herein presented study. Technologies relying on combustion will constitute, alas, the main energy source for a very long time. Influence on the environment of the power industry, utilising combustion processes, is also discussed briefly. Final part of the article presents information concerning implementation of the Polish Nuclear Energy Programme "PPEJ" (Polski Program Energetyki Jądrowej), against the background of similar, already existing and further developing programmes in Czech Republic, as well as in Slovakia.

1. Wstęp.

Polityka energetyczna jest jednym z najważniejszych zagadnień dotyczących technologicznego oraz społecznego rozwoju wszystkich krajów i struktur geopolitycznych takich jak Unia Europejska. UE jest zdecydowana do roku 2050 zredukować emisję ditlenku węgla o 95% względem poziomu z roku 1990. Komisja przeanalizowała skutki tej polityki w dokumencie "Mapa drogowa wdrażania konkurencyjnej niskowęglowej gospodarki w roku 2050" ("Roadmap for moving to a competitive low - carbon economy in 2050"). Scenariusze zawarte w tym opracowaniu analizują różne możliwości obniżenia emisji ditlenku węgla w systemach energetycznych. Przygotowanie długoterminoweych prognoz jest bardzo trudne, z uwagi na fakt, że przyjęte rozwiązania są obciążone krótkowzrocznymi interesami natury politycznej i rozwiązaniami czysto biznesowymi dążącymi do maksymalizacji zysku. Eksperyment dotyczący wdrażania zawartej w mapie drogowej polityki energetycznej, już został podjęty przez najbogatsze i najbardziej technologicznie rozwinięte kraje Europy, takie jak Niemcy, czy też Dania. Rezultaty tego eksperymentu wyraźnie wskazują na popełnione błędy i uzyskane doświadczenie powinno zostać wykorzystane w działaniach innych krajów, w tym Polski. Inaczej trudno będzie mówić o świetlanym gospodarczo – społecznym rozwoju naszego regionu. Związane jest to z faktem, że sektor energetyczny wytwarzający elektryczność dla odbiorców przemysłowych i prywatnych jest kręgosłupem obecnej gospodarki rynkowej, od rozwoju której zależy dobrobyt oraz zdrowie narodów. Decydującą role w rozwoju tego sektora stanowi budowa i eksploatacja



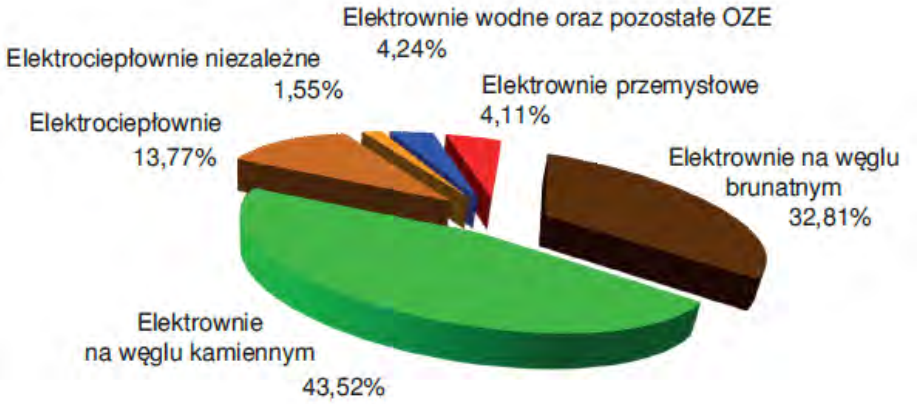
Rys.1.Zużycie energii elektrycznej per capita w różnych krajach (EEA, 2008).

Sektor	2015	2020	2025	2030
Przemysł	19.0	20.9	23.0	24.0
Transport	16.5	18.7	21.2	23.3
Rolnictwo	4.9	5.0	4.5	4.2
Usługi	7.7	8.8	10.7	12.8
Gospodarstwa domowe	19.1	19.4	19.9	20.1
Ogółem	67.3	72.7	79.3	84.4

Tabela 1. Przewidywane zapotrzebowanie sektorów gospodarki na energię [Mtoe] (MG, 2009).

Elektrownie + EC (Węgiel kamienny)	56 %
Elektrownie (Wegiel brunatny)	26 %
Elektrownie (Gaz ziemny)	2 %
Elektrownie wodne	6 %
OZE (biomasa + wiatr)	7 %
Inne	3 %

Tabela 2.Struktura wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach zawodowych w Polsce, z uwagi na wykorzystywane paliwo, moc zainstalowana, listopad 2011 (KOBiZE, 2013).



Rys.2.Struktura produkcji energii elektrycznej 2011 (Gabryś, 2012).

bloków energetycznych o mocy 500 MW_e i większych. W roku 2050 80% ludzkości będzie żyło w wielkich metropoliach i marzenie o dużej roli rozproszonych źródeł energii w zaspokajaniu potrzeb ludzkości na elektryczność, pozostanie tylko ułudą. Nie tylko ze względu na ekonomikę tego przedsięwzięcia , ale i na tragiczne skutki takich działań dla środowiska. Niestety polityka energetyczna jest kreowana przez polityków i biznes szybkiego zwrotu nakładów. Patrząc na pewne propozycje , można stwierdzić, że prawa termodynamiki przestały obowiązywać, a idea rozwoju zrównoważonego, staje się sloganem pomagającym wygrać wybory.

Zanieczyszczenie	SO_2	NO_x	PM 2.5	VOC	PAH & PCB [kg]	Hg [kg]	Dioksyny &Furany [mg i-TEQ]
[Mg]	509 847	287 324	14 337	18 257	578	8 771	11 446

Tabela 3. Emisja zanieczyszczeń atmosferycznych z energetyki w Polsce w 2010 (EEA, 2012).

2. Polski sektor energetyczny.

Polska jest, mimo kryzysu, rozwijającą się ekonomią Europy. Wynika to raczej z faktu dużego zapóźnienia w jej rozwoju gospodarczym. Zużycie energii elektrycznej „per capita" jest znacznie niższe od notowanego w „starych" krajach UE, co przedstawia Rys.1 (EEA, 2008), co jest jednym z wskaźników tego opóźnienia. Tak niskie wykorzystanie energii elektrycznej w przemyśle i życiu codziennym jest jedną z przyczyn niekorzystnie wpływających na rozwój ekonomiczny kraju i dobrobyt jego mieszkańców. Dlatego też przewidywany jest dalszy wzrost zapotrzebowania na dostawy energii, w wysokości zilustrowanej przez dane podane w Tabeli 1(MG, 2009). Głównym pierwotnym źródłem energii w Polsce jest spalanie paliw kopalnych. Wśród nich najważniejsza rolę odgrywa węgiel brunatny i kamienny, pokrywający w 56 % nasze potrzeby i który przez długie lata utrzyma swą dominującą pozycję w zabezpieczeniu potrzeb energetycznych kraju. Należy jednak wspomnieć, że mimo faktu, że Polska jest dużym producentem węgla kamiennego import tego paliwa rośnie z roku na rok i tak wynosił on 1,05 Mtoe w roku 1995 a w roku 2010 osiągnął już ekwiwalent 8,16 Mtoe. W roku 2008, po raz pierwszy w historii, import przekroczył eksport i wyniósł ok. 10,1 milion ton (Olkuski, 2010). Ropa naftowa też odgrywa znacząca rolę, zaspokajając 25 % ogólnego zapotrzebowania naszego kraju na energię. Najgorsza sytuacja, jeśli chodzi o mix energetyczny, panuje w elektroenergetyce w której prawie 90% procesów wytwarzania energii elektrycznej jest oparte o procesy spalania węgla, gazu i biomasy, Tabela 2 (KOBiZE, 2013).

Paliwa kopalne	Jądrowa	Drewno, odpady	Śmieci	Odpady przem	Biopaliwa ciekłe	Biogaz	Hydro	Wiatr	FV	Geo-ttermia	Pływy oceanów	Inne
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
* 54.0	15,4	1,6	0,7	0,1	0,1	0,6	16,7	8,7	1,9	0,1	0,0	0,1
**50.9	27,7	20,9 (OZE)										0,8

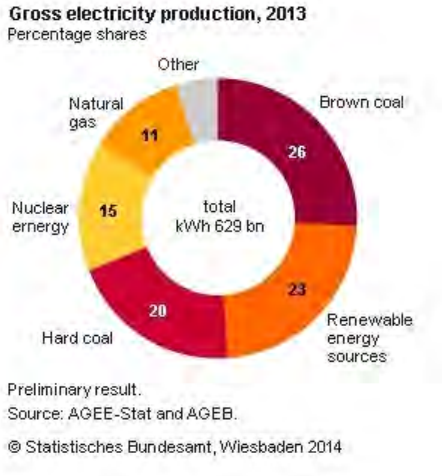
Tabela 4. Moc zainstalowana* i wytworzona** w EU-27 w odniesieniu do źródła [%].

Ograniczenie emisji zanieczyszczeń powoduje, że technologie produkcji energii elektrycznej stają się coraz bardziej kosztowne. Nowe przepisy Unii Europejskiej, które zaczną obowiązywać w Polsce od roku 2016, będą dotyczyły również małych jednostek energetycznych. Poza SO_2, NO_x, pyłem ogólnym, emisja takich zanieczyszczeń jak węglowodory, rtęć i pyły o małych rozmiarach cząstek tzw. PM 2.5 musi być w przyszłości ograniczona. Wszystkie te zanieczyszczenia są szkodliwe dla środowiska i zdrowia ludzkiego. W związku z wysokimi stężeniami PM2.5 w powietrzu statystyczny czas życia ludzkiego jest skrócony , w niektórych regionach, nawet o trzy lata (EEA, 2012). Emisja rtęci w procesach spalania wynosi w Europie ok 20 ton rocznie. W postaci związków metaloorganicznych ten szkodliwy dla zdrowia pierwiastek wbudowuje się w łańcuch pokarmowy człowieka (Weem, 2011). Ponadto w procesach spalania są emitowane, również inne niż metan, związki organiczne, w tym wielopierścieniowe kancerogenne dioksyny i furany (Safe, 1998). Wszystko wskazuje też na to , że Polska w roku 2020 będzie musiała kupować 100% certyfikatów związanych z emisją CO_2 (EEA, 2012), mało prawdopodobne żeby sekwestracja tego gazu kiedykolwiek miała sens ekonomiczny i techniczny.

3. Europa-nauka z odrobionych lekcji.

Europa marzy o technologiach wytwarzania energii elektrycznej wolnych od emisji ditlenku węgla, niestety marzenie to nie zostanie spełnione w tym wieku. Tragedią mieszkańców naszego

kontynentu jest to, że marzenia kosztują zbyt wiele. Udział poszczególnych źródeł w wytwarzaniu energii elektrycznej jest przedstawiony w Tabeli 4 (EU, 2012). Z tabeli tej wynika, że moc zainstalowana w źródłach opartych o spalanie paliw wynosi 57,1 %, w tym spalanie drewna , odpadów komunalnych, biogazu i biopaliw jest zaliczone do OZE. Trudno jednak jakikolwiek proces technologiczny oparty o spalanie , uznać za przyjazny środowisku. Cherubini i inni stwierdzają, że emisja CO_2 ze spalania biomasy nie może być dalej wyłączana z LCA (Life Cycle Assessment) lub winna być uznana za mająca taki sam wpływ na ocieplenie klimatyczne jak



Rys.3.Udział poszczególnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w Niemczech, w 2013 roku (DESTATIS, 2013).

ditlenek węgla pochodzenia antropogenicznego (Cherubini, 2012). Stąd moc zainstalowana bezemisyjnych OZE (hydro, wiatr, fotowoltaika i geotermia) wynosi 27,4 % , a w rzeczywistości w tym dziale odgrywają znaczenie jedynie hydro (16,7 %) i wiatr (8,7%). Problem jest dobrze zrozumiany przez autorów cytowanego dokumentu, bo już w rubryce dotyczącej udziału rocznego w wytwarzaniu (generacji) energii elektrycznej dla OZE podają jedynie ich globalny udział, bez podziału na źródła. 78,3 % energii elektrycznej wytwarzanej w EU – 27 w roku 2010 pochodziło ze spalania paliw kopalnych i energetyki jądrowej. Niestety z tego udziału 23,6% było związane ze spalaniem gazu, którego spalanie w dużych blokach energetycznych nie ma nic wspólnego z rozwojem zrównoważonym, surowiec ten powinien być zachowany dla przemysłu chemicznego, napędu pojazdów mechanicznych i opalania pieców domowych oraz bloków energetycznych na obszarach chronionych. Praktykowane obecnie użycie tego węglowodoru dla potrzeb wielkiej energetyki jest przestępstwem wobec przyszłych pokoleń.

Mówi się, że w Europie dwa kraje, Dania i Niemcy, są liderami w wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Czy tak jest naprawdę ? W Danii w roku 2011 39,7% energii elektrycznej było wytwarzane ze spalania węgla a 16,5 % ze spalania gazu. Spalanie ropy naftowej i odpadów komunalnych to dalsze 1,3% i 2,2% . Dalej wiatr 28,1%, oraz znowu spalanie słomy 2,2%, drewna 6,6%, odpadów 2,7% i biogazu 1,0%; energia słoneczna i wodna 0,0% (DEA, 2012). W Niemczech produkcja energii elektrycznej opierała się o spalanie węgla kamiennego – 19%, węgla brunatnego – 25% i gazu – 14%, energia jądrowa – 18%, olej opałowy & elektrownie szczytowo - pompowe 5%, wiatr 8%, spalanie biomasy 5%, hydro 3%, fotowoltaika 3%, organiczne odpady domowe 1%. Rocznie pełne wykorzystanie mocy zainstalowanej w Niemczech, w roku 2010 wynosiło; fotowoltaika 900 h, elektrownie pompowo szczytowe 1 100 h, opalane ropą 1 210 h, wiatr 1 380 h, gaz naturalny 3 180 h, hydroelektrownie (tamy spiętrzające i przepływowe) 3 820 h, węgiel kamienny 3 870 h, biomasa 6 400 h, węgiel brunatny 6 600 h, energetyka jądrowa 7 330 h (BMWi). Rząd Niemieckiej Republiki Federalnej planuje, że OZE będzie w roku 2030 głównym źródłem energii elektrycznej (58%), z dominującym udziałem energii wiatrowej sięgającym 30,6%. Znaczy to , że dostawy energii elektrycznej z turbin wiatrowych wzrosną w najbliższych latach trzykrotnie, podczas gdy z fotowoltaiki dwukrotnie. Dostawy z elektrowni wodnej wzrosną o 35,8% aby osiągnąć 5,2% ogólnych dostaw. Użycie biopaliw wzrośnie o 39,1 % tak by stanowić 13,3 % tego miksu energetycznego. Energetyczne spalanie gazu naturalnego też wzrośnie w tym okresie osiągając 22,6% wartości ogólnej. Jak wynika z danych dla roku 2013 , 15,4 % energii elektrycznej wytwarzały elektrownie jądrowe (22,2 % dla roku 2010). W tym samym czasie udział OZE wzrósł z 16.6% do 23.4% . Elektrownie wiatrowe były najważniejszym dostawcą energii elektrycznej dostarczyły bowiem 7,9% całkowitej produkcji. Więcej od jednej czwartej (25,8%) energii elektrycznej było produkowane w elektrowniach opalanych węglem brunatnym. W odniesieniu do roku 2010 udział ten wzrósł o 2,8 % (2010: 23,0%) (Rys.3).

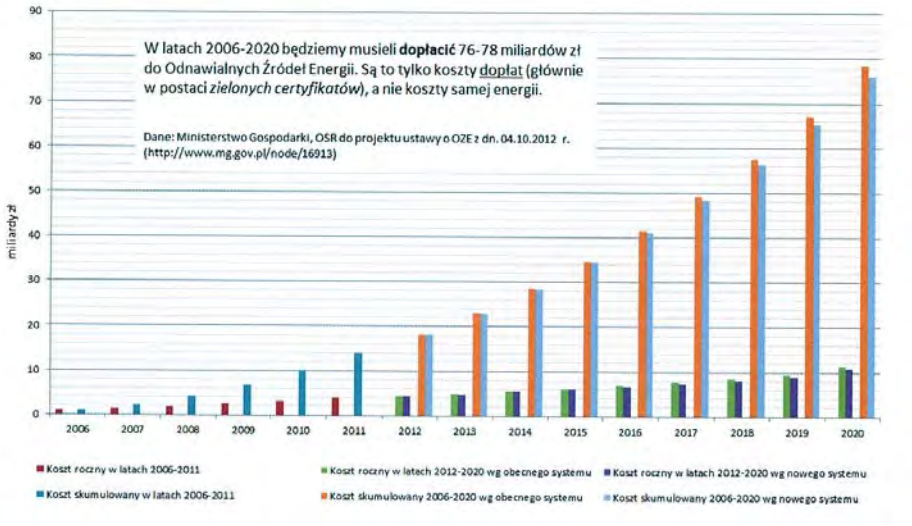
Tak więc spalanie węgla brunatnego pozostało główną podstawą działania energetyki w tym kraju. Czy zatem spełnią się wcześniej przyjęte plany, zakładające, że elektrownie oparte o spalanie węgla będą wytwarzały mniej niż 20% energii elektrycznej , a energetyka jądrowa zostanie wyeliminowana z miksu do roku 2022 (OECD/ IEA - Germany, 2013) ?. Podane dla roku 2010 dane, potwierdzają podaną w raporcie tezę, że bezpieczeństwo energetyczne tego kraju będzie wymagało utrzymania dobrych relacji importowo – eksportowych z sąsiadami, ponieważ elektrownie wiatrowe przy ich dostępności nie przekraczającej 1400 godzin rocznie nie zapewnią ciągłych dostaw energii elektrycznej. Mimo wszelkich tych działań technologie oparte o spalanie paliw będą pokrywały 56 % (węgiel 20% + gaz 23% + biopaliwa 13%) zapotrzebowania na energię elektryczną, znaczy to , że Niemcy dalej nie mogłyby się szczycić mianem kraju dbającego o zrównoważony rozwój świata. Niezbędna rozbudowa istniejącej w tym kraju sieci energetycznej, ze względu na wykorzystanie OZE (2240 km), będzie kosztowała co najmniej 13 miliardów euro. Można się spodziewać, że spalanie biomasy zostanie w przyszłości wyłączone z kategorii OZE a spalanie gazu w dużych blokach energetycznych jest ograbianiem przyszłych pokoleń z tego cennego, trudnego do zastąpienia , surowca naturalnego. Przykład Danii i Niemiec jedynie potwierdza

tezę Trianera, że wykorzystanie jedynie OZE nie pozwoli na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do wymaganego poziomu. A te technologie i w przyszłości nie będą w stanie zapewnić ciągłych, tanich dostaw energii elektrycznej (Trainer, 2010).

Inne podejście do polityki energetycznej ma Finlandia, kraj, który nie może liczyć na takie traktowanie przez dostawców surowców energetycznych jak Niemcy. Finlandia jest jednym z najbardziej innowacyjnych krajów w świecie, jej gospodarka jest bardzo uprzemysłowiona, w dużej części dotyczy to technologii high-tech, elektroniki, przemysłu chemicznego oraz dobrze rozwiniętego przemysłu drzewnego i papierniczego. Konsumpcja energii na głowę mieszkańca jest najwyższa wśród krajów członkowskich OECD. Fiński mix energetyczny jest bardzo zdywersyfikowany , składowe; jądrowa, hydro i bio -, stanowią odpowiednio 31,6 %, 16,9 % i 15,6 % . Pozostałe pierwotne źródła energii to gaz naturalny, węgiel kamienny i brunatny. Finlandia utworzyła jeden z najbardziej zaawansowanych rynków energetycznych, będąc członkiem systemu nordyckiego. Bezpieczeństwo energetyczne jest jednym z priorytetów tego kraju. Zaniepokojenie miejscowych polityków i kręgów gospodarczych budzi fakt, że Finlandia obecnie importuje w godzinach szczytu równoważnik 2000 MW energii elektrycznej. W związku z tym w roku 2010 parlament tego kraju przyjął decyzję "in principle" dotycząca budowy dwu nowych elektrowni jądrowych , w uzupełnieniu do budowanej obecnie Olkiluoto 3. W ten sposób kraj osiągnie samowystarczalność w zakresie produkcji energii elektrycznej w oparciu o bloki jądrowe i bloki spalające biomasę (OECD/IEA - Finland, 2013).

4.Polska polityka energetyczna.

Polityka energetyczna Polski do 2030 roku jest zawarta w załączniku do uchwały 157/2010 Rady Ministrów z dnia 29 września 2010 roku (MG, 2010). W Polsce w roku 2006, gospodarstwa domowe zużywały ok.32 %, przemysł ok. 27%, transport ok. 23 %, usługi ok.10%, rolnictwo ok. 7% energii finalnej. Ok.15% tej energii było zużywane w postaci energii elektrycznej oraz 20% w postaci węgla. W UE-25 udział energii elektrycznej w całkowitym bilansie wynosi 20 %, a zużycie stałych paliw kopalnych jedynie 4,7%. To jest zasadnicza różnica decydująca o strategii rozwoju energetyki w Polsce. W gospodarstwach domowych energia w 60% zużywana jest na ogrzewanie, w 8 % na podgrzewanie wody. W tym zakresie szereg zagadnień może być rozwiązywane na szczeblu lokalnym, elektroenergetyka stanowi zagadnienie ogólnokrajowe i decyduje o dalszym rozwoju gospodarczym i społecznym państwa.



Rys.4. Prognoza dopłat do OZE, głównie w postaci zielonych certyfikatów (MG,2012).

Wspomniany dokument URM rozpoczyna się stwierdzeniem: „Jednocześnie w ostatnich latach w gospodarce światowej wystąpił szereg niekorzystnych zjawisk. Istotne wahania cen surowców energetycznych, rosnące zapotrzebowanie na energię ze strony krajów rozwijających się, poważne awarie systemów energetycznych oraz wzrastające zanieczyszczenie środowiska wymagają nowego podejścia do prowadzenia polityki energetycznej." Faktem jest, że wyliczone w omawianym dokumencie niekorzystne uwarunkowania zewnętrzne wystąpiły w sposób nasilony w ostatnich latach, ale to że wystąpią, wiadomo było od dawna. Autor współpracuje z energetyką zawodową od roku 1986 i zarówno przedstawiciele energetyki, jak i naukowcy, znali i prognozowali nasilenie wszystkich tych niekorzystnych dla rozwoju energetyki czynników w przyszłości, już na początku lat dziewięćdziesiątych;

• Łatwo można było przewidzieć, że przy ograniczonych zasobach paliw kopalnych ich ceny będą rosły dramatycznie,

• Łatwo można było przewidzieć, że obserwowany rozwój Chin, Indii, tygrysów azjatyckich i potrzeby Azji oraz Ameryki Południowej spowodują rosnący popyt na surowce energetyczne,

• Łatwo można było przewidzieć, że wymagania ochrony środowiska spowodują wzrost cen wytwarzania energii. Nawet, jeśli aspekt związany z ograniczeniem emisji dwutlenku węgla nie był jasno zarysowany, to wiadomo już było, że poza ograniczeniem emisji masowej pyłu, potem SO_2 , potem NO_x, wprowadzone zostaną inne ograniczenia emisyjne.

Dokument nie wymienia nowych trendów dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń z elektrowni opalanych węglem; ograniczenia emisji rtęci i niemetanowych związków organicznych. W sprawie ostatnich podpisaliśmy już odpowiednie konwencje.

O tych czekających ludzkość problemach energetycznych wiedzieli i Polacy, i cały świat. Inne kraje, nie szukając daleko, Czechy, Słowacja, czy

też Rumunia, podjęły odpowiednie działania już wtedy. Podobnie już wtedy podjęły budowę dróg szybkiego ruchu, ponieważ o rozwoju gospodarczym decydują w tych krajach głównie przesłanki merytoryczne, a nie polityczne. Dla uniknięcia dyskusji społecznej (wcale nie jest to dyskusja społeczna, tylko dyskusja z grupami kreowanymi medialnie), z lęku, że działania takie czy inne mogą być wykorzystane propagandowo przez opozycję, kolejne rządy od roku 1990 przyjmowały programy energetyczne pozwalające na utrzymanie status quo.

Przyjęto trzy uspakajające sumienie decydentów tezy mówiące, że, problemy energetyczne kraju da się rozwiązać w oparciu o;

- oszczędzanie energii,
- wprowadzenie małych źródeł rozproszonych,
- rozwój energetyki odnawialnej.

Oczywiście wszystkie te możliwości energetyczne trzeba wykorzystać, są one ważne, ale marginalne.

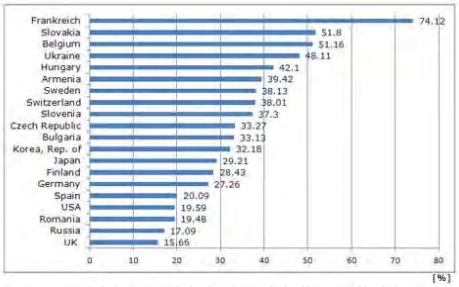
- W Polsce zużycie energii elektrycznej na głowę mieszkańca jest dwukrotnie niższe od zużycia w takich krajach jak Niemcy, Francja, Dania i cała Europa Zachodnia. Debaty o oszczędności energii odbywają się w dobrze oświetlonych w dzień, klimatyzowanych salach itd.
- Źródła rozproszone nie mogą się opierać o spalanie paliw stałych (przy spalaniu biopaliw; drewna, biomasy etc emitowane są lotne zanieczyszczenia organiczne – instalacje wymagają stosowania dobrych systemów oczyszczania spalin). Dania, chyba jedyny kraj posiadający źródła rozproszone, 81% energii uzyskuje ze spalania ropy i gazu. Nigdy, nigdzie i nawet w cytowanym dokumencie MG nie jest podniesiony aspekt oszczędzania paliw kopalnych (głównie gazu i ropy), jako surowców przemysłu chemicznego (nawozy sztuczne, polimery, paliwa pędne i smary).
- Energetyka wykorzystująca źródła odnawialne, dostarcza kilkanaście procent zapotrzebowania świata na energię elektryczną i za sto lat będzie dalej zaspokajała kilkanaście procent potrzeb.

Zgodnie z Oceną Skutków Regulacji załączona do projektu ustawy o OZE z września 2012 r subwencje jakie będą konieczne dla rozwoju OZE wyniosą w ciągu 15 lat od roku 2006 do roku 2020 76 miliardów złotych (Rys.4). Po roku 2020 będą niezbędne dalsze dopłaty, wynoszące powyżej 10 miliardów złotych rocznie. Wykorzystanie OZE wymaga znacznej rozbudowy sieci energetycznej.

Stwierdzenie, że w Polsce istnieją duże możliwości oszczędzania energii, jest na pewno prawdziwe, bo wiele jej zastosowań jest mało efektywne. Ale proste stwierdzenie, że gospodarka jest mało efektywna, ponieważ zużycie energii na jednostkę GNP jest wysokie nie jest prawdziwe. Niska wartość GNP na głowę mieszkańca w Polsce wynika z faktu, że charakterystyczne dla społeczeństwa informacyjnego o dobrze rozwiniętej infrastrukturze usługowej, sportowej, zdrowotnej, komunikacyjnej, zużycie energii elektrycznej w Polsce jest niskie. Wynosiło ono w Polsce 27,7, w Danii 43, w Niemczech 49 a we Francji 51 MWh na głowę mieszkańca. Dlatego też, jeżeli Polska ma się znaleźć w kręgu krajów rozwiniętych musi wytwarzać więcej energii elektrycznej.

Z drugiej strony 61 % energii zużywane było w Polsce przez przemysł wydobywczy i przetwórczy. Jeszcze długo przemysł miedziowy (procesy hutnicze i elektroliza), wydobycie węgla (budowa nowych głębszych kopalni, zdejmowanie nadkładów ziemnych, transport urobku, odpompowywanie wód), rafineryjny (procesy termicznej przeróbki ropy i procesy rektyfikacyjne) będą odgrywały kluczową rolę w gospodarce kraju. Tylko ktoś negujący prawdziwość I prawa termodynamiki może doszukiwać się wielkich oszczędności w zużyciu energii, bez restrukturyzacji gospodarki i energetyki.

Już w tej chwili energetyka konwencjonalna na przygotowanie paliwa (rozdrabnianie, pulweryzacja etc), oczyszczanie spalin (odpylanie, odsiarczanie, odazotowanie) zużywa do 10 % wyprodukowanej energii. Proces sekwestracji ditlenku węgla, jeszcze nie opanowany technicznie, zwiększy znacznie zużycie energii na potrzeby własne elektrowni. Proces oksyspalania, który jest tylko procesem wspomagającym proces sekwestracji, powiększy dalej jałowe zapotrzebowanie na energię niezbędną dla uzysku tlenu z powietrza lub rozkładu wody. Dlatego tez konwencjonalna technika węglowa z zastosowaniem technologii oczyszczania spalin będzie techniką długo dominująca na rynku energetycznym, nawet przy konieczności wnoszenia opłat za emisję CO_2 . Dodatkowe koszty pracy energetyki węglowej będą związane z wprowadzaniem nowych ograniczeń emisyjnych



Rys.5. Udział EJ w globalnej produkcji energii elektrycznej, w wybranych krajach świata, w roku 2010.

dotyczących emisji cząstek pyłu PM2,5 i rtęci, a być może i lotnych niemetanowych zanieczyszczeń organicznych (Chmielewski, 2013).

5.Polityka energetyczna Czech i Słowacji.

Autor był posiadaczem Fiata 126p, potem beznadziejnego wytworu jakim był Fiat 125, a mój syn właścicielem równie słabego Poloneza, na tym skończył się polski sen o własnym przemyśle motoryzacyjnym. Następnie byłem posiadaczem równie słabego jak nasz 125p wytworu czeskiego Skody 120. Potem użytkowałem nie-

Reaktor	Model	Moc (MWe)	Początek budowy	Rozruch
Temelin 3	MIR-1200 lub AP1000	Ca.1200	2019	2026
Temelin 4	MIR-1200 lub AP1000	Ca.1200		2028
Dukovany 5	?	Ca.1200		2025?

Tabela 5. Planowane nowe jądrowe bloki energetyczne w Czechach.

Elektrownia	Typ reaktora	Moc [MW_e]	Rok rozruchu	Rok ew. zamknięcia
Bohunice V-2-1	V-213	472	1984	2025
Bohunice V-2-2	V-213	472	1985	2025
Mochovce - 1	V-213	436	1998	
Mochovce - 2	V-213	436	1999	

Tabela 6. Elektrownie jądrowe w Republice Słowackiej.

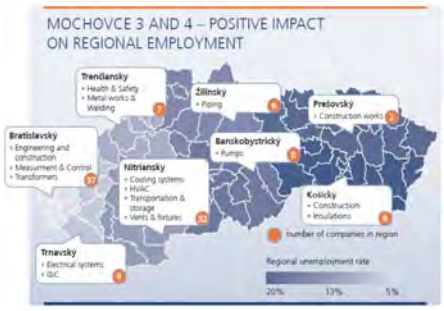
	Typ reaktora	Moc (MW_e)	Początek budowy	Rozpoczęcie pracy	Operator
Mochovce 3	V-213	471	6/2009	10/2014	SE
Mochovce 4	V-213	471	6/2009	10/2014	SE
Bohunice	?	1200-1700	2021?	2025?	Jess
Kecerovce	?	1200		2025?	?

Tabela 7. Budowane, planowane i proponowane EJ w Republice Słowackiej.

złą Skodę Felicję, bardzo dobrą Skodę Fabię i świetną Skodę Octavię i tak się rozpoczął triumfalny rozwój czeskiego przemysłu motoryzacyjnego. Nasz start do energetyki jądrowej rozpoczął się od budowy EJ w Żarnowcu, zatrzymanej potem przez polityków, a sprawy marnotrawstwa olbrzymich środków i zatrzymania rozwoju technologicznego kraju, nigdy nie badała parlamentarna komisja śledcza. Republika Czeska posiada sześć reaktorów jądrowych wytwarzających około jednej trzeciej energii elektrycznej (Rys.5). Pierwszy działający na cele komercyjne reaktor rozpoczął pracę w roku 1985.

Większość uranu dla wyrobu paliwa pochodziło z miejscowych kopalń, konwersja, wzbogacenie uranu i wyprodukowanie prętów paliwowych następowało w Rosji. Paliwo dla EJ Dukovany jest dostarczane przez TVEL. Paliwo dla EJ Temelin było początkowo dostarczane przez Westinghouse, ale w roku 2006 TVEL wygrał przetarg na dostarczanie paliwa do dwu bloków WWR przez 10 lat poczynając od roku 2010 (WNA,2013).

Drugi z naszych południowych sąsiadów Republika Słowacka uzyskuje ponad 50 % elektryczności z energetyki jądrowej co daje jej drugie miejsce w Europie , zaraz po Francji. Pierwszy reaktor komercyjny został zbudowany na należącym do niej terytorium, w roku 1972. Zużycie energii elektrycznej w tym kraju jest prawie niezmienne od roku 1990. Moc zainstalowana w roku 2011 wyniosła 8,1 GW_e, z tego prawie jedna czwarta w energetyce jądrowej (Tabela 6). W roku 2012, wytworzono 28,6 TWh energii elektrycznej, z tego 15,5 TWh (25,5%) w EJ, 4,4 TWh w hydro, 3,8 TWh z węgla i 2,9 TWh z gazu. Import netto wyniósł 0,3 TWh. To, że Słowacja która była kiedyś eksporterem energii elektrycznej (ok.1,TWh/rok), a teraz musi ją importować, związane jest z zatrzymaniem pracy rektorów V1 w EJ Bohunice. Dlatego też rozpoczęto w Elektrowni Jądrowej Mochovce budowędwu nowych bloków, a w przyszłości planowana jest budowa jeszcze następnych (Tabela 6).



Rys.6.Wykorzystanie możliwości wytwórczych własnego przemysłu Słowacji, przy budowie 3 i 4 bloku w Elektrowni Jądrowej Mochovce.

Budowa bloków energetycznych w EJ Mochovce jest największą inwestycją ostatnich lat, której budżet przekracza 4 miliardy euro, kontynuowaną mimo światowego kryzysu finansowego, który dotknął również ten kraj. Liczba osób zatrudnionych w 100 firmach (Rys.6) biorących udział w realizacji tego przedsięwzięcia inwestycyjnego wynosi prawie 10 000.

Inwestycja jest realizowana przez krajowe przedsiębiorstwo energetyczne Slovenské Elektrárne, w nowej elektrowni zatrudnienie znajdzie 4 600 osób, a ich średnie wynagrodzenie wyniesie , w cenach dnia dzisiejszego 1600 euro, tzn. dwukrotnie więcej w stosunku do średniej krajowej. Po zakończeniu inwestycji 48% energii elektrycznej Słowacji będzie wytwarzane z paliwa jądrowego. Każde euro zainwestowane w projekt przyniesie wymierne korzyści dla gospodarki słowackiej wynoszące 2,6 euro. W projekt poza firmami Słowackimi, są zaangażowane firmy z Czech, Włoch, Niemiec, Francji, Rosji i Wielkiej Brytanii. Prowadzi to poza zdobywaniem doświadczenia w zakresie nowoczesnych technologii do ustanowienia kontaktów biznesowych, co przynosi efekty dla gospodarki przez następne dziesięciolecia.

6. Energetyka jądrowa dla Polski.

Ministerstwo Gospodarki opracowało program dotyczący rozwoju sektora energetycznego " Polityka energetyczna Polski do roku 2030" uznający energetykę jądrową jako ważny komponent miksu energetycznego. Rada Ministrów RP w dniu 13 stycznia, 2009 podjęła uchwałę 4/2009 dotyczącą Programu Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ). Rozporządzeniem z dnia 12 maja 2009 Rada Ministrów ustanowiła stanowisko Pełnomocnika Rządu ds PEJ w randze podsekretarza stanu w Ministerstwie Gospodarki, została nim Minister Hanna Trojanowska. URM w kolejnym rozporządzeniu z dnia 11 sierpnia 2009 ustanowił harmonogram prac w zakresie wdrażania energetyki jądrowej, a w dniu 01.07.2011 roku weszły w życie ustawy parlamentu dotyczące zmian w Prawie Atomowym oraz dotyczące działań inwestycyjnych związanych z budową instalacji jądrowych i im towarzyszących.

W dniach od 18 do 22 marca 2013 roku misja IAEA na prośbę Polski przeprowadziła tzw. Integrated Nuclear Infrastructure Review (INIR), stwierdzając, ze kraj poczynił znaczne postępy w tworzeniu infrastruktury jądrowej i zaleciła dalsze kierunki działań. Ostatnio Program Polskiej Energetyki Jądrowej w dniu 28.01.2014 r., przyjęła Radę Ministrów (MG, 2014).

Polska Grupa Energetyczna (PGE)

planuje w pierwszym etapie zainstalowanie ok. 3 000 MW_e, przyjmując , że pierwszy blok zostanie podłączony do sieci w roku 2025. W listopadzie 2011 ogłosiła ona krótką listę prawdopodobnych lokalizacji: - Choczewo (gmina Choczewo, powiat Wejherowo, Województwo Pomorskie); - Gąski (gmina Mielno, powiat Koszalin, Województwo Zachodniopomorskie), - Żarnowiec (gmina Krokowa, powiat Puck, Województwo Pomorskie). PGE podpisało porozumienia dotyczące współpracy z dużymi firmami zaangażowanymi w projektowanie, budowę oraz eksploatację elektrowni jądrowych, takim jak; EdF (2009), GE Hitachi (2010), Westinghouse Electric Company LLC (2010).

W dniu 7 lutego 2013 PGE EJ 1 sp. z o.o. podpisało kontrakt z konsorcjum Worley Parsons Nuclear Services JSC, Worley Parsons International Inc. i Worley Parsons Group Inc. dotyczący prac związanych z ocean lokalizacji i wsparcia prac prowadzących do uzyskania licencji na budowę EJ.

Nastawienie opinii publicznej do budowy elektrowni jądrowej w Polsce zmieniało się bardzo w latach 1987-2011. Zaraz po katastrofie w Czarnobylu tylko 30% badanych popierało takie projekty, w 2009 nastąpił gwałtowny wzrost poparcia do 50 % , przy 40% negatywnie oceniających opcję jądrową. Sytuacja zmieniła się diametralnie po wypadkach w Japonii, 53% badanych wypowiada się przeciwko energetyce jądrowej, a tylko 40 % ją popiera. Zmniejszył się udział niezdecydowanych który wyniósł jedynie 7%. Podobnie jak w innych krajach sprawa lokalizacji składowisk odpadów promieniotwórczych budzi więcej obaw i wskazuje na brak zaufania względem operatorów tych obiektów (Zakrzewska, Anderson, 2012) .

5. Programy badawcze i przemysłowe wspomagające PPEJ

Polskie wyższe uczelnie i instytuty badawcze są zaangażowane w działania związane z wdrażaniem PPEJ. Jeśli chodzi o ośrodki akademickie, to najbardziej aktywne są w tej materii Politechniki Warszawska, Gdańska i Śląska, AGH i Uniwersytet Warszawski. Z instytutów badawczych i PAN są to; Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ), Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) oraz Instytut Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN). ICHTJ i CLOR podpisały z Państwową Agencją Atomistyki (PAA) porozumienie dotyczące wsparcia tej instytucji w działaniach związanych z funkcjami TSO (Technical Support Organization). Działania Prezesa PAA w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej są unormowane przez Prawo Atomowe oraz odpowiednie rozporządzenia. Prezes PAA podlega od 1 stycznia 2002 Ministrowi Środowiska.

Instytuty badawcze podpisały umowę o współpracy z CEA, Francja. W roku 2009, dwudziestu polskich naukowców i nauczycieli akademickich wizytowało szereg instytucji przemysłowych i badawczych pracujących dla potrzeb francuskiego przemysłu jądrowego. W drugiej fazie tego szkolenia , w końcu roku 2010, polscy naukowcy przeszli intensywne szkolenie w ośrodku CEA w Sacley. Trzynastu z nich, przewidzianych do prowadzenia zajęć dydaktycznych w Polsce, spędziło 12 tygodni w roku 2011, w laboratoriach francuskich; ośrodkach CEA w Cadarache, Saclay i Marcoule, Andra w Chatenay-Malabry, EDF w Lyon, Areva w La Défense i CNRS w Orsay (12 EN, 2011).

Strategiczny projekt badawczy *„Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”* jest odpowiedzią na postulat zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju w warunkach wdrożenia w Polsce energetyki jądrowej (NCBiR). Jego wdrożenie miało ścisły związek z implementacją „Polityki energetycznej Polski do 2030 roku”, dokumentu przyjętego w 2009 r. uchwałą Rady Ministrów oraz z przyjęciem przez Unię Europejską pakietu klimatyczno-energetycznego.
W ramach Projektu realizowane są następujące zadania badawcze:

Rozwój wysokotemperaturowych reaktorów do zastosowań przemysłowych (lider konsorcjum – Akademia Górniczo-Hutnicza);

Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej (lider konsorcjum - Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN);

Podstawy zabezpieczenia potrzeb paliwowych polskiej energetyki jądrowej (lider sieci naukowej – Uniwersytet Warszawski);

Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi (wykonawca – Instytut Chemii i Techniki Jądrowej);

Analiza możliwości i kryteriów udziału polskiego przemysłu w rozwoju energetyki jądrowej (lider sieci naukowej - Politechnika Warszawska);

Rozwój metod zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej dla bieżących i przyszłych potrzeb energetyki jądrowej (lider sieci naukowej – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej);

Analiza procesów generacji wodoru w reaktorze jądrowym w trakcie normalnej eksploatacji i w sytuacjach awaryjnych z propozycjami działań na rzecz podniesienia poziomu bezpieczeństwa jądrowego (lider sieci naukowej – Instytut Chemii i Techniki Jądrowej);

Analiza procesów zachodzących przy normalnej eksploatacji obiegów wodnych w elektrowniach jądrowych z propozycjami działań na rzecz podniesienia poziomu bezpieczeństwa jądrowego (lider sieci naukowej – Instytut Chemii i Techniki Jądrowej);

Opracowanie metod i wykonanie analiz bezpieczeństwa w reaktorach jądrowych przy zaburzeniach w odbiorze ciepła i w warunkach ciężkich awarii (wykonawca – Politechnika Warszawska);

Opracowanie metody i wykonanie przykładowej analizy systemowej pracy bloku jądrowego z reaktorem wodnym przy częściowym skojarzeniu (wykonawca – Politechnika Gdańska).

Polskie Instytuty reprezentują nasz

kraj w różnych organizacjach międzynarodowych, takich jak: Euratom Supply Agency, Nuclear Energy Agency – OECD, IFNEC etc. Realizują bądź realizowały też szereg projektów EURATOM-u; NC2I-R, TALISMAN, ASGARD, IPPA, ADVANCE, MULTIBIODOSE etc.

Ważną rolę we wdrożeniu PPEJ odegra współpraca z organami Komisji Europejskiej. W czerwcu 2013 Komisja Europejska zaproponowała zmiany w dyrektywie dotyczącej bezpieczeństwa jądrowego. Zmiany odnoszą się do :

- *wprowadzenia nowych wspólnych dla EU zasad bezpieczeństwa;*
- *ustanowienia europejskiego systemu wzajemnej oceny i przeglądu instalacji jądrowych;*
- *ustanowienia mechanizmu wypracowania ogólnoeuropejskich, zharmonizowanych wytycznych dla bezpieczeństwa jądrowego;*
- *wzmocnienie roli i niezależności krajowych organów dozoru jądrowego;*
- *zwiększenie transparentności dotyczących spraw bezpieczeństwa jądrowego;*
- *wprowadzenie nowych zasad gotowości i mechanizmów działań w sytuacjach awaryjnych.*

EU musi wypracować własny mechanizm weryfikacji powyższych zasad dla upewnienia się czy wspólne zasady bezpieczeństwa zostaną osiągnięte. Co najmniej co 6 lat instalacje jądrowe muszą być poddane przeglądowi z punktu widzenia bezpieczeństwa. Rezultaty tej oceny będą przekazane do odpowiednich organów EU dla wspólnej ich oceny. Taka strategia działań tworzy solidną bazę dla budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych w Europie.

Porzucony projekt budowy Elektrowni Jądrowej w Żarnowcu był w 70 – 80% realizowany przez polski przemysł. Obecnie niektóre firmy polskie są zaangażowane w budowę EJ w Polsce i Francji, Firmy zagraniczne poszukują obecnie partnerów przemysłowych w Polsce. I tak, General Electric – Hitachi zawarł szereg wstępnych porozumień mających na celu nawiązanie współpracy przy realizacji późniejszych projektów jądrowych (GE-Hitachi, 2011):

- *z Fluor Corp., w zakresie projektowania, dostaw i budowy (2011),*
- *z Energoprojekt Warszawa, S.A. w zakresie projektowania (2011),*
- *z Instytutem Energii Atomowej (POLATOM) (2011),*
- *ze Stocznią Gdańsk, w zakresie wykonawstwa (2011),*
- *z RAFAKO S.A., w zakresie wykonawstwa (2011),*
- *z Politechnikami w Gdańsku i Koszalinie oraz Zachodniopomorskim Uniwersytetem Przyrodniczo-Technologicznym w Szczecinie (2011),*
- *z SNC-Lavalin Polska, w zakresie projektowania (2010),*
- *z Politechniką Warszawską (2012).*

Podobne działania zostały podjęte przez przedsiębiorstwa francuskie AREVA / EDF. Poza szeroką współpracą w zakresie badań i studiów (głównie z Politechniką Warszawską) AREVA podjęła szereg innych przedsięwzięć, takich jak :

- *marzec 2010: studium dotyczące udziału polskiego przemysłu w projekcie jądrowym,*
- *rozpoczęta w lipcu 2010 roku akcja dotycząca badań możliwości i kwalifikacji polskich firm obejmująca 60 dni wizyt w przedsiębiorstwach oraz wykonanie wstępnych ocen 29 z nich, akcja jest kontynuowana,*
- *wrzesień 2010: pierwszy "dzień" dostawców AREVA, Warszawa,*
- *październik 2011: drugi "dzień" dostawców AREVA, Warszawa*
- *kwiecień 2012: pierwszy "dzień" dostawców AREVA / EDF, Gdańsk,*
- *od grudnia 2012: AFCEN seminaria dotyczące kodów (kontynuowane),*
- *kwiecień 2013: akcja ustanowienia kontaktów z przemysłem ciężkim (stocznie) i firmami budowlanymi na Pomorzu,*
- *ciągła współpraca z firmami pracującymi dla AREVA przy budowie elektrowni jądrowej w Olkiluoto (Finlandia).*

Ważną rolę w promocji i edukacji odgrywają organizacje takie jak Polskie Towarzystwo Nukleoniczne (PTN) i Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej (SEREN).
Na zlecenie Ministerstwa Gospodarki został wykonany foresight technologiczny dotyczący rozwoju sektora energetyki w Polsce do roku 2030 mający na celu określenie kluczowych dla tej dziedziny technologii. Ranking dotyczący ważności wpływu jednej z 20 tez testu Delphi sklasyfikował na pozycji 3 stwierdzenie " Bez energetyki jądrowej nie będzie możliwe zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju i pokrycie zapotrzebowania na energie elektryczną w Polsce". Liczba uczestniczących w badaniach ekspertów wyniosła 750, reprezentowali oni instytuty R&D, uczelnie wyższe, przemysł i inne organizacje, w tym NGO (Czaplicka - Kolarz et al.,2009) .

6. Wnioski.

Lekcje odrobione w Europie, szczególnie przez najbardziej technologicznie i gospodarczo rozwinięty kraje naszego kontynentu wykazały, że OZE jedynie w ograniczonym zakresie mogą być wykorzystane w ogólnym bilansie źródeł wytwarzania energii elektrycznej.

Wszystkie technologie energetyczne oparte o procesy spalania nie mogą być uznane za nieszkodliwe dla środowiska i człowieka.

Wykorzystanie energetyczne gazu, mimo, że emisje zanieczyszczeń są mniejsze, od występujących przy spalaniu węgla i gazu, jest bezmyślnym marnotrawstwem tego ważnego dla przemysłu surowca. Powinno być ono ograniczone do zastosowań komunalnych.

W przypadku Polski, węgiel przez wiele lat pozostanie głównym pierwotnym źródłem energii. Jednak budowa bloków energetycznych (2 x 1500 MW w I etapie oraz kolejnych dwu bloków o podobnej mocy w II etapie), poważnie ograniczy wpływ energetyki na środowisko i zredukuje wielkość opłat za emisję ditlenku węgla.

7. Podziękowania

Studium publikowane w tym artykule powstało w ramach projektu finansowanego przez NCBiR Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej. Autor składa podziękowania za możliwość dyskusji niektórych fragmentów – Panu Ziemowitowi Iwańskiemu (GE Energy, Country Executive, Central and Eastern Europe); Panu, Adamowi Rozwadowskiemu (Director, Areva Poland) oraz Pani Nathalie Beauzemont (EDF, Senior Nuclear Project Manager).

Bibliografia

BMWi, 2012, Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), Germany's new energy policy – Heading towards 2050 with secure , affordable and environmentally sound energy, Berlin, April 2012, http://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/germanys-new-energy-policy

Cherubini F., Guest G., Strømman A.H., 2012, Application of probability distributions to the modeling of biogenic CO_2 fluxes in life cycle assessment, Bioenergy, 4(6),784 – 798.

Chmielewski A.G., 2013, Nuclear Power for Poland, World Journal of Nuclear Science and Technology, 2013, 3, 123-130

Czaplicka-Kolarz K., Stańczyk K., Kapusta K., Technology foresight for a vision of energy sector development in Poland till 2030. Delphi survey as an element of technology foresighting, Technological Forecasting & Social Change, 76, 327–338, 2009.

Danish Energy Agency, Energy Statistics 2011,Copenhagen, Denmark, December 2012 http://www.ens.dk/enUS/Info/FactsAndFigures/Energy_statistics_and_indicators/Annual%20Statistics/Documents/Energy%20Statistics%202011.pdf

DESTATIS, Germany, 2013 https://www.destatis.de/EN/FactsFigures/EconomicSectors/Energy/Energy.html

EEA, 2008, Electricity Consumption http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/electricity-consumption-per-capita-in-

EEA, 2012, CO_2 Emission Trends, http://www.eea.europa.eu/pressroom/publications/ghg-trends-and-projections-2012/

EEA, 2012, Loss of statistical life expectancy attributed to anthropogenic contributions to PM2.5, 2000 and 2020 , http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/loss-of-statistical-life-expectancy-attributed-to-anthropogenic-contributions-to-pm2-5-2000-and-2020

12-EN, 2011, http://www.i2en.fr/en/news/47-poland-uk.html

EU Energy in Figures, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012 http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2012_energy_figures.pdf

Gabryś H.L., Electric power industry of the year 2012 in Poland in the light of energy balance for 2011 and not only (in Polish), Energetyka, 139 – 141, March-April 2012. http://elektroenergetyka.pl/upload/file/2012/3-4/Gabrys.pdf

GE – Hitachi, 2012, http://www.genewscenter.com/Press-Releases/GE-Hitachi-Nuclear-Energy-Continues-to-Build-Nuclear-Infrastructure-in-Poland-3b8d.aspx

KOBiZE, Poland's National Inventory Report , 2013, Warsaw, March 2013, http://www.kobize.pl/materialy/Inwentaryzacje_krajowe/2013/NIR-2013-PL-en.pdf

MG, 2009, Forecast of demand for fuels and energy by 2030, http://www.mg.gov.pl/files/upload/8134/Appendix2.pdf

MG,2009, Polityka Energetyczna dla Polski do roku 2030, Warszawa, 10 listopada 2009 http://www.mg.gov.pl/files/upload/8134/Polityka%20energetyczna%20ost_en.pdf

MG,2010,http://www.mg.gov.pl/Bezpieczenstwo+gospodarcze/Energetyka/Polityka+energetyczna Polityka energetyczna Polski do 2030 roku- załącznik do uchwały 157/2010 Rady Ministrów z dnia 29 września 2010 roku

MG, 2014, http://bip.mg.gov.pl/node/16134, Program polskiej energetyki jądrowej, wersja z dn. 28.01.2014 r., przyjęta przez Radę Ministrów

NCBiR, http://www.ncbir.pl/en/strategic-programmes/technologies-supporting-development-of-safe-nuclear-power-engineering/

OECD/IEA, 2013, Energy Policies of IEA Countries – Germany (2013 Review), OECD/IEA, Paris, 2013

Olkuski T., New trend in Polish coal trade (in Polish), Polityka Energetyczna , 13(2), 365-375, 2010. http://www.meeri.pl/zaklady/zrynek/zasoby/10_14to_pe_z.pdf

PTN, http://www.ptn.nuclear.pl/

Safe S.H., 1998, Hazard and Risk Assessment of Chemical Mixtures Using the Toxic Equivalency, Environ. Health. Perspect. n106 (suppl.4), 1051–1058 http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1533329/pdf/envhper00539-0123.pdf

SEREN, http://www.seren.org.pl/

Trainer T., Can renewables etc. solve the greenhouse problem? The negative case, Energy Policy, 38,4107 – 4114, 2010 http://www.dieoff.com/_Energy/TrainerRenewables.pdf

Weem A.P., Reduction of mercury emissions from coal fired power plants, Working Group of Strategies and Review, Geneva Informal document No.3 2011, *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

WNA, 2013, World Nuclear Association, www.world-nuclear.org/info/Country

Zakrzewska – Trznadel G., Anderson K., 2012, Transparency and Public Participation in Radioactive Waste Management, Mater. Res. Soc. Symp. Proc.,1475, 51 -56.

14 kwietnia 2014, Warszawa

Międzynarodowe Forum ENERGETYKI JĄDROWEJ

The Warsaw Voice & powermeetings.eu

2 EDYCJA

Po długiej niepewności co do przyszłości energetyki jądrowej w Polsce od końca stycznia br. wreszcie można uznać za prawdopodobne, iż mniej więcej za jedenaście lat żarówki nad naszymi głowami będą świecić także dzięki energii z atomu. Rząd bowiem przyjął, na posiedzeniu 28 stycznia, Program Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ).

Wszyscy zainteresowani mają dziś nadzieję, iż w tej sprawie zaczyna się zatem czas konkretów. My także. Dlatego w dniu 14 kwietnia 2014 r. powermeetings.eu we współpracy z Warsaw Voice organizuje w Warszawie drugą edycję

Forum Energetyki Jądrowej przygotowujemy w ścisłej współpracy z Ministerstwem Gospodarki oraz przedstawicielami konsorcjum inwestycyjnego, na czele którego stoi PGE. Deklarujemy, jak zwykle, współpracę z wszystkimi innymi instytucjami i podmiotami, w tym międzynarodowymi, które są zainteresowane procesem realizacji PPEJ.

Przyjęty 28 stycznia przez rząd program stanowił warunek konieczny do podjęcia prac przez konsorcjum inwestycyjne. Jak na konferencji prasowej w tej sprawie powiedziała Hanna Trojanowska, pełnomocnik rządu ds. energetyki jądrowej i podsekretarz stanu w Ministerstwie Gospodarki, Rada Ministrów uchwaliła kompleksowy katalog działań dla rozwoju energetyki jądrowej, który nie tylko ustala cele, ale i ścieżki dojścia, stanowiąc mapę drogową budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych w Polsce. Nowy program, określa m.in. harmonogram wybudowania dwóch elektrowni jądrowych oraz przygotowania pod te inwestycje infrastruktury regulacyjnej i organizacyjnej. W dokumencie zostały ustalone role oraz zakres odpowiedzialności instytucji odpowiedzialnych za wdrożenie Programu, a także kwestie związane z zapewnieniem bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. Program zawiera również: uzasadnienie ekonomiczne wdrażania budowy energetyki jądrowej w Polsce i możliwości jego finansowania oraz sposoby postępowania z wypalonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi". Są zatem wreszcie podstawy, aby zabrać się do pracy.

Obecnie gros naszej energii, bo co najmniej 85%, pochodzi z węgla, kamiennego i brunatnego. Jak wiadomo, to paliwo nie cieszy się dobrą sławą. Nowe technologie energetycznego przerobu węgla co prawda obiecują znaczną poprawę tego wizerunku, jednak zobowiązania już są i udział węgla w bilansie energetycznym Polski ma szybko spadać. Będzie to możliwe miedzy innymi dzięki energetyce jądrowej, która w 2030 roku będzie miała już 11-procentowy udział w mocach wytwórczych. Ich strukturę poprawią także, według ekspertów, odnawialne źródła energii (OZE), które w tym samym czasie powinny w Polsce zapewnić 24% mocy. I choć nadal dominować będzie węgiel, to jego udział ulegnie przecież radykalnej redukcji (do 51%).

Rządowe plany, zawarte w PPEJ, a także przewidywania ekspertów, przypisują energetyce jądrowej kluczową rolę w zapewnieniu energetycznej niezawisłości Polski. Tymczasem jednak wiele kwestii, warunkujących realizację PPEJ jest jeszcze do rozstrzygnięcia. Uczestnicy trudnego procesu dochodzenia do jądrowej energetyki w Polsce muszą pochylić się nie tylko nad sprawami takiej wagi, jak wybór technologii i tym samym - międzynarodowych partnerów projektu czy kwestie dostępności finansowania o gigantycznej przecież skali. Do rozwiązania pozostają także rebusy społeczne, partyjno-polityczne i dyplomatyczne.

Najważniejsze jednak dla powodzenia projektu jest poparcie społeczne, uwarunkowane dalszymi działaniami edukacyjnymi, które wymagają i środków, i czasu. Ale przede wszystkim wymagają konsekwencji w działaniu; tak w skali kraju, jak i w skali społeczności lokalnej w rejonie, który ostatecznie zostanie wybrany pod jądrową inwestycję. Liczymy, iż drugie Międzynarodowe Forum Energetyki Jądrowej, tak jak pierwsza jego edycja (patrz link), po pierwsze, przyczyni do polepszenia stanu wiedzy branży i wszystkich zainteresowanych procesem realizacji PPEJ, po drugie, wpłynie na dalszą poprawę klimatu społecznego wokół energetyki jądrowej w Polsce, po trzecie, między innymi dzięki udziałowi w konferencji gości międzynarodowych, a także dzięki wynikającym ze spotkania publikacjom, pozwoli na lepsze zrozumienie polskich priorytetów rozwoju energetycznego wśród bliższych i dalszych sąsiadów Polski.

Krzysztof Wojciech Fornalski

Sięgając źródeł – czyli co w tym jądrze siedzi...

Streszczenie

Niniejszy artykuł w prosty i popularnonaukowy sposób przybliża budowę jądra atomowego oraz opisuje jego strukturę od nukleonów po kwarki. Przedstawiono podstawowe założenia i wnioski najpopularniejszych modeli jądrowych: modelu kroplowego, modelu gazu Fermiego oraz modelu powłokowego.

Summary

The presented article describes the structure of atomic nucleus in easy and popular way, from nucleons to quarks. Main assumptions and conclusions of the most popular nuclear models were presented: liquid drop model, Fermi gas model and nuclear shell model

Przez ostatnie lata w Polsce trwa gorąca debata na temat energetyki jądrowej – budować czy nie budować elektrownie, a jeśli budować, to gdzie – nad morzem, pod Warszawą, reaktor ciśnieniowy czy reaktor wrzący, dwa bloki a może trzy itd. Tego typu pytań przewinęło się i przewija wciąż bardzo wiele, jednak mało osób zadaje sobie trud, aby sięgnąć do korzeni tego całego zamieszania, czyli do samego jądra atomowego. W niniejszym artykule zajmiemy się tematami jądrowymi z zupełnie innej strony, od wewnątrz.

Jądro nieznane

Jądro atomowe zostało odkryte w 1911 roku przez Ernesta Rutherforda, w zasadzie przez przypadek. Dysponował on bowiem źródłem promieniowania alfa (cząstka alfa to pozbawione elektronów jądro helu) i chciał sprawdzić, jak różnego rodzaju materiały zdolne są do pochłaniania emitowanych przez to źródło cząstek. Mając układ źródło-absorbent-detektor, można było śmiało zabierać się do pracy. Jednak kierowany swą intuicją badacza, Rutherford umieścił detektor po tej samej stronie co źródło. Ku jego zdumieniu zarejestrował on pojedyncze cząstki alfa, które odbijały się od metalowej folii (w tym konkretnym przypadku była to folia ze złota). Wniosek był jeden: w materii istnieją niewielkie obiekty, których masa przewyższała masę cząstek alfa. Z oczywistych przyczyn wykluczało to dużo lżejsze elektrony. W ten oto sposób odkryto jądro atomowe.

Przez pewien czas po odkryciu uważano, iż jądro atomowe jest jednolite i wyobrażano go sobie niczym maleńką stalową kulkę. Jednak po latach badań okazało się, iż jądro atomowe nie jest obiektem statycznym. W jego wnętrzu i z jego udziałem zachodzą różnego rodzaju przemiany fizyczne, co obserwuje się w postaci emisji cząstek. A to oznacza, iż jądro atomowe ma swoją wewnętrzną strukturę.

Jądro poznawane

Wraz z uświadomieniem sobie faktu, iż jądro nie jest obiektem statycznym, lecz dynamicznym, posiadającym wewnętrzną strukturę, rozpoczęły się zakrojone na ogólnoświatową skalę badania mające na celu poznanie wewnętrznego świata tego tajemniczego obiektu, jakim jest jądro. W wyniku tych badań okazało się, iż składnikami jądra są jeszcze mniejsze cząstki, czyli nukleony.

Dzisiaj, po wielu dekadach minionych od tamtego czasu, informacja na temat nukleonów, czyli protonów i neutronów, znajduje się w każdym szkolnym podręczniku do fizyki. Dowiemy się z nich, iż protony posiadają ładunek dodatni oraz masę $1{,}673\times10^{-27}$ kg. Decydują też o miejscu danego atomu w układzie okresowym pierwiastków. Z kolei neutrony nie posiadają ładunku elektrycznego, zaś ich masa jest zbliżona do masy protonu i wynosi $1{,}675\times10^{-27}$ kg. Co więcej, zarówno neutrony jak i protony mają podobną średnicę równą ok. $2{,}5\times10^{-15}$ m.

Nukleony

Jak już powiedzieliśmy, nukleony, czyli neutrony i protony, stanowią budulec jądra atomowego, które jest średnio ok. 20 000 razy mniejsze od całego atomu i stanowi niemal całą jego masę (ok. 99,9%). Gęstość materii w jądrze jest ogromna i wynosi $2{,}8\times10^{17}$ kg/m^3, czyli 10 bilionów razy więcej niż gęstość ołowiu.
Oddziaływania pomiędzy poszczególnymi nukleonami świadczą o istnieniu tzw. sił jądrowych, które różnią się od dużo słabszych oddziaływań grawitacyjnych czy elektromagnetycznych. Siły jądrowe są krótkozasięgowe, zanikają w odległości ok. 2×10^{-15} m, i są niezależne od ładunku elektrycznego. Oznacza to, że nie rozróżniają one typów nukleonów (czyli protonów od neutronów) i wiążą je ze sobą na niewielkich odległościach w obrębie samego jądra.

Schodząc na jeszcze głębszy poziom dowiemy się, iż nukleony posiadają także swoją wewnętrzną strukturę. Zbudowane są z kwarków – silnie oddziałujących cząstek elementarnych, które samodzielnie nigdy nie mogą występować w przyrodzie. Znanych jest sześć typów kwarków i tyleż samo antykwarków, jednakże nukleony składają się tylko z dwóch z nich, tzw. kwarków górnych („u") oraz dolnych („d"). Proton posiada skład kwarkowy „uud", natomiast neutron „udd". Jak dotąd nikomu nie udało się odkryć wewnętrznej struktury kwarków, toteż przyjmuje się je za najmniejsze i niepodzielne cząstki stanowiące budulec jąder atomowych.

Ciekawostki jądrowe

Podane do tej pory informacje są w zasadzie książkowe i ogólnodostępne. W podręcznikach do fizyki jądra i cząstek elementarnych znaleźć można też całą masę dodatkowych informacji, które w podręcznikach szkolnych są pomijane. Poniżej przedstawiamy kilka „ciekawostek jądrowych", o których z pewnością nie każdy słyszał:

- składnikami nukleonów, oprócz kwarków, są także gluony. Gluony są przedstawicielami rodziny bozonów cechowania, czyli cząstek przenoszących oddziaływania. Gluon jest więc cząstką przenoszącą oddzia-

ływania między kwarkami, „sklejającą" kwarki ze sobą. Wszystkie kwarki, antykwarki oraz gluony noszą ogólną nazwę partonów, czyli rodziny cząstek wchodzących w skład hadronów. Do olbrzymiej rodziny hadronów (w sumie ponad 100 cząstek) należą m.in. proton i neutron (czyli wspomniane wielokrotnie nukleony);

- w pewnych warunkach istnieje możliwość laboratoryjnego wytworzenia ujemnie naładowanych protonów (tzw. antyprotonów). Antyprotony wraz z otaczającymi ich pozytonami (antyelektronami) stanowią tzw. antymaterię;
- nukleony, czyli protony i neutrony, należą do rodziny cząstek zwanych barionami. Do tej samej rodziny należą tzw. hiperony, czyli cząstki posiadające niektóre właściwości zbliżone do nukleonów i niewiele większą od nich masę. W związku z tym w pewnych warunkach składnikami jądra atomowego, oprócz protonów i neutronów, mogą być hiperony. Mówimy wówczas o tzw. hiperjądrach i hiperatomach. Pierwszy raz na świecie hiperjądro zostało zaobserwowane w 1952 roku w Warszawie przez profesorów Mariana Danysza i Jerzego Pniewskiego;
- krążący wokół jąder elektron jest najpowszechniej występującym przedstawicielem rodziny leptonów naładowanych, czyli cząstek do których należą także mion (μ) oraz taon (τ), a także odpowiadające im antycząstki. Do grupy leptonów obojętnych należą neutrina. Leptony, obok kwarków, są podstawowym i niepodzielnym budulcem materii.

Okiełznać jądro atomowe

Od momentu zdania sobie sprawy, iż jądro atomowe posiada wewnętrzną strukturę, starano się znaleźć jego jak najlepszy opis matematyczny. Zadanie to jest niezwykle trudne z uwagi na ograniczenia związane ze zdobywaniem danych eksperymentalnych. Wszak każdy prawidłowy opis matematyczny danego obiektu fizycznego musi mieć odzwierciedlenie w danych rzeczywistych.

Obecnie na świecie istnieje wiele opisów jądra, zwanych modelami jądrowymi. Każdy z nich w dobry sposób opisuje zachowanie się jąder, jak też ich wewnętrzną strukturę. Oczywiście modele te, jak to modele, posiadają też swoje ograniczenia, a wybór właściwego modelu zależy przede wszystkim od tego, do jakiej konkretnej sytuacji ma być użyty. W dalszej części artykułu przedstawione zostanie kilka najpopularniejszych modeli jądrowych.

Model kroplowy

Jednym z pierwszych modeli jądra atomowego był tzw. model kroplowy. Bazował on na klasycznym rozumowaniu otaczającej nas materii i w sposób fenomenologiczny zakładał, iż nukleony w jądrze zachowują się niczym cząsteczki w kropli nieściślejwej cieczy, skąd wzięła się z resztą nazwa tego modelu. Za jego twórców uważa się Georga Gamowa, Nielsa Bohra oraz Johna Wheelera.

Choć wydawać by się mogło, iż taki opis jądra jest naiwny, to okazało się, iż tłumaczy on bardzo wiele zjawisk i dość dobrze się sprawdza. Przykładowo w pierwszym przybliżeniu gęstość materii jądrowej jest stała, co model kroplowy tłumaczy znakomicie. Po drugie eksperymentalnie stwierdzono, iż kształt jądra jest kulisty (lub eliptyczny), co również można wytłumaczyć dzięki modelowi kroplowemu. W szczególności promień takiego jądra można opisać za pomocą przybliżonej zależności:

$$R(A) = R_0 A^{1/3} \tag{1}$$

gdzie R_0 jest przybliżoną średnicą nukleonu (ok. 1,2 fm = $1{,}2 \cdot 10^{-15}$ m), a A liczbą masową (sumą nukleonów w jądrze). Jednak to nie zależność (1) jest największą zdobyczą modelu kroplowego, lecz półempiryczny wzór na energię wiązania nukleonów w jądrze, tzw. wzór Bethego-Weizsaekera:

$$E_W = E_{obj} + E_{pow} + E_{Coul} + E_{sym} + E_{par} \tag{2}$$

gdzie poszczególne człony oznaczają:

- $E_{obj} = a_1 A$ – człon objętościowy, który opisuje wprost proporcjonalną zależność energii wiązania od masy jądra;
- $E_{pow} = - a_2 A^{2/3}$ - człon powierzchniowy, który uwzględnia zjawiska powierzchniowe, czyli słabsze przyciąganie się (stąd znak minus) nukleonów znajdujących się na krawędzi jądra. Z racji tego, iż człon ten jest proporcjonalny do powierzchni jądra, a ta proporcjonalna do kwadratu promienia, to na podstawie równania (1) obliczono wartość potęgi ⅔;
- $E_{Coul} = - a_3 Z^2 A^{-1/3}$ - człon kulombowski, odpowiedzialny za odpychanie (znów znak minus) elektrostatyczne protonów w jądrze, stąd zależność od liczby atomowej Z, czyli sumy protonów;
- $E_{sym} = - a_4 (A - 2Z)^2 / A$ – człon symetryczny związany z klasyczną próbą wyjaśnienia zwiększonej stabilności jąder o równej liczbie protonów i neutronów. E_{sym} równa się zero w sytuacji, gdy liczba protonów jest równa liczbie neutronów w jądrze ($A = N + Z = 2Z$). W sytuacji $N \neq Z$, człon ten ma wartość ujemną zmniejszającą wartość całkowitej energii wiązania;
- $E_{par} = \delta a_5 A^{-3/4}$ – człon parowy, który uwzględnia tendencję do łączenia się nukleonów w pary (p+p, n+n). Funkcja znaku δ przyjmuje wartość +1, gdy zarówno liczba protonów jak i liczba neutronów są parzyste (jądro parzysto-parzyste), wartość 0 gdy albo liczba protonów, albo liczba neutronów jest parzysta (jądro nieparzysto-parzyste), oraz wartość -1,

gdy jądro jest nieparzysto-nieparzyste (istnieje zarówno niesparowany proton jak i niesparowany neutron).

Jak napisano wcześniej, zależność (2) jest półempiryczna. Uwzględniając dane eksperymentalne udało się oszacować wartość parametrów a_n, które wynoszą kolejno: a_n = { 15,8 ; 18,3 ; 0,71 ; 23,2 ; 34 }.

Oprócz wielu niewątpliwych zalet, takich jak ogólne zrozumienie zależności energii wiązania od liczby masowej czy możliwość zastosowania np. w fizyce reakcji rozszczepienia, model kroplowy ma całą gamę wad. Przede wszystkim jest to model klasyczny, który nie opisuje efektów kwantowych zachodzących wewnątrz jądra, a co za tym idzie nie uwzględnia różnych poziomów energetycznych, w których mogą znajdować się nukleony.

Model gazu Fermiego

W modelu tym założono, iż nukleony zachowują się jak nieoddziałujące ze sobą swobodne cząstki, poruszające się w pewnej kuli, zwaną kulą Fermiego. Przyjmuje się, iż z punktu widzenia energetycznego, swobodne cząstki ograniczone są przez barierę potencjału (studia potencjału), a jej promień jest równy promieniowi jądra. Obowiązujące w modelu reguły kwantowe wykraczają poza popularnonaukowy charakter niniejszego artykułu, w związku z czym nie będziemy ich w tym miejscu opisywać.

Model ten dobrze sprawdza się przy obliczeniach zderzeń ciężkich jąder, gdyż każdy nukleon traktuje się jako cząstkę posiadającą pęd (tzw. pęd Fermiego równy ok. 250 MeV/c). Co więcej model gazu Fermiego tłumaczy też nadmiar neutronów dla ciężkich stabilnych jąder, jednakże nie tłumaczy faktu istnienia tzw. jąder magicznych.

Model powłokowy

Bardzo ciekawą koncepcją jest kolejny model jądrowy, zwany modelem powłokowym. Zakłada on, iż nukleony w jądrach, podobnie jak elektrony w atomach, znajdują się na pewnych powłokach energetycznych. W przypadku jąder różnica jest jednak taka, iż nie istnieje cząstka centralna (jądro jądra), a odległości pomiędzy powłokami (poziomami energetycznymi) nukleonów są dużo mniejsze niż w przypadku powłok elektronowych.

W modelu powłokowym przyjmuje się, iż każdy nukleon reprezentowany jest przez swoją funkcję falową i porusza się w polu o pewnej kulistej symetrii, pochodzącym od pozostałych nukleonów w jądrze. Pole to nosi nazwę potencjału jądrowego, które można interpretować jako uśrednienie oddziaływań między nukleonami. Potencjał jądrowy, oznaczany jako $V(r)$, otrzymać można na podstawie formuły Woodsa-Saxona:

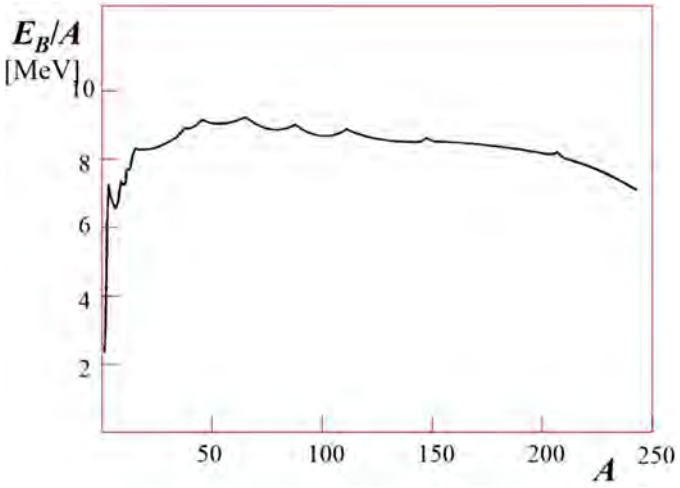
$$V(r) = \frac{-V_0}{1+e^{\frac{r-R}{a}}} \quad (3)$$

gdzie V_0 = 57 MeV, a = 0,65 fm, a za R można użyć formuły (1).

Ponadto dla protonów używa się dodatkowo potencjału kulombowskiego, w zależności, czy rozważamy przypadek na zewnątrz ($r>R$), czy wewnątrz ($r<R$) jądra. Użycie jednolitego potencjału jądrowego $V(r)$ jest wygodne, lecz przy okazji stanowi on niewątpliwą wadę tego modelu, gdyż rozpatrując ruch jednego nukleonu w uśrednionym polu pozostałych, założyć musimy brak jednoznacznie opisanych ruchów między pozostałymi nukleonami.

Po skonfrontowaniu założeń modelowych z danymi eksperymentalnymi okazało się, iż model powłokowy bardzo dobrze opisuje zachowanie się jąder. W szczególności koncepcja powłok, ich zapełnianie się oraz przeskoki nukleonów pomiędzy powłokami znajdują odzwierciedlenie w rzeczywistych danych. Oczywiście w wyniku zachodzenia tzw. zakazu Pauliego, dwa nukleony nie mogą przebywać w tym samym stanie energetycznym, w związku z tym nawet, jeśli obsadziły tę samą powłokę, to czymś się muszą różnić (ładunkiem, spinem etc.). Dobrym przykładem jest tutaj chociażby jądro helu, które składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów, czyli można śmiało rzec, iż w pełni obsadzają pierwszą powłokę jądrową.

Okazało się ponadto, iż tak skonfigurowane jądro helu-4 posiada znaczną energię wiązania nukleonów. Dzięki temu dochodzimy do najważniejszego wniosku płynącego z modelu powłokowego, jakim jest zwiększona stabilność tych jąder, których ostatnia powłoka jest w pełni obsadzona. Jest to swojego rodzaju analogia do gazów szlachetnych, u których w pełni wypełnione powłoki elektronowe są niezwykle trwałe i uniemożliwiają wchodzenie im w związki chemiczne. I tak jądra, u których w myśl modelu po-



Rys. 1. Wykres zależności energii wiązania na nukleon od liczby nukleonów w jądrze. Lokalne maksima odpowiadają liczbom magicznym. Dość dobre przybliżenie wykresu otrzymać można na podstawie zależności (2)

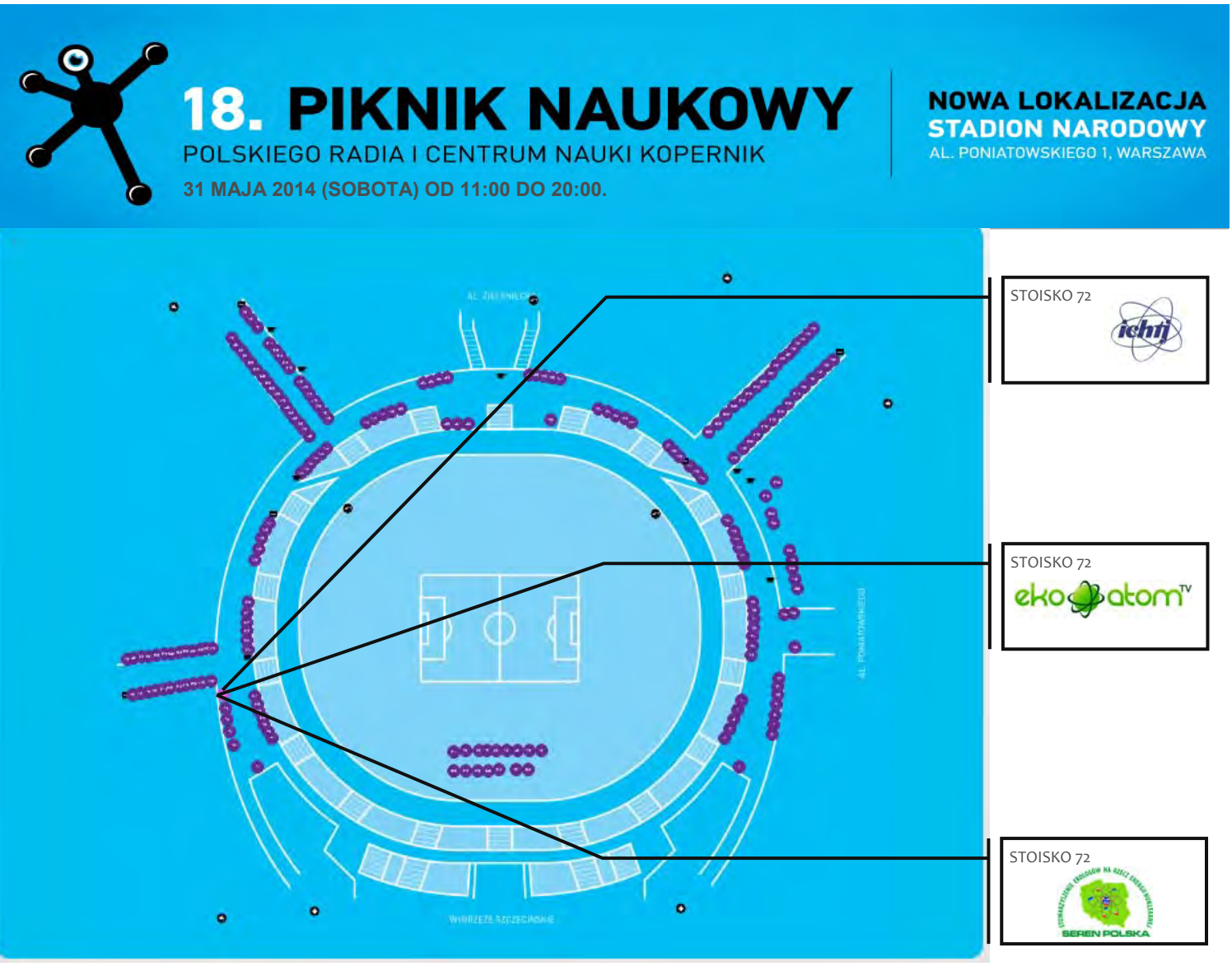
włokowego liczba nukleonów pozwala na całkowite wypełnienie powłok, nazywamy jądrami magicznymi. Istnieje także pojęcie liczb magicznych odnoszących się do „magicznej" liczby protonów lub neutronów (Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, …), lub liczb magiczno-magicznych, dla magicznej liczby zarówno protonów jak i neutronów (A = 4, 16, 40, 48, 132, 208, …). Wyjaśnienie zagadki występowania jąder magicznych to niewątpliwy sukces modelu powłokowego (patrz Rys. 1).

Model powłokowy tłumaczy także wiele innych zjawisk, jak jądra wzbudzone czy magnetyczny rezonans jądrowy, jednakże chętnych do zgłębienia szczegółów zachęcam do zapoznania się z literaturą fachową.

Modele kolektywne

Wraz z rozwojem teorii jądra atomowego oraz zwiększeniem się dostępnych danych eksperymentalnych, liczba modeli stale rosła. Istnieje w związku z tym grupa modeli bardziej zaawansowanych, które nazywamy ogólnie modelami kolektywnymi. Ich podstawowym założeniem jest, iż nukleony w jądrach łączą się w grupy, kolektywy, gdzie opisuje się ruchy całych tego typu zespołów. Jednym z tego typu modeli jest tzw. model oddziałujących bozonów, gdzie zakłada się oddziaływanie między sobą par nukleon-nukleon, stanowiących cząstkę zwaną bozonem (nie ogranicza ich zakaz Pauliego zarezerwowany dla fermionów – pojedynczych nukleonów). Innym przykładem jest model traktujący jądro jako zbiór cząstek α, czyli 2 protonów i 2 neutronów (wspomniane już mocno związane jądro helu). Istnieje też model traktujący każdą zamkniętą powłokę nukleonową (w myśl modelu powłokowego) jako osobną sub-cząstkę wewnątrz jądra.

Modele kolektywne czerpią ze wszystkich pozostałych modeli, lecz mimo wszystko podstawowym wykładnikiem jest tu model powłokowy. Co najważniejsze, modele kolektywne tłumaczą wiele zjawisk do tej pory niewyjaśnionych, takie jak deformacje jąder, drgania powierzchni jądrowej, rotacje jąder etc. Mimo wszystko każdy model, nawet najlepszy, jest zawsze tylko pewnym przybliżeniem rzeczywistości. Miejmy jednak nadzieję, iż któregoś dnia uda nam się dokładnie opisać jądro atomowe. Niewątpliwie jest ono fascynującym obiektem.



Chińska energetyka jądrowa

droga do wzrostu gospodarki i redukcji CO_2

Jerzy Chmielewski

Wstęp

Chińska Republika Ludowa zajmuje pierwsze miejsce na świecie pod względem liczby ludności (1.347.000.000), trzecie pod względem powierzchni (9.596.960 km^2) oraz drugie pod względem PKB (7.298.147 mln USD). Chiny są najszybciej rozwijającą się gospodarką narodową świata, osiągającą średnie tempo wzrostu 10% rocznie przez ostatnich 30 lat, przy inflacji ca 4,9%. Jest też największym eksporterem na świecie i drugim pod względem wielkości importerem.

Jednym z kluczowych czynników, umożliwiających szybki rozwój gospodarczych Chin, jest produkcja energii elektrycznej. Kolejnymi obszarami są: budowa sieci komunikacyjnych z transportem szynowym, lotnisk i transportu lotniczego oraz szereg innych. W roku 2010 na trasie pomiędzy Pekinem i Szanghajem osiągnięta została rekordowa szybkość pociągu wynosząca 486 km/godz. Pod koniec roku 2011 na szlakach kolejowych o długości 13.073 km pociągi jeździły z prędkością 200 km/h. Przewiduje się, że w roku 2020 będzie funkcjonował system szybkiej kolei elektrycznej o łącznej długości 16.000 km. (Dla porównania warto podać, że "Wielki Mur Chiński" ma długość ok. 6.000 km.)

Na większości obszaru Chin energia elektryczna, jest uzyskiwana głównie z paliw kopalnych (wg danych z 2006 r.: 80% z węgla, 2% z ropy naftowej, 1% z gazu ziemnego), oraz z hydroelektrowni (15%). Jedynie ok. 1,4% produkowanej energii pochodzi z elektrowni jądrowych. Ponad 40% energii przypada na północno-wschodnie i wschodnie Chiny.

Wzrost produkcji energii elektrycznej w Chinach obrazuje poniższe zestawienie:

Największe elektrownie cieplne znajdują się w Szanghaju, w pobliżu zagłębi węglowych oraz regionie Pekin-Tiencin-Tangshan. Elektrownie wodne są natomiast skupione głównie w górnych biegach rzek Huang He i Han Shui oraz na rzece Hongshui He oraz na małych rzekach górskich w prowincji Fujian. W północno-wschodnich Chinach mieszczą się liczne małe hydroelektrownie, obsługujące pobliskie wsie i miasta. Ostatnio rozpoczęto realizację dwóch dużych projektów: elektrowni na Zaporze Trzech Przełomów o rekordowej mocy 18,2 GWe oraz elektrowni na Rzece Żółtej o mocy15,8 GWe. W raporcie opublikowanym przez Państwową Komisję d/s Rozwoju i Reform (NDRC) podano, że w Chinach w roku 2012 moc elektrowni wiatrowych została zwiększona o 15 GWe, a elektrowni słonecznych o 3 GWe. Pozwala to oczekiwać, że zostaną osiągnięte cele wytyczone na rok 2013 zakładające: zwiększenie mocy hydroelektrowni o 21 GWe, elektrowni wiatrowych o 18 GWe oraz słonecznych o 10 GWe. W roku 2014 ma być zainstalowane dodatkowe 12 GWe mocy w elektrowniach PV.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną wzrosło w ciągu roku 2012 zaledwie o 5,5% do 4.900 TWh, a przewidywany wzrost w roku 2013 wynosi 6,5% - 8,5%. Na koniec roku 2012 łączna moc zainstalowana elektrowni wyniosła 1.145 GWe, co oznacza wzrost o 19% w ciągu dwóch lat. Warto zauważyć, że wzrost ten

następuje przy wymuszonym zamykaniu małych lokalnych elektrowni o niskiej sprawności i znacznej szkodliwości dla środowiska naturalnego. Przewiduje się w związku z tym, że dalszy wzrost mocy zainstalowanej ulegnie pewnemu spowolnieniu, do poziomu około 1.600 GWe w roku 2020 oraz 2000 GWe w roku 2025.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że w Chinach w szybkim tempie rozbudowywana jest sieć elektroenergetyczna, do której podłączone są w szczególności największe hydroelektrownie. Upowszechnianie energetyki wiatrowej będzie w dużym stopniu uwarunkowane możliwościami podłączenia wiatraków do sieci przesyłowych. Problemami tymi zajmują się dwa przedsiębiorstwa państwowe: State Grid Corporation of China (SGCC) oraz China Southern Power Grid Co (CSG). W sieciach, których długość ma w 2015 roku osiągnąć 40.000 km, wykorzystywane są linie przesyłowe najwyższych napięć 1.000 kV AC oraz 800 kV DC. Przewiduje się ponadto zmniejszenie strat przesyłowych z obecnych 6,6% do 5,7% w roku 2020.

Wykorzystanie alternatywnych metod produkowania energii elektrycznej prawdopodobnie będzie dość ograniczone z uwagi na nieregularną dyspozycyjność elektrowni wiatrowych, czy słonecznych z jednej strony, oraz wysokie koszty możliwych do realizacji metod magazynowania energii w okresach nadwyżki jej produkcji w celu jej udostępniania w okresach zwiększonego zapotrzebowania na energię - z drugiej strony. Na ograniczenia te składa się również brak sieci rozwiniętej elektroenergetycznej

Rosnące zapotrzebowania na energię elektryczną, wytwarzaną z konwencjonalnych paliw kopalnych, prowadzi do wzrostu zanieczyszczenia atmosfery. Wobec ogromnej ogólnoświatowej presji na ograniczanie, a docelowo na niemal całkowite wyeliminowanie emisji gazów cieplarnianych powstających w elektrowniach konwencjonalnych zrozumiałe jest, że z tych względów w Chinach zintensyfikowano prace zmierzające do wdrażania energetyki jądrowej. Większe zaangażowanie Chin w opanowywanie pełnego cyklu technologii jądrowej, włącznie z niezbędną do tego bazą produkcyjną wskazuje ponadto na zamiar pojawienia się na globalnym rynku energetyki jądrowej w charakterze jednego z jej głównych partnerów.

Intensyfikacja wdrażania energetyki jądrowej

Rząd ChRL wydał 24 października 2012 roku Białą Księgę poświęconą sprawom polityki energetycznej. Dokument ten przewiduje zwiększenie w energetycznym "miksie" udziału energii "nisko-węglowej", uzyskiwanej z paliw kopalnych oraz z innych paliw, a także promowanie wykorzystania węgla w sposób efektywny i nie powodujący zanieczyszczenia środowiska. Chiny zamierzają więcej inwestować w innowacyjne technologie, do jakich zaliczana jest także energetyka jądrowa, oraz większą wagę będą przywiązywać do spraw szkolenia potrzebnych do tego kadr.

W 2015 roku moc zainstalowana elektrowni jądrowych ma osiągnąć 40 GWe, w dziedzinie energetyki wiatrowej 100 GWe oraz w zakresie energetyki słonecznej ma przekroczyć 21 GWe (pokrywając przy tym przeznaczony na ten cel obszar o powierzchni 400 milionów metrów kwadratowych).

Za początek zainteresowania Chin "atomem" można uznać koniec lat 1950-tych i początek 1960-tych, gdy przy wydatnej pomocy b. ZSRR uruchomiono wzbogacanie uranu i uzyskiwanie plutonu. Za kluczowy moment można uznać dzień 16 października 1964 r., kiedy to na poligonie Lop Nor na pustyni Takla Makan dokonano eksplozji urządzenia "569". Do połowy roku 1996 przeprowadzono ogółem 45 próbnych eksplozji jądrowych (w tym 22 podziemne).

W latach 1970-tych podjęto działania zmierzające do pokojowego wykorzystania energii jądrowej, w szczególności dla potrzeb energetyki. W 1994 roku uruchomiono elektrownię o mocy 944 MWe z wysokociśnieniowym reaktorem francuskim M310 (Framatome, EDF) oraz drugą o mocy 298 MWe z reaktorami CNP -300 własnej konstrukcji. Elektrownie te są nadal eksploatowane.

W grudniu 2011 r. państwowy urząd odpowiedzialny za sprawy energetyki - National Energy Administration (NEA) potwierdził zapowiedź chińskiego organu d/s planowania NDRC (National Development and Reform Commission), że w ciągu najbliższych 10 - 20 lat energetyka jądrowa stanie się fundamentem powiększając w tym okresie zdolności produkcyjne energetyki o 300 GWe. We wrześniu 2013 r. Państwowa Korporacja Energetyki Jądrowej SNPTC (State Nuclear Power Technology Corporation) oszacowała, że do 2015 roku potrzeba będzie budować 4 - 6 nowych bloków rocznie, a następnie w czasie 13-go 5-Letniego Planu (2016 - 2020) 6 - 8 bloków, zaś po roku 2020 liczba nowych bloków ma wzrastać w ilości do 10 bloków rocznie.

Przewiduje się zatem, że do roku 2020 nastąpi czterokrotny wzrost mocy elektrowni jądrowych do 58 GWe, a następnie do 200 GWe w roku 2030 oraz do 400 GWe w 2050 r. Podstawą aktualnej polityki Chin w

dziedzinie energetyki jądrowej jest wdrażanie pełnego zamkniętego cyklu paliwowego oraz maksymalne wykorzystywanie zachodniej technologii przy jednoczesnym jej doskonaleniu. Ponadto w perspektywie przewiduje się, że w skali globalnej będzie możliwy kompleksowy eksport technologii jądrowej, włącznie z dużymi urządzeniami.

Działające elektrownie jądrowe

N.B. - Eksperymentalny reaktor CEFR (China Experimental Fast Reactor) o mocy 20 MWe jest również podłączony do sieci elektroenergetycznej

Obecnie w Chinach w trakcie budowy jest 29 reaktorów jądrowych z ogólnej liczby 88 zaplanowanych. Łączna moc tych reaktorów ma wynosić 91.600 MWe. Perspektywiczne plany, nie konkretyzujące jednak terminów budowy, przewidują dalsze 148 bloków o łącznej mocy ponad 153.000 MWe. Dla porównania można podać, że obecnie w skali całego świata zainstalowanych jest 437 bloków o łącznej mocy zainstalowanej 372.613 MWe.

Dążąc do promowania stabilnego rozwoju energetyki jądrowej oraz aby pokierować inwestycjami w tym sektorze NDRC ustaliła w lipcu 2013 r. cenę hurtową 7 US centów/kWh dla wszystkich nowych projektów jądrowych. Cena ma być utrzymywana na stosunkowo niezmiennym poziomie, ale może być dostosowywana stosownie do postępu technicznego i czynników rynkowych. Energia jądrowa już jest konkurencyjna, bowiem cena hurtowa dla sieci elektroenergetycznej jest niższa od ceny energii uzyskiwanej z elektrowni opalanych węglem i wyposażonych w instalacje odsiarczania gazów spalinowych.

Rysunek 1. Reaktory w kontynentalnej części Chin.

Aktualnie na terenie Chin w jedenastu elektrowniach działa 19 reaktorów jądrowych o łącznej mocy 17,13 GWe, co pozwala zaspokoić około 1,85% zapotrzebowania kraju na energię elektryczną. *(Patrz załączona tabela.)* W trakcie budowy jest 28 reaktorów o łącznej mocy ok. 30.000 MWe, a następne 34 bloki czeka na rozpoczęcie budowy w latach 2014 - 2018. Powstrzymano prace nad dalszymi 20 zaplanowanymi blokami do późniejszych decyzji.

Energetyka jądrowa odgrywa szczególną rolę w przypadku rejonów nadmorskich, gdzie gospodarka rozwija się żywiołowo, a które są odległe od złóż węglowych. Hydroelektrownie i elektrownie wiatrowe znajdują się najczęściej w odległych rejonach, uwarunkowanych korzystnie pod względem topograficznym. Ogólnie mówiąc - elektrownie jądrowe powinny być budowane przede wszystkim w tych miejscach, gdzie występuje największy popyt na energię elektryczną.

Intensyfikując plany wdrażania energetyki jądrowej, co nastąpiło na początku obecnego XXI wieku, Chiny nastawiły się na wykorzystywanie w tym celu technologii opracowanych we Francji, Kanadzie i Rosji. Najnowsze technologie uzyskano ostatnio z Francji i USA (za pośrednictwem firmy Westinghouse, należącej do japońskiej Grupy Toshiba).

Wydarzenia w Fukushimie spowodowały spowolnienie pierwotnych planów rozwoju energetyki jądrowej oraz re-ewaluację projektów pod kątem zwiększenia bezpieczeństwa obiektów jądrowych. Przedmiotem szczególnego zainteresowania są zatem najbardziej nowoczesne rozwiązania, takie jak np. reaktory EPR i AP1000, które uzyskały już akceptację organów dozoru jądrowego w Europie i USA. Uważa się, że te rozwiązania będą wielokrotnie bezpieczniejsze od istniejących i eksploatowanych elektrowni jądrowych, w których reaktory bazują na rozwiązaniach konstrukcyjnych z lat 1950 - 1960.

Technologie reaktorowe

Nowo budowane elektrownie jądrowe mają mieć znacznie udoskonalone i bardziej niezawodne systemy bezpieczeństwa, przy czym koszty ich budowy powinny maleć w miarę nabywania i gromadzenia doświadczeń oraz doskonalenia metod i technologii. Chińscy inżynierowie i specjaliści są w pełni świadomi wymagań, jakie stawiają przed nimi tak odpowiedzialne zamierzenia i plany.

W lutym 2012 roku National Energy Administration (NEA), jako organ odpowiedzialny za sprawy energetyki, zainicjowała szereg projektów naukowo-badawczych mających na celu udoskonalenie technologii dotyczących bezpieczeństwa oraz pozwalających zapewnić zdolność do reagowania na nieprzewidywane, wykraczające poza projektowe założenia wypadki w krajowych elektrowniach jądrowych. Uruchomiono 13 projektów, prowadzonych przez CNNC (China National Nuclear Group), CGN (China General Nuclear Power Group) oraz INET (Institute of Nuclear and New Energy Technology) na Uniwersytecie Tsinghua, które miały być zrealizowane do końca 2013 roku. Projekty te obejmują opracowanie awaryjnych źródeł energii i systemów wody chłodzącej, pasywnych systemów chłodzenia obudowy bezpieczeństwa, urządzeń kontrolujących emisje wodoru oraz środków zapobiegawczych mających na celu ograniczanie skutków wypadków z paliwem wypalonym, a także analizę wpływu wielu równocześnie zachodzących zewnętrznych wydarzeń, łącznie ze sposobami reagowania na takie sytuacje. Odrębne projekty dotyczą monitorowania zanieczyszczeń gleby i wód gruntowych oraz generalnych zasad postępowania w sytuacjach awaryjnych.

W procesie wdrażania energetyki jądrowej w Chinach przyjęto następujące kluczowe założenia:

- głównym, choć nie jedynym, typem reaktora będą reaktory wodny wysokociśnieniowe PWR;

- elementy paliwowe dla reaktorów jądrowych mają być produkowane w Chinach;

- zmaksymalizowana będzie krajowa produkcja urządzeń i wyposażenia dla elektrowni oraz ich budowa, w oparciu o własne projekty i zarządzanie ich realizacją;

- współpraca międzynarodowa ma być promowana i systematycznie rozszerzana.

W dziedzinie techniki jądrowej Chiny prowadzą szeroką współpracę międzynarodową od wielu lat. Jedna z pierwszych elektrowni jądrowych była budowana w Chinach przez francuską firmę Framatom, wykorzystującą technologię amerykańskiego Westinghouse'a.

Oficjalnie nie podano jeszcze, jaka będzie główna baza technologiczna przyszłych reaktorów, jednakże wiele wskazuje na to, że wysokim priorytetem zostaną objęte wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem oraz reaktory na prędkich neutronach.

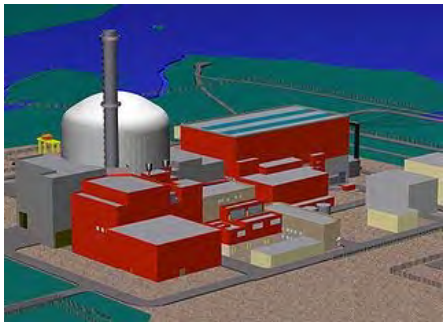
Niezależnie od oficjalnie głoszonej tezy o samowystarczalności Chin w dziedzinie energetyki jądrowej i związanego z nią przemysłu, w praktyce można zauważyć różne podejścia do tych zagadnień. Toczy się "swoista walka" pomiędzy CNNC (China National Nuclear Corp.), która forsuje krajowe technologie, a SNPTC (State Nuclear Power Technology Corp.) faworyzującą technologie z importu. SNPTC zaproponowała realizację w Sanmen i Haiyang elektrowni jądrowych o mocy ponad 1000 MWe, wykorzystujących technologię trzeciej generacji wywodzącą się z rozwiązania AP1000 firmy Westinghouse. Westinghouse dał zgodę na przekazanie swojej technologii dla pierwszych czterech bloków AP1000 tak, aby następne SNPTC mogła budować samodzielnie. Przewiduje się, że do wielu opracowywanych reaktorów oprzyrządowanie kontrolno-pomiarowe i systemy bezpieczeństwa będą dostarczane przez firmy Siemens i Areva.

EPR - Francuska firma Areva (nb. wywodząca się z Framatome) buduje dwa reaktory EPR o mocy 1660 MWe w miejscowości Taishan. Planowana jest budowa dwóch następnych. Pod koniec 2008 roku Areva i CGN (wtedy CGNPC) utworzyły

"Joint Venture" mające na celu rozwój technologii EPR, a także innych technologii PWR w Chinach i, ewentualnie, zagranicą. Rozwija się również współpraca firmy Areva z innymi organizacjami chińskimi.

AP 1000, CAP 1000 - Reaktor AP1000 firmy Westinghouse, o mocy brutto 1250 MWe z dwoma pętlami chłodzenia, jest traktowany jako baza dla technologii reaktorów III generacji. Chińska wersja tego reaktora oznaczana jest jako CAP1000. Reaktory składane z modułów mają być produkowane w sąsiedztwie przewidywanej lokalizacji elektrowni. Cykl budowy zakłada 50 miesięcy od momentu wylania pierwszego betonu do załadowania paliwa. Podłączenie do sieci ma następować po upływie 6 miesięcy.

CAP 1400 - W 2008 r. Westinghouse współpracuje z SNPTC (State Nuc-



EPR— 1600 MWe

lear Power Technology Corporation) i SNERDI (Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institut) nad projektem o nazwie "Large Advanced Passive PWR Nuclear Power Plant" (LPP albo APWR). Jest to jeden z 16-tu kluczowych ogólnonarodowych projektów w Chinach, który być może stworzy perspektywy eksportu takich bloków zagranicę.

CNP-1000 oraz CNP-600, CNP-300 (ACP300, ACP600, ACP1000) - od wczesnych lat 1990-tych CNNC współpracuje z firmami Westinghouse i Framatome (obecnie jest to Areva) nad opracowaniem standardowej kon-

Szkolenie chińskich specjalistów na reaktor AP— 1000 Westinghouse

strukcji chińskiego wysokociśnieniowego reaktora wodnego CNP-1000 z trzema pętlami chłodzenia. Od początku 2007 roku program modernizacji AP1000 prowadzi instytut SNERDI w Szanghaju. CNNC zmierza do opracowania własnej unowocześnionej wersji całej rodziny reaktorów III generacji o różnej mocy (CNP-600, CNP-300) dla potrzeb krajowych i na eksport.

ACP 100 - to niewielki reaktor typu PWR o mocy 100 MWe, będący jednym z kluczowych projektów 12-go Pięcioletniego Planu. Ten wielozadaniowy, małogabarytowy modularny reaktor ACP100 jest opracowywany pod nadzorem CNNC. Wstępny projekt reaktora powinien być gotów w 2013 r., a rozpoczęcie jego budowy, która ma trwać 36 - 40 miesięcy przewidywane jest w roku 2014 r. Projektowy okres eksploatacji reaktora ma wynosić 60 lat.

CAP 150 - ten niewielki modularny reaktor typu PWR jest opracowywany przez SNERDI równolegle z modelami CAP1000 i CAP1400 wykorzystując sprawdzone rozwiązania konstrukcyjne. Przewidziany jest on jako źródło energii elektrycznej i ciepła, instalowane w oddalonych miejscowościach, które mogą być narażone na wstrząsy sejsmiczne o sile 300 Gal (1 Gal = 1 cm/s^2). Projektowy okres eksploatacji reaktora ma wynosić 80 lat.

CAP-FNPP - to kolejny projekt SNERDI, który dotyczy niskotemperaturowego (250 °C) reaktora o mocy zaledwie 40 MWe, przeznaczonego specjalnie dla jednostek pływających "FNNP" (Floating Nuclear Power Plant). Przewiduje się 5-letni cykl wymiany paliwa.

CPR-1000, ACPR1000, małe **ACPR**'y - Reaktor CPR-1000 jest znacznie zmodernizowaną wersją francuskiego reaktora M310 o mocy 900 MWe. Projektowy okres eksploatacji ma wynosić 60 lat. Technologia ta, oznaczana jako "generacja II+" była importowana do Chin w latach 1980-tych i dla jej potrzeb stworzono własną bazę produkcyjną. Z uwagi na fakt, że większość rozwiązań dotyczy własności intelektualnej należącej do firmy Areva to możliwości eksportowe w tym zakresie mogą być ograniczone.

Istotnego znaczenia nabiera uruchomiony w listopadzie 2011 roku przez Grupę Przedsiębiorstw Energetyki Jądrowej (CGN) projekt reaktora o nazwie Advanced CPR (ACPR1000), zapewniającego bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa oraz spełniającego międzynarodowe normy i wymagania. Rozwiązania przewidywane w tym projekcie są już wykorzystywane w przypadku niektórych realizowanych inwestycji. W styczniu 2012 roku CGN zawarła z firmami Areva i EdF porozumienie o partnerstwie w sprawie opracowania reaktora III generacji na bazie CPR1000. CGN prowadzi ponadto prace nad małymi, modułowymi rozwiązaniami ACPR50 i ACPR140 z pasywnym chłodzeniem.

VVER - Rosyjski Atomstroyexport był generalnym wykonawcą i dostawcą urządzeń dla elektrowni jądrowych Tianwan 1&2, wykorzystujących wersję V-428 dobrze sprawdzonego reaktora VVER - 1000 o mocy 1060

MWe. W 2013 r. Atomenergoproekt zaoferował CNNC reaktor VVER-

Reaktory VVER –1000 TOI

TOI (typowy-optymalizowany-zinformatyzowany), należący do generacji III+, który ma być budowany w ciągu 40 - 48 miesięcy przy kosztach niższych o 17%. Uzyskanie wymaganych certyfikatów spodziewane jest w roku 2015.

CANDU - We wrześniu 2005 roku

Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) podpisała porozumienie z CNNC, otwierające możliwość dostawy ciężko-wodnych reaktorów Candu -6 dla elektrowni Quinshan Phase III.

HTR - w lutym 2006 roku Rada Państwa zakwalifikowała małe, wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem (HTR), na drugim miejscu pod względem priorytetu wśród najważniejszych narodowych projektów w dziedzinie nauki i technologii w planach na okres najbliższych 15 lat. Celem jest zbadanie przede wszystkim opcji dotyczącej skojarzonej produkcji energii, a następnie produkcji wodoru. Niewielkie bloki HTR-PM o mocy 200 MWe z rdzeniem usypanym z kulek paliwowych ("peeble bed"), chłodzone helem, będą podobne do konstrukcji opracowanej w Afryce

CANDU—6 Qinshan NPP, Haiyan County

Południowej. Rozwiązanie ma bazować na własnych możliwościach, aczkolwiek mogą pojawić się całkiem nowe cechy techniczne.

FNR - Reaktory na szybkich neutronach są przez CNC widziane w dłuższej perspektywie jako jedna z podstawowych technologii. Chiński eksperymentalny reaktor na prędkich neutronach o mocy 65 MWt (CEFR - Chinese Experimental Fast Reactor) został uruchomiony pod Pekinem w lipcu 2010 r. i rok później został podłączony do sieci elektroenergetycznej. Na tej podstawie opracowano projekt koncepcyjny reaktora o mocy 600 MWe. Najnowsze plany przewidują opracowanie własnej konstrukcji reaktora CDFR (Chinese Demonstration Fast Reactor, Project 1) o mocy 1000 MWe, a następnie rozpoczęcie jego budowy w 2017 oraz uruchomienie w 2023 roku. Następnym etapem ma być budowa reaktora CFR1000, który miałby być wprowadzony do eksploatacji w 2030 roku. Trzeba dodać, że porozumienie zawarte z Rosją w październiku 2009 przewiduje dostarczenie technologii BN-800, co jest określane jako CDFR, Project 2. Budowa tego typu reaktora miała się rozpocząć w Sanming (Prowincja Fujian) w roku 2013 z przewidywanym terminem uruchomienia w roku 2019. Niestety negocjacje cenowe opóźniają ten projekt.

W styczniu 2011 roku Chińska Akademia Nauk CAS (Chinese Academy of Sciences) uruchomiła priorytetowy program badawczy "Advanced Fission Energy Program", poświęcony dwóm zasadniczym wyzwaniom naszych czasów: długotrwałemu zapewnieniu dostaw paliwa jądrowego oraz trwałemu zagospodarowaniu paliwa wypalonego.

Program ten obejmuje dwa projekty:

- TMSR (Thorium Molten Salt Reactor), oraz
- ADS (Accelerator driven sub-critical system).

Instytut Fizyki Stosowanej w Szanghaju zamierza w ciągu 5-ciu lat zbudować reaktor eksperymentalny o mocy 2 MW z chłodziwem w postaci roztopionej soli. W tym celu utworzony już został wydzielony ośrodek badawczy "TMSR Center" zatrudniający 140 naukowców z tytułem "PhD", którym kieruje Jiang Mianheng, syn byłego przywódcy państwa Jiang Zemina.

Projekt TMSR przewiduje wykorzystanie z pośrednictwem roztopionej soli toru jako źródła dostępnej energii. Opracowywana technologia budowy tego rodzaju reaktorów ma na celu zapewnienia stałych dostaw paliwa jądrowego poprzez dywersyfikację źródeł tego paliwa. Zgodnie z tym projektem około roku 2035 ma być zbudowany prototypowy reaktor chłodzony roztopioną solą o mocy 1000 MWe oraz eksperymentalny reaktor z ciekłym paliwem, chłodzony roztopioną solą, o mocy 100 MWe. Ponadto mają być opanowane technologie wytyczające drogę do komercjalizacji systemów energetyki jądrowej bazujących na paliwie torowym.

Projekt ADS (Accelerator driven sub-critical system), czyli podkrytyczny zestaw wykorzystujący akcelerator, to ważne podejście do rozwiązania problemu długożyciowych wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Nad tym zagadnieniem prowadzone są prace w wielu krajach. Eutektyczna mieszanina ciekłego ołowiu i bizmutu LBE (Liquid Lead-Bismuth Eutectic) posiada szereg unikalnych właściwości jądrowych, termofizycznych i chemicznych, które czynią z LBE chłodziwo nadające się dla podkrytycznych reaktorów ADS. Trze-

ba dodać, że ołów i bizmut pod wpływem bombardowania protonami o wysokiej energii mogą wytwarzać duże ilości spalacyjnych neutronów.

Baza technologiczna dla przyszłych reaktorów energetycznych nie została wprawdzie oficjalnie określona, jednakże w chwili obecnej dominują dwa podstawowe rodzaje rozwiązań konstrukcyjnych: CPR-1000 oraz AP-1000. Oprócz wymienionych typów wysoki priorytet przyznano wysokotemperaturowym reaktorom chłodzonym gazem oraz reaktorom na szybkich neutronach.

Odnośnie reaktorów CPR-1000, które są budowane w wielu miejscach, Państwowa Agencja Energetyki (NEA) stwierdziła co następuje: "Wprowadzanie tych przedsięwzięć w naszym kraju znacznie zwiększy bezpieczeństwo technologii elektrowni jądrowych z reaktorami generacji II+, oraz w poważnym stopniu zmniejszy częstotliwość uszkodzeń rdzenia i niekontrolowanych uwolnień (substancji radioaktywnych), tak aby odpowiadały uznanym w skali międzynarodowej poziomom, wymaganym dla reaktorów III generacji". Rezultatem tych prac jest konstrukcja reaktora ACC-1000.

Przedstawione powyżej zestawienie typów reaktorów świadczy o tym, że w Chinach prowadzona jest drobiazgowa analiza większości znanych metod i technologii wykorzystywania energii jądrowej, ukierunkowana na długofalowe zapewnienie źródeł energii dla szybko rozwijającej się gospodarki. Pod tym kątem prowadzone są w szczególności prace nad wykorzystaniem toru w roli paliwa jądrowego.

Z formalnego punktu widzenia procedura wydawania zezwoleń w Chinach dla nowych obiektów jądrowych przewiduje trzy etapy:

- Studium dotyczące lokalizacji i wykonalności ("feasibility study") z zatwierdzeniem projektu elektrowni jądrowej przez NDRC;

- Realizacja budowy obiektu wymaga przede wszystkim "zezwolenia na budowę" a następnie zezwolenia na załadowanie paliwa, wydawanych przez NNSA;

- Przekazanie do eksploatacji jest podstawą do uzyskania od NNSA zezwolenia na eksploatację elektrowni jądrowej.

Fakt, że projektowanie, a następnie realizacja elektrowni jądrowych oraz produkcja urządzeń i wyposażenia dla nich ma w maksymalnym stopniu polegać na własnym potencjale naukowo-produkcyjnym Chin, posiada zasadnicze znaczenie. Władze zwracają również wiele uwagi na pilną potrzebę kształcenia kadr dla tej rozwijającej się żywiołowi gałęzi gospodarki. Trzeba przyznać, że perspektywiczne plany rozwoju energetyki jądrowej w Chinach są niezwykle ambitne i imponujące.

Będąc mocarstwem jądrowym Chiny przystąpiły w 1992 roku do traktatu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej NPT (Nuclear Non-Proliferation Treaty), i przestrzegają jego postanowień. W 1984 roku Chiny wstąpiły do Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej IAEA (International Atomic Energy Agency), w 1996 r. podpisały Konwencję dotyczącą bezpieczeństwa jądrowego, a pod koniec roku 1998 podpisały Protokół Dodatkowy który nabrał mocy w 2002 r. W maju 2004 roku Chiny dołączyły do Grupy Państw Dostawców Techniki Jądrowej NSG (Nuclear Suppliers Group), która z założenia przestrzega zasad "safeguardu". Wszystkie elektrownie jądrowe importowane z Francji, Kanady, czy Rosji, a także rosyjskie wyposażenie dla zakładu wzbogacania uranu w Shaanxi, podlegają przepisom IAEA w zakresie "safeguardu". Chiny zawarły ponadto dwustronne porozumienia w sprawach bezpiecznego i pokojowego wykorzystywania energii jądrowej z szeregiem krajów: Australią, Francją, Kanadą, Niemcami i Stanami Zjednoczonymi.

W załączniku poniżej podajemy dla informacji zestawienie najważniejszych instytucji rządowych i organizacji zaangażowanych w realizację programu rozwoju całego kompleksu energetyki jądrowej w Chinach

Wybrane najważniejsze organizacje rządowe, związane z wdrażaniem energetyki jądrowej w Chinach

China Atomic Energy Authority (CAEA) - Urząd Energii Atomowej Chin, odpowiada za planowanie i zarządzanie sprawami pokojowego wykorzystania energii jądrowej oraz promowanie współpracy międzynarodowej. Odpowiada ponadto za bezpieczeństwo materiałów jądrowych i w tym zakresie współpracuje z Międzynarodową Agencją Energii Atomowej (IAEA) pod nadzorem Ministerstwa Bezpieczeństwa Publicznego.

National Development and Reform Commission (NDRC) - Państwowa Komisja d/s Rozwoju i Reform jest makroekonomiczną agencją podległą bezpośrednio Radzie Państwa, która odpowiada za ocenę i zatwierdzanie najważniejszych projektów, a także decyduje które z największych projektów należy prowadzić i kiedy.

National Energy Commission (NEC) i **National Energy Administration (NEA)** - W marcu 2008 roku zostały powołane: Państwowa Komisja d/s Energetyki (NEC) oraz Państwowy Urząd d/s Energetyki. Komisja (NEC) ma być ciałem doradczym rządu, natomiast NEA ma

zarządzać sektorem energetyki i wdrażać politykę wyznaczoną przez NEC. Kombinacja NDRC - NEC - NEA widziana jest jako kompromis polityczny i alternatywa dla Ministerstwa Energetyki z wyraźniej określonym zakresem zadań i pełnomocnictw.

National Nuclear Safety Administration (NNSA) - Państwowy Urząd d/s Bezpieczeństwa Jądrowego podlegający CAEA, został utworzony w 1984 roku jako niezależny organ przyznający licencje i sprawującya nadzór nad bezpieczeństwem jądrowym, a także odpowiadający za porozumienia międzynarodowe w sferze bezpieczeństwa jądrowego.

Ministry of Environmental Protection (MEP) - Ministerstwo Ochrony Środowiska podlega bezpośrednio Radzie Państwa i odpowiada za monitoring sytuacji radiacyjnej w kraju i gospodarkę odpadami promieniotwórczymi, a także administruje NNSA.

Ministry of Science and Technology (MOST) - Ministerstwo Nauki i Technologii odpowiada za planowanie najważniejszych projektów naukowo-badawczych w dziedzinie energii jądrowej.

China New Energy Corporation (CNNC) - Korporacja Nowych Rodzajów Energii zajmuje się promowaniem technologii "małych reaktorów jądrowych", przewidywanych do wykorzystania w przemyśle, odsalania wody morskiej oraz dla potrzeb energetyki. Podlega mu Research Institute for Nuclear Power Operations (RINPO), który zajmuje się badaniami operacyjnymi i usługami technicznymi w zakresie energetyki jądrowej, a także prowadzi inspekcje działających obiektów i ocenia ich działalność.

State Nuclear Power Technology Corporation (SNPTC) - Państwowa Korporacja Technologii Energetyki Jądrowej została utworzona w 2004 roku i powierzono jej sprawy wyboru technologii dla nowych elektrowni oferowanych przez firmy zagraniczne, współpracując przy tym z innymi organizacjami państwowymi i korporacjami.

State-owned Assets Supervision & Administration Commission (SASAC) - Komisja d/s Nadzorowania i Zarządzania Zasobami Państwowymi, powołana w 2003 roku, odpowiada w imieniu rządu centralnego w charakterze inwestora za państwowe zasoby. Jej działalność ma na celu restrukturyzację państwowej gospodarki i przyśpieszenie reform dotyczących przedsiębiorstw państwowych, które mają decydujący wpływ na rozwój energetyki jądrowej.

China Nuclear Energy Association (CNEA) - Chińskie Stowarzyszenie Energii Jądrowej zostało utworzone w 2007 roku w uzgodnieniu z władzami państwowymi jako stowarzyszenie handlowe. Należy do niego ponad 300 przedsiębiorstw działających na tym polu.

China General Nuclear Power Group (CGN) - Chińska Generalna Grupa Energetyki Jądrowej, nadzorowana przez SASAC, odgrywa wiodącą rolę w prowincji Guangdong, obejmując około 20 przedsiębiorstw energetycznych o łącznej zdolności produkcyjnej 7200 MWe.

China Nuclear Industry Alliance (Union) - Unia Chińskiego Przemysłu Jądrowego została w styczniu 2014 r. utworzona przez CNNC, CGN, SNPTC oraz szereg innych jednostek wspierających jako "samorządowa organizacja przemysłowa", mająca na celu promowanie synergii w działaniu oraz eliminowanie szkodliwej i niestosownej konkurencji na rynkach eksportowych. Unia ma działać w ścisłym kontakcie z NEA, Ministerstwem Spraw Zagranicznych i Handlu, SASAC oraz NNSA.

Źródła:

http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/

http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Appendices/Nuclear-Power-in-China-Appendix-1--Government-Structure-and-Ownership/

World Nuclear Association

Representing the people and organisations of the global nuclear enterprise

PROBLEMY BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYKI JĄDROWEJ I PERSPEKTYWY JEJ ROZWOJU W POLSCE

Jan Składzień

Streszczenie

Opracowanie przedstawia przegląd zagadnień związanych z energetyką jądrową i jej bezpieczeństwem - historię reaktorów jądrowych, ewolucję reaktorów energetycznych oraz ich nowe generacje, aspekty bezpieczeństwa. Przedstawione zostały także perspektywy rozwoju energetyki jądrowej w Polsce.

Summary

The article presents a review of issues concerning nuclear power and its safety - the history and evolution of nuclear reactors, their newest generations, with emphasis on safety measures. It also discusses the perspectives of development of nuclear power in Poland.

Wstęp

Jednym z głównych problemów społeczeństw w krajach rozwiniętych jest obecnie zapewnienie odpowiednich dostaw energii, w tym szczególnie energii elektrycznej, przy spełnieniu odpowiednich uwarunkowań środowiskowych. W sektorze wytwarzającym elektryczność można ogólnie wyróżnić trzy grupy producentów tego nośnika energii. Najbardziej rozwinięty na świecie, a zdecydowanie dominujący w Polsce, wytwórczy podsektor energetyczny to elektrownie wykorzystujące tradycyjne paliwa węglowe i węglowodorowe: węgiel kamienny i brunatny, paliwa ciekłe oraz gaz ziemny. Grupę drugą stanowią instalacje korzystające ze źródeł naturalnych, głównie pochodzenia słonecznego i są to tzw. odnawialne źródła energii oraz „wielka" energetyka wodna. Trzecia część rozpatrywanego sektora to elektrownie jądrowe, wykorzystujące ciężkie izotopy rozszczepialne. W środowisku polskich energetyków można spotkać się z opinią, że w następnej dekadzie elektryczność powinna być w Polsce wytwarzana w wymienionych podsektorach energetycznych w proporcji 70: 15: 15. Wymaga to oczywiście rozbudowy w racjonalny sposób odnawialnych źródeł energii oraz budowy bezpiecznych i efektywnie działających bloków jądrowych.

1. Krótka historia rozwoju reaktorów jądrowych

Pierwszy reaktor jądrowy w historii ludzkości został uruchomiony 2 grudnia 1942 r., o godz. 15^{25}, na terenie uniwersytetu w Chicago. Celem tego eksperymentalnego przedsięwzięcia była realizacja kolejnego etapu prac zmierzających do wytworzenia nowego typu broni wykorzystującej energię wiązań jądrowych. Reaktor, nazwany stosem chicagowskim, miał rdzeń zbudowany z metalicznego uranu naturalnego oraz z moderatora grafitowego. Taki skład rdzenia pierwszego układu reaktorowego wiązał się z bardzo poważnymi konsekwencjami przyszłościowymi, zarówno w odniesieniu do sfery militarnej, jak też do energetyki jądrowej. O wykorzystaniu tej energetyki do wytwarzania elektryczności nikt zresztą w chwili uruchamiania pierwszego stosu jądrowego nie myślał. Celem było tu przede wszystkim doprowadzenie do samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej opartej na neutronach termicznych, a więc spowolnionych. Spowalniaczem, czyli moderatorem, były jądra pierwiastka węgla zawarte w graficie. Reaktory grafitowe posłużyły następnie do produkcji plutonu, który wykorzystano w pierwszej doświadczalnej bombie atomowej zdetonowanej 16 lipca 1945 roku w stanie Nowy Meksyk, w odległości ok. 320 km od Los Alamos. Ładunek plutonowy znajdował się również w bombie atomowej zrzuconej 9 sierpnia 1945 nad Nagasaki (bomba atomowa zdetonowana nad Hiroszimą 6 sierpnia 1945 wykorzystywała izotop uranu U-235). W przypadku obu

typów bomb atomowych wybuch trwa przez niezwykle krótką chwilę, a reakcję łańcuchową podtrzymują prędkie neutrony natychmiastowe. Należy tu zaznaczyć, że przebieg reakcji łańcuchowej w przypadku ładunku nuklearnego w reaktorze jądrowym jest zupełnie odmienny, mimo wykorzystania w obu przypadkach procesu rozszczepienia jąder ciężkich w celu uwolnienia energii wiązania tych jąder. Nieuzasadnione jest, zatem stwierdzenie, z jakim spotkać się można było jeszcze do niedawna, że w określonych warunkach w reaktorze jądrowym może zaistnieć niekontrolowana reakcja łańcuchowa tego typu, jak w przypadku bomby A.

Reaktory jądrowe z uranem naturalnym, moderowane grafitem, służyły w pierwszym okresie swojego istnienia wyłącznie, jako urządzenie produkujące pluton do celów militarnych. Po kilku latach jednak aktualna zaczęła być koncepcja zastosowania tego typu reaktorów do celów energetycznych. Powodem był tu fakt, że uran o naturalnym składzie izotopowym może być stosowany, jako paliwo w reaktorach termicznych tylko wówczas, gdy moderatorem jest grafit lub ciężka woda D_2O. Wzbogacanie uranu w rozszczepialny izotop U-235 stanowiło wówczas poważny problem techniczny, ale także produkcja ciężkiej wody z wody „naturalnej" była i jest procesem bardzo energochłonnym.

Po raz pierwszy, w symbolicznej zresztą ilości, otrzymano prąd elektryczny w układzie z wojskowym, plutonowym, powielającym reaktorem jądrowym EBR-1, w Stanach Zjednoczonych 20 grudnia 1951 roku. 27 czerwca 1955 roku z kolei uruchomiono w Obnińsku (ZSRR) blok jądrowy z reaktorem grafitowym o mocy elektrycznej 5 MW, uważany za pierwszą na świecie elektrownię jądrową. Efektem dalszego rozwoju tego typu reaktorów uranowo – grafitowych, chłodzonych wodą i moderowanych grafitem, jak w Obnińsku, były reaktory jądrowe RBMK (Rieaktor Bolszoj Moszcznosti Kanalnyj), oznaczane także symbolem LWGR (Light Water Graphite Reactor). Reaktory takie pracowały m. in. w EJ Czarnobyl i ich 11 egzemplarzy wciąż jeszcze jest w Rosji eksploatowanych (Sosnowy Bór koło Sankt Petersburga, Kursk i Smoleńsk).

Inną grupę reaktorów grafitowych stanowią reaktory chłodzone CO_2 z domieszką CO. Reaktory takie, wykorzystujące uran o składzie naturalnym, były głównie przedmiotem zainteresowania energetyków europejskich we Francji i w Wielkiej Brytanii. Pierwszy blok o mocy elektrycznej 50 MW, pierwszej na świecie elektrowni jądrowej traktowanej, jako komercyjna, miał taki właśnie reaktor i został on uruchomiony w październiku 1956 w brytyjskiej elektrowni Calder Hall. O ile energetyka francuska jednak zaczęła rozwijać się następnie w oparciu o reaktory wodne ciśnieniowe, o tyle w Wielkiej Brytanii reaktory grafitowo – gazowe dotąd stanowią źródło ciepła w elektrowniach jądrowych, przy czym reaktory te zmodyfikowano tak, iż w nowszej wersji wykorzystują one uran w niewielkim stopniu wzbogacony w izotop U-235.

Najbardziej obecnie rozpowszechnione reaktory energetyczne, moderowane i chłodzone „lekką" wodą, również zaczęto rozwijać głównie z myślą o zastosowaniach militarnych, choć tu cel był zupełnie inny niż w przypadku reaktorów grafitowych. W przeciwieństwie do energetycznych reaktorów grafitowych chłodzonych CO_2, reaktory lekkowodne, nawet o dużych mocach cieplnych, mają relatywnie bardzo małe wymiary. Optymalny stosunek objętości moderatora i paliwa, wynikający z przesłanek fizycznych i ekonomicznych, a w przypadku reaktorów wodnych również z zasad bezpieczeństwa, jest dla reaktorów wodnych znacznie mniejszy niż w przypadku reaktorów grafitowych. Ponadto współczynniki wnikania (przejmowania) ciepła od powierzchni prętów paliwowych przez medium gazowe są o kilka rzędów mniejsze niż w przypadku wody (zwłaszcza, gdy ma ona dość wysoką temperaturę), co również wpływa na objętość rdzenia reaktora chłodzonego gazem. Zastosowanie więc moderatora grafitowego wymaga użycia dużych jego ilości w reaktorze, podczas gdy moderator wodny, czyli H_2O, zajmuje w reaktorze stosunkowo niewielką objętość. Relatywnie mała objętość rdzenia reaktora wodnego ciśnieniowego, a tym samym duża moc otrzymywana z jednostki objętości rdzenia, spowodowała zainteresowanie się tymi reaktorami przez marynarkę wojenną mocarstw atomowych. Reaktory takie są szczególnie przydatne w układach napędowych okrętów podwodnych, choć znalazły one również zastosowanie w napędach dużych jednostek nawodnych. Wadą tych reaktorów w czasie powstawania pierwszych egzemplarzy reaktorów jądrowych, a więc pod koniec I połowy XX wieku, była konieczność pewnego wzbogacania paliwa uranowego w izotop U-235. Pierwszy reaktor energetyczny chłodzony i moderowany „lekką" wodą, wzorowany na reaktorach „wojskowych", został uruchomiony w drugiej, w skali światowej, elektrowni jądrowej w Shippingport (Stany Zjednoczone), na początku grudnia 1957 roku, a moc elektryczna bloku wynosiła 60 MW. Wkrótce okazało się, że zaprojektowane już wyłącznie pod kątem potrzeb energetyki zawodowej lekkowodne reaktory ciśnieniowe są niezawodnym i bezpiecznym źródłem taniego ciepła w blokach o dużej mo-

cy. Pierwszy całkowicie „energetyczny" reaktor tego typu o mocy elektrycznej 175 MW został zainstalowany w roku 1961 w amerykańskiej elektrowni jądrowej Yankee Rowe. Równolegle z reaktorami wodnymi ciśnieniowymi chłodzonymi i moderowanymi H_2O, powszechnie oznaczanymi skrótem PWR (Pressurized Water Reactor), w Stanach Zjednoczonych trwały prace nad skonstruowaniem reaktora energetycznego lekkowodnego wrzącego BWR (Boiling Water Reactor). Różnica pomiędzy tymi odmianami reaktorów lekkowodnych polega na tym, że reaktory PWR wytwarzają gorącą wodę o bardzo wysokim ciśnieniu, reaktory BWR zaś dostarczają nasyconą suchą parę H_2O. Pierwszy, w zasadzie doświadczalny reaktor tego typu, umożliwił wyprodukowanie niewielkich ilość energii elektrycznej w lipcu 1955 roku, pierwszy zaś komercyjny reaktor BWR został uruchomiony w roku 1960 w elektrowni Dresden 1. Blok z tym reaktorem miał moc elektryczną 200 MW, a elektrownia Dresden 1 była pierwszą na świecie elektrownią jądrową o charakterze całkowicie prywatnym.

Dla potrzeb podwodnych okrętów wojennych powstały także konstrukcje reaktorów chłodzonych ciekłymi metalami: sodem lub eutektyką bizmut – ołów. Reaktory te nie znalazły jednak zastosowania w układach energetycznych. Osobną grupę reaktorów chłodzonych ciekłymi metalami stanowią, wspomniane już, uranowo – plutonowe reaktory powielające prędkie. Reaktory te w zasadzie od początku historii energetyki jądrowej uważane były za podstawowe przyszłościowe źródło ciepła w elektrowniach jądrowych i dotąd można się spotkać z tego typu opiniami. W chwili obecnej jednak na świecie istnieją tylko pojedyncze egzemplarze takich reaktorów, traktowanych w znacznym stopniu jako eksperymentalne.

Jak już wspomniano, uran o naturalnym składzie izotopowym może być stosowany w reaktorach moderowanych i chłodzonych ciężką wodą D_2O. Ze względów fizycznych reaktory takie mają wyraźnie większe rozmiary od reaktorów lekkowodnych i dlatego nie znalazły one zastosowania w jednostkach napędowych. Z tego powodu i z przyczyn politycznych, a także m. in. z uwagi na wysoką cenę ciężkiej wody, reaktory ciężkowodne są mniej popularne, choć jako reaktory energetyczne mają one wiele zalet.

Reaktory prędkie powielające chłodzone ciekłym sodem mogą zapewnić pełne, a nawet z pewną nadwyżką, powielenie paliwa w cyklu uranowo – plutonowym. Innym rodzajem reaktorów powielających są reaktory termiczne moderowane grafitem i chłodzone helem, zwykle o wysokiej temperaturze wylotowej helu oraz pracujące w cyklu torowo – uranowym. Reaktory te również w pewnym okresie zostały uznane za przyszłościowe, ale obecnie prace nad tymi reaktorami w Europie nie są na większą skalę kontynuowane, choć mogą one być źródłem ciepła wysokotemperaturowego dla pewnych procesów technologicznych, m. in. przy przeróbce węgla na paliwa ciekłe lub gazowe. Oczywiście nie wyklucza to możliwości zastosowania wysokotemperaturowych, powielających reaktorów grafitowo – helowych również do celów energetycznych. Powodem wstrzymania prac nad tymi reaktorami były w znacznym stopniu względy polityczne, ale także pewne problemy techniczne, rzutujące na poziom bezpieczeństwa przy długotrwałej eksploatacji tych reaktorów.

2. Generacje energetycznych reaktorów jądrowych

Przy rozpatrywaniu różnych typów reaktorów jądrowych, kolejno przystosowywanych do celów energetycznych, jako podstawowe kryterium ich klasyfikacji przyjmowano początkowo głównie rodzaj moderatora oraz chłodziwa. Jednak w przypadku reaktorów energetycznych coraz częściej stosuje się inne kryterium klasyfikacyjne, mające ścisły związek z czasem powstania danej konstrukcji. Zgodnie z tym kryterium wyróżnia się kolejne generacje energetycznych reaktorów jądrowych. Generację I tworzą reaktory powstałe w pierwszym etapie rozwoju energetyki jądrowej, który trwał do ok. 1965 roku. Przykładami reaktorów powstałych w tym okresie są wspomniane już reaktory w elektrowni Calder Hall, w Shippingport, Yankee Rowe oraz w elektrowni Dresden 1. Generacja II to reaktory powstałe w przybliżeniu w latach 1965 – 1995 i są to przede wszystkim zmodernizowane reaktory typu PWR i BWR, a także udoskonalone reaktory grafitowo – gazowe. Wprowadzane stopniowo w nich modyfikacje miały na celu doskonalenie konstrukcji dla poprawy ich bezpieczeństwa, przy równoczesnym zwiększaniu mocy cieplnej reaktora, a tym samym mocy elektrycznej bloku, jego całkowitej sprawności, a także zwiększanie efektywności wykorzystania paliwa jądrowego. Podstawową miarą tej efektywności jest ilość energii uzyskanej w wyniku rozszczepień z jednostki paliwa, czyli głębokość wypalenia paliwa, podawana zwykle w MWds/tonę (megawatodniach na tonę paliwa). W przypadku brytyjskich reaktorów grafitowo – gazowych efekt ten uzyskano przez zastosowanie paliwa wzbogaconego nieco w izotop U-235, podczas gdy pierwsze tego typu reaktory bazowały na uranie o naturalnym składzie izotopowym. Coraz większy nacisk

kładziono również na bezpieczeństwo i niezawodność pracy reaktorów. W tym okresie powstawały także nowe typy reaktorów energetycznych, z których dwa okazały się bardzo istotne w historii rozwoju energetyki jądrowej. O ile reaktory I generacji i powstałe w wyniku ich modyfikacji reaktory generacji II miały postać zbiornikową, to oba te rodzaje reaktorów jądrowych są reaktorami kanałowymi. Reaktory te to kanadyjski reaktor CANDU (CANadian Deuterium Uranium Reactor) chłodzony i moderowany ciężką wodą D_2O oraz, wspomniany już, radziecki reaktor RBMK moderowany grafitem i chłodzony „lekką" wodą H_2O.

Reaktory III generacji to reaktory jądrowe instalowane od roku 1995 do chwili obecnej. Reaktory te będą prawdopodobnie oferowane w przyszłości przynajmniej do roku 2030, a być może jeszcze dłużej w nowszej wersji III+. Reaktory generacji III są efektem kontynuacji rozwoju reaktorów generacji II z dwoma wyjątkami. Wyjątki te to reaktory gazowo – grafitowe oraz kanałowe RBMK, których nie instaluje się już od wielu lat, z różnych zresztą względów. Reaktory generacji III oraz III+ są zmodyfikowanymi zbiornikowymi reaktorami wodnymi ciśnieniowymi i wodnymi wrzącymi oraz kanałowymi reaktorami ciężkowodnymi. Przykładami reaktorów wodnych ciśnieniowych generacji III lub III+ są reaktory europejskie EPR (European Pressurized Reactor) oraz amerykańskie serii AP (Advanced Pressurized). W obu tych typach reaktorów zastosowano wiele modyfikacji, a przede wszystkim wprowadzono nowego rodzaju, dodatkowe systemy zabezpieczające, podobnie jak i we wrzących reaktorach generacji III ABWR (Advanced Boiling Water Reactor). Moc elektryczna bloków z reaktorami EPR wynosi 1600 MW, a pierwsze jednostki tego typu to reaktor instalowany w fińskiej elektrowni Olkiluoto oraz w elektrowni Flamanville we Francji, przy czym budowa bloku fińskiego jest znacznie bardziej zaawansowana, choć dość poważnie opóźniona. Z kolei uruchomienie pierwszych czterech bloków z reaktorami amerykańsko-japońskimi ABWR, o mocy elektrycznej 1350 MW, miało miejsce w Japonii (od roku 1996). Również w konsorcjum GE-Hitachi trwają prace nad opracowaniem projektu reaktora wrzącego ESBWR (Economic/ Evolutionary Simplified Boiling Water Reactor), który jednak– jeśli powstanie – będzie już należał do generacji III+. Wspomniane modyfikacje, prowadzące do tzw. projektów ewolucyjnych, mają na celu zwiększenie konkurencyjności i usprawnienie procesu eksploatacji, a także dalszą poprawę poziomu bezpieczeństwa w elektrowniach z tymi reaktorami. Pierwsze dwa cele są osiągane przez upraszczanie konstrukcji zarówno samych reaktorów, jak i elementów układu reaktorowego, a zwłaszcza obiegu pierwotnego, czyli elementów bezpośrednio współpracujących z reaktorami jądrowymi. W przypadku systemów zabezpieczających coraz większe znaczenie mają systemy bierne, a więc systemy niewymagające stosowania urządzeń korzystających z mechanicznej pracy napędowej, czyli głównie pomp i wentylatorów. Celem końcowym ma być tu powszechne zastosowanie tzw. reaktorów inherentnie bezpiecznych. W reaktorach takich rolę systemów zabezpieczających spełniają odpowiednio wykorzystane prawa przyrody, dzięki czemu w stanach awaryjnych powstają samorzutnie zjawiska prowadzące do bezpiecznego wyłączenia reaktora, a następnie wystarczająco efektywnego jego chłodzenia celem odbioru ciepła powyłączeniowego. Przykładem takiego zjawiska jest naturalna cyrkulacja wody chłodzącej wywołana hydrostatycznymi siłami wyporu.

W chwili obecnej na świecie jest czynnych ponad 430 energetycznych reaktorów jądrowych o całkowitej mocy elektrycznej ok. 370 GWe i są to niemal wyłącznie reaktory II generacji. Ok. 60% tych obiektów stanowią reaktory PWR, 25% zaś reaktory BWR. Uproszczony schemat bloku energetycznego z reaktorem PWR przedstawiono na rys. 1, uproszczone schematy bloków z reaktorami BWR i ABWR natomiast na rys. 2. W przypadku jądrowego systemu wytwarzania pary z reaktorem PWR reaktor opuszcza gorąca woda o temperaturze dochodzącej do ok. 330°C i o odpowiednio wysokim ciśnieniu, która w wytwornicy pary oddaje ciepło wodzie obiegu turbinowego, powodując powstanie pary nasyconej o temperaturze do ok. 290°C. W przypadku reaktora BWR wytwarza on bezpośrednio nasyconą parę wodną o temperaturze do ok. 300°C. Blok z reaktorem BWR nie zawiera zatem dodatkowych elementów obiegu pierwotnego, w tym kosztownych wytwornic pary, do turbiny dopływa jednak czynnik radioaktywny o krótkim okresie półrozpadu. W obu przypadkach zespół turbinowy posiada takie same urządzenia dodatkowe jak w przypadku bloku węglowego, a głównie pompy kondensatu i wody zasilającej, podgrzewacze regeneracyjne nisko- i wysokociśnieniowe oraz odgazowywacz.

3. Zagadnienia bezpieczeństwa w energetycznych wodnych reaktorach jądrowych

Jak już wspomniano reaktory energetyczne są tak skonstruowane, iż wybuch jądrowy nie jest w nich możliwy ze względów fizycznych. Mimo, że niekontrolowana reakcja łańcucho-

wa w bombie A wykorzystuje ten sam efekt zamiany części masy jąder w ciepło, jak reakcja łańcuchowa w reaktorze jądrowym, to jednak między tymi procesami istnieje zasadnicza różnica. Trwającą niezwykle krótko reakcję podczas wybuchu bomby podtrzymują neutrony natychmiastowe o bardzo dużej energii. Z uwagi na inną postać, a głównie małe wzbogacenie paliwa jądrowego w izotopy rozszczepialne, reakcję łańcuchową w reaktorze mogą podtrzymywać jedynie też wspomniane już neutrony o niskiej energii zwane termicznymi. W przypadku reaktorów chłodzonych i moderowanych wodą, prędkie neutrony rozszczepieniowe spowalnia woda, a ściślej zawarty w niej wodór. W sytuacji skrajnej, w razie nagłego przyrostu mocy cieplnej reaktora, wynikającego z gwałtownie wzrastającej liczby rozszczepień jąder paliwowych, nagłe odparowanie wody zahamuje proces moderacji neutronów i reakcja łańcuchowa samoczynnie wygaśnie. W praktyce, w warunkach reaktorów wodnych, nie jest także możliwe wydostanie się do otaczającej atmosfery substancji paliwowej, tzn. izotopów uranu oraz ewentualnie plutonu. Świadectwem tego są awarie w Harrisburgu (USA) w 1979 roku oraz w Fukushimie (Japonia) w roku 2011. W obu tych elektrowniach, mimo zniszczeń wykluczających możliwość naprawy i ponownego uruchomienia reaktorów, do powietrza atmosferycznego nie wydostały się izotopy paliwowe.

Każdy reaktor jądrowy, w tym także reaktor wodny, ma natomiast dwie charakterystyczne cechy szczególne, które mogą stanowić źródło zagrożeń i poważnych awarii. Pierwsze zagrożenie wynika z obecności we wnętrzu reaktora substancji silnie radioaktywnych, będących głównie produktami rozszczepienia paliwa jądrowego. Produkty te znajdują się w pozostałym paliwie, gdyż rozszczepieniu ulega zaledwie kilka procent substancji paliwowej. W określonych warunkach do otoczenia mogą się przedostać pewne izotopy promieniotwórcze będące produktami rozszczepień jąder paliwa, a są to głównie jod, cez, stront oraz ksenon, przy czym ten ostatni pierwiastek jest gazem szlachetnym, a więc nieabsorbowanym w organizmie ludzkim. Aby ograniczyć prawdopodobieństwo wydostania się na zewnątrz promieniotwórczych produktów rozszczepienia, zespół reaktorowy jest umieszczany wewnątrz odpowiednio skonstruowanego budynku o bardzo dużej odporności na wszelkiego rodzaju zagrożenia, w tym trzęsienie ziemi, powódź bądź upadek samolotu – jest to tzw. obudowa bezpieczeństwa (rys. 3).

Drugi problem stanowi moc powyłączeniowa. W przypadku kotła pyłowego lub fluidalnego przerwanie dopływu paliwa skutkuje zaprzestaniem od razu procesu spalania i tym samym generacji ciepła. Wyłączenie reaktora jądrowego powoduje natychmiastowe przerwanie reakcji łańcuchowej, produkty rozszczepienia w rdzeniu reaktora ulegają jednak cały czas rozpadom promieniotwórczym, którym towarzyszy wydzielanie się ciepła. Moc cieplna powyłączeniowa jest oczywiście znacznie mniejsza od mocy nominalnej i w dodatku szybko maleje w sposób wykładniczy, przez pewien czas po wyłączeniu jest ona jednak na tyle duża, że rdzeń reaktora powinien być w odpowiednio intensywny sposób chłodzony. Przykładowe dane dotyczące mocy powyłączeniowej reaktora jądrowego o typowej mocy cieplnej 3000 MW, co odpowiada mocy elektrycznej bloku ok. 1000 MW, podaje poniższe zestawienie:

W celu odebrania mocy powyłączeniowej w układach reaktorowych instaluje się odpowiednie układy chłodzenia, które można podzielić na bierne (pasywne) oraz czynne (aktywne). Układy bierne nie wymagają zastosowania żadnych elementów ruchomych, a zatem nie wymagają one zasilania energią z zewnątrz. W układach tych wykorzystuje się prawa przyrody, które nigdy nie zawodzą, a ściślej – wykorzystuje się naturalne siły w postaci np. siły grawitacji lub siły wyporu hydrostatycznego. W kolejnych generacjach reaktorów jądrowych dąży się do rozbudowy układów biernych, przy stopniowej eliminacji układów czynnych, które wymagają zasilania zewnętrznego. Jest to na ogół elektryczność potrzebna głównie do silników elektrycznych napędzających zespoły pompowe oraz ewentualnie zespoły wentylatorowe.

Odpowiednio intensywne chłodzenie reaktora jądrowego po jego wyłączeniu jest konieczne z co najmniej trzech powodów. Brak chłodzenia reaktora, poprzez przegrzanie

Moc powyłączeniowa w % mocy ruchowej oraz w MW dla reaktora pracującego z mocą cieplną 3000 MW

Czas po wyłączeniu	%	MW
Bezpośrednio	6,0	180
1 minuta	2,0	60
1 godzina	1,0	30
1 doba	0,5	15
1 miesiąc	0,1	3

jego rdzenia, zwiększa niebezpieczeństwo wydostania się z obiegu reaktorowego substancji silnie promieniotwórczych. Niebezpieczeństwo to staje się tym większe, im wyższa temperatura pojawia się we wnętrzu reaktora. Wnętrze to w reaktorach wodnych zawiera pręty paliwowe o długości do ok. 4 m i o średnicy ok. 10 mm. W prętach tych znajdują się pastylki paliwowe z dwutlenkiem uranu UO_2, ewentualnie – w przypadku paliwa MOX (Mixed OXides) – z dodatkiem także dwutlenku plutonu PuO_2. Pastylki te znajdują się w tzw. koszulkach, czyli cienkich rurkach wykonanych ze stopu zwanego zircaloy, którego podstawowym składnikiem jest cyrkon. Cyrkon ma bardzo korzystne właściwości z punktu widzenia reaktorowego, z jednym wyjątkiem. Wyjątkiem tym jest fakt, iż w temperaturze powyżej 1000°C zachodzi intensywna egzotermiczna reakcja cyrkonu z H_2O, w wyniku czego powstaje dwutlenek cyrkonu ZrO_2 oraz wodór. Przy jeszcze wyższych temperaturach, nieco powyżej 2500°C, zaczyna się proces topnienia paliwa w rdzeniu reaktora, a oznacza to nie tylko definitywne jego zniszczenie, ale także groźbę uwolnienia do otoczenia na dużą skalę silnie promieniotwórczych produktów rozszczepienia. Skrajnie pesymistyczny scenariusz przewiduje wytworzenie się tzw. debris lub corium, czyli ciekłej substancji powstałej po stopieniu rdzenia reaktora, mającej temperaturę 2500°C÷3000°C i zawierającej wewnętrzne źródła ciepła powyłączeniowego. Gdyby doszło do przetopieniu dna zbiornika reaktorowego oraz płyty fundamentowej, substancja ta przeniknęłaby do gruntu powodując znaczne skażenie otoczenia. W określonych warunkach, głównie za pośrednictwem cieków wodnych, mogłoby dojść wtedy do rozprzestrzenienia się na dużym obszarze silnie radioaktywnych substancji promieniotwórczych. Scenariusz taki jest jednak, w przypadku reaktorów wodnych, skrajnie nieprawdopodobny, a świadectwem tego są m.in. przebiegi dotychczasowych awarii w tych reaktorach.

W układach z reaktorami wodnymi PWR najpoważniejsze zagrożenia związane są z wystąpieniem awarii rozszczelnieniowej, czyli awarii LOCA (Loss-Of-Coolant-Accident). W efekcie tego typu awarii do wnętrza budynku reaktorowego wydostaje się z obiegu pierwotnego reaktora woda o wysokich parametrach, która gwałtownie odparowuje, przy czym za najgroźniejszy przypadek jest uważane rozerwanie się rurociągu wodnego pomiędzy główną pompą cyrkulacyjną i reaktorem. Działające biernie akumulatory wodne zapewniają chłodzenie rdzenia reaktora i odbiór ciepła wyłączeniowego bezpośrednio po wystąpieniu awarii. W celu obniżenia temperatury i ciśnienia w obudowie bezpieczeństwa do jej wnętrza wtryskiwana jest woda, która następnie spływa do zbiornika ściekowego. Elementy czynnego układu lokalizacji awarii w postaci odpowiednich pomp wtryskują następnie ochłodzoną w wymienniku wodę do wnętrza reaktora oraz ponownie do atmosfery obudowy. Na rys. 3 nie zaznaczono, zawsze obecnie instalowanych wewnątrz obudów reaktorowych, układów do rekombinacji, tzn. to kontrolowanego wiązania, wodoru.

W przypadku reaktorów wodnych istnieją cztery podstawowe bariery zabezpieczające przed wydostawaniem się na zewnątrz substancji promieniotwórczych z paliwa. Pierwszą barierę stanowią ceramiczne pastylki paliwowe. W czasie normalnej pracy z pastylek tych wydostaje się mniej niż 1% gazowych produktów rozszczepienia, a dopiero po ich stopieniu wydzielają się w całości gazy szlachetne, głównie ksenon, a także – w wysokich temperaturach – pierwiastki lotne, zwłaszcza jod, cez i tellur, jak też pewne produkty stałe w postaci aerozoli. Drugą barierą jest koszulka elementu paliwowego wykonana, w warunkach reaktorów wodnych, ze wspomnianego stopu zawierającego głównie cyrkon. W przypadku szczelnej koszulki wydzielone produkty rozszczepienia pozostają w gazowej szczelinie pomiędzy koszulką i paliwem jądrowym. Barierę trzecią stanowią ściany elementów obiegu reaktorowego, czwartą zaś jest obudowa bezpieczeństwa systemu reaktorowego wraz z układami lokalizacji awarii. Ostatnia z wymienionych barier odgrywa szczególną rolę i np. w przypadku awarii w Harrisburgu bariera ta miała decydujące znaczenie. Kolejne generacje reaktorów charakteryzują się głównie bardziej rozbudowanymi i pewniej działającymi systemami zabezpieczającymi związanymi z tą właśnie barierą.

4. Awarie i katastrofy w układach reaktorowych

Wszystkie technologie wytwarzania elektryczności wiążą się z pewnymi zagrożeniami dla ludzi, zarówno bezpośrednio związanych ze skumulowanym cyklem wytwarzania elektryczności, jak też dla mieszkańców terenów sąsiadujących z obiektami energetycznymi, w szerokim rozumieniu tego terminu. Jako miary tych zagrożeń stosowane są różne wskaźniki, w tym tzw. skumulowany wskaźnik zgonów związany z wytworzeniem 1 gigawatoroku elektryczności. Wskaźnik ten ujmuje zdarzenia związane z całym cyklem paliwowo-energetycznym prowadzącym do wytworzenia tej ilości energii elektrycznej. Są to więc wypadki w kopalniach, transporcie, przy budowach obiektów

energetycznych, w wyniku katastrof, czy też, a może przede wszystkim, w rezultacie skażenia środowiska. Wskaźnik ten jest najwyższy dla elektrowni wodnych, co wynika przede wszystkim z katastrof wywołanych zrywaniem tam. Dość wysoki wskaźnik śmiertelności występuje też w przypadku elektrowni węglowych, zwłaszcza w sytuacji dużej wypadkowości w górnictwie oraz w warunkach elektrowni emitujących znaczne ilości substancji szkodliwych. Zdecydowanie niższy skumulowany wskaźnik zagrożenia cechuje elektrownie gazowe oraz elektrownie jądrowe z reaktorami wodnymi. Nie oznacza to oczywiście braku wypadków w przypadku zespołów reaktorowych.

Zagadnienia bezpieczeństwa miały priorytetowe znaczenie podczas rozwoju reaktorów jądrowych, mimo tego jednak ich eksploatacja związana była z awariami. Awarie takie występowały zarówno w reaktorach badawczych, jak i wojskowych oraz energetycznych, a często ich przyczyną były dość banalne błędy personelu.

Najbardziej znana awaria przed wydarzeniami w Harrisburgu miała miejsce w brytyjskim reaktorze grafitowym służącym do produkcji plutonu dla celów militarnych w Windscale 08.10.1957. Wskutek błędu operatora doszło do trwającego kilka dni pożaru grafitu. Nie było ofiar ludzkich, reaktor jednak został całkowicie zniszczony, a do atmosfery wydostała się duża ilość substancji promieniotwórczych, w tym bardzo szkodliwy izotop jodu J-131. Poważnemu skażeniu uległy znaczne tereny w Anglii, Walii, a zauważalne było ono nawet w kontynentalnej Europie.

28 marca 1979 roku w amerykańskiej elektrowni jądrowej Three Mile Island w Harrisburgu doszło do przegrzania i częściowego nadtopienia rdzenia reaktora wodnego ciśnieniowego PWR. Dość banalna awaria w obiegu turbinowym spowodowała automatyczne odcięcie dopływu pary do turbiny. Z powodu braku odbioru ciepła od wytwornic pary otworzył się automatycznie zawór bezpieczeństwa obiegu pierwotnego, który po chwili się zaciął i nastąpił długotrwały wypływ chłodziwa reaktorowego przez ten zawór. Obsługa reaktora zorientowała się w sytuacji bardzo późno i zamknęła zawór dopiero po ponad 2 godzinach. Wcześniej reaktor został bardzo szybko automatycznie wyłączony i nastąpiło samoczynne uruchomienie dwóch pomp awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora. Obsługa reaktora, kierując się błędnymi przesłankami, wyłączyła te pompy, a następnie była zmuszona także wyłączyć główne pompy cyrkulacyjne. Po odparowaniu wody w rdzeniu nastąpiło przegrzanie prętów paliwowych, ich częściowe stopienie, wytworzył się także, w wyniku reakcji cyrkonu z parą wodną, wolny wodór. W efekcie reaktor w Harrisburgu został zniszczony w sposób uniemożliwiający jego naprawę, straty materialne były ogromne, lecz na zewnątrz budynku reaktorowego wydostały się jedynie niewielkie ilości substancji promieniotwórczych, głównie kryptonu Kr-85, nie było także żadnego zagrożenia dla obsługi. Mimo wytworzenia się pewnej ilości wolnego wodoru i jego wybuchu nie doszło jednak do uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora. Przyczyny awarii były wielorakie, począwszy od niedoskonałości konstrukcji i niedokładności w działaniu niektórych elementów pomocniczych, ale przede wszystkim miały miejsce poważne błędy obsługi, i to zarówno przed wystąpieniem awarii, jak i w czasie jej trwania. Szczególnie te ostatnie błędy okazały się niezwykle istotne.

Zupełnie odmienny przebieg i skutki miała katastrofa w Czarnobylu, która rozpoczęła się 26 kwietnia 1986 roku. Przede wszystkim całkowicie inną postać miały cztery pracujące w elektrowni czarnobylskiej reaktory, które co prawda również chłodzone były wodą, lecz w których, w celu moderacji neutronów, znajdowały się ogromne ilości grafitu. O ile w reaktorach wodnych PWR lub BWR pręty paliwowe zawarte są w walcowym, stalowym, zbiorniku reaktorowym o średnicy w granicach ok. 4 m ÷ 6 m, to w Czarnobylu rdzeń reaktora miał postać bloku z 2000 t grafitu, w którym znajdowało się blisko 1700 pionowych kanałów. W kanałach tych umieszczono ciśnieniowe rury stalowe, w których znajdowały się pręty paliwowe omywane przez odparowującą wodę. Reaktory, w ówczesnej wersji, nie posiadały rozwiązań gwarantujących maksymalny możliwy poziom bezpieczeństwa. Przebieg katastrofy czarnobylskiej miał bardzo złożoną postać i pewne jej aspekty do chwili obecnej nie zostały w pełni wyjaśnione. Nie ulega wątpliwości, że na ten przebieg wpływ miała dość kontrowersyjna postać konstrukcyjna zespołu reaktorowego oraz systemu jego zabezpieczeń. Należy tu przypomnieć, że reaktory tego typu jak w Czarnobylu powstały w rezultacie modyfikacji radzieckich reaktorów wojskowych służących do produkcji plutonu stanowiącego materiał do bomb atomowych. Wyjątkową jednak odpowiedzialność za przebieg i skutki omawianej awarii ponoszą zespoły decyzyjne elektrowni oraz jej czwartego bloku, w którym miał miejsce ruchowy eksperyment prowadzący do katastrofy o bardzo poważnych skutkach. W efekcie błędów obsługi, a nawet celowych działań, które absolutnie nie powinny mieć miejsca (wyłączanie systemów zabezpieczających), nastąpił niezwykle szybki

wzrost mocy reaktora skutkujący gwałtownym odparowaniem wody w rurach ciśnieniowych z prętami paliwowymi. Wywołany tym znaczny przyrost ciśnienia spowodował parowy wybuch typu kotłowego, tzn. rozerwanie tych rur. Powstała para wodna, o wysokich parametrach, zareagowała z grafitem, co spowodowało powstanie wolnego wodoru, który po zetknięciu z powietrzem uległ eksplozji. Wybuch ten, o charakterze chemicznym, doprowadził do całkowitego zniszczenia reaktora, uwolnienia do otoczenia dużych ilości substancji promieniotwórczych oraz zapoczątkował trwający 10 dni pożar grafitu. Wysoka temperatura, która w pewnym momencie przekraczała 5000°C, spowodowała, oprócz innych poważnych skutków, powstanie zjawiska ciągu kominowego, co wywołało wzniesienie substancji radioaktywnych w atmosferze na znaczną wysokość i następnie rozprzestrzenienie tych substancji na bardzo dużym obszarze. W trakcie awarii zginęło 30 pracowników, a dużą dawkę promieniowania w czasie akcji ratowniczej otrzymało ok. 200 osób.

W chwili obecnej działa jeszcze 11 reaktorów takich jak w Czarnobylu, jednak wprowadzone zmiany konstrukcyjne i materiałowe spowodowały, że powtórzenie się wydarzeń w taki sposób jak w Czarnobylu jest w nich w praktyce wykluczone.

5. Wydarzenia w Fukushimie

Elektrownia Fukushima zawierała 6 bloków energetycznych z reaktorami wodnymi wrzącymi BWR. Były to uruchamiane w latach 1971÷1979 starsze reaktory II generacji.

11 marca 2011 o godz. 14.46 w pobliżu wybrzeży Japonii miało miejsce gigantyczne trzęsienie ziemi, którego moc oszacowano na 9 stopni w skali Richtera. Epicentrum trzęsienia znajdowało się na głębokość 22÷32 km i ok. 100 km na północny wschód od leżącej na wybrzeżu elektrowni Fukushima. Wydzielona energia, ok. 340 megaton TNT, stanowiła odpowiednik energii milionów bomb z okresu II wojny światowej. Straty materialne wyniosły ok. 300 mld USD, a Honsiu, największa wyspa Japonii, została przesunięta o 2,4 m.

Mimo najsilniejszego w historii Japonii wstrząsu układy reaktorowe elektrowni Fukushima nie zostały uszkodzone. Wszystkie trzy czynne reaktory zostały wyłączone i zaczęły działać prawidłowo układy ich powyłączeniowego chłodzenia. Ponieważ utracono możliwość zasilania z sieci elektroenergetycznej, która w całej północnej Japonii przestała działać, silniki pomp wody chłodzącej rdzenie reaktorów zasilano prądem z elektrycznych generatorów awaryjnych. Generatory te napędzane były, co jest rozwiązaniem typowym, wysokoprężnymi silnikami spalinowymi tłokowymi, czyli silnikami Diesla. Prawie godzinę po trzęsieniu ziemi, a ściślej o godz. 15.41 czasu miejscowego, do położonej tuż nad brzegiem oceanu elektrowni Fukushima dotarła fala tsunami o wysokości ok. 14 m, w sytuacji gdy mur osłonny miał wysokość zaledwie 6,5 m. Gigantyczna fala oceaniczna przelała się przez zabudowania elektrowni nie powodując uszkodzeń reaktorów ani też ich obudów bezpieczeństwa. Zniszczeniu uległy jednak awaryjne zespoły prądotwórcze, łącznie ze zbiornikami paliwa olejowego. Zespół dodatkowych akumulatorów mógł zapewnić zasilanie silników elektrycznych pomp wody chłodzącej jedynie przez krótki okres czasu. Zaczęły następnie działać, niewymagające energii z zewnątrz, systemy chłodzenia reaktora wykorzystujące turbo-pompy napędzane parą z reaktorów, ale potem odbieranie ciepła miało miejsce jedynie poprzez bierne systemy chłodzące z naturalnym krążeniem H_2O. Systemy te były w stanie zapewnić utrzymanie odpowiednich warunków termicznych wewnątrz reaktorów tylko przez okres 6 godzin. Po tym czasie w rdzeniach reaktorów zaczęła wzrastać temperatura i ciśnienie, a ciągłe odparowywanie wody spowodowało odsłonięcie rdzeni reaktorów. Nastąpiło pękanie koszulek cyrkonowych i wydostawanie się z prętów paliwowych niektórych promieniotwórczych produktów rozszczepienia oraz rozpoczęła się egzotermiczna reakcja chemiczna cyrkonu z parą wodną, prowadząca do powstania wolnego wodoru. Sytuacja taka wystąpiła w blokach z reaktorami 1, 2 i 3, gdzie miało następnie miejsce uwolnienie z wnętrz obudów bezpieczeństwa mieszaniny parowo-powietrzno-wodorowej. Spowodowało to wybuchy i pożary na zewnątrz tych obudów i zniszczenie górnych części budynków zawierających w swoim wnętrzu te obudowy. Nastąpiło ponadto naruszenie integralności obudowy bezpieczeństwa w bloku 2 i być może 3. Ponadto w przypadku wszystkich tych trzech bloków rdzenie reaktorów zostały do tego stopnia uszkodzone, że ich naprawa i ponowne uruchomienie nie jest możliwe. Sytuacja wewnątrz bloków 1, 2 i 3 została opanowana, gdy do rdzeni reaktorów w tych blokach zaczęto pompować wodę morską, z pochłaniającymi neutrony termiczne związkami boru. Wykorzystano do tego celu duży przewoźny agregat z silnikiem Diesla, a następnie zasilanie sieciowe, co nastąpiło po tygodniu od trzęsienia ziemi. Cała akcja była utrudniona z powodu dalszych trzęsień ziemi, choć o znacznie mniejszej sile.

Efektem końcowym wydarzeń w blokach 1÷3 elektrowni Fukushima po trzęsieniu ziemi, oprócz wspomnianych zniszczeń, było wydostanie się do atmosfery pewnych ilości promieniotwórczych izotopów ksenonu, jodu i cezu, przy czym większość, z wyjątkiem ksenonu, izotopów radioaktywnych uwolnionych z rdzeni reaktorów uległa absorpcji przez wodę wewnątrz obudów bezpieczeństwa. Izotopy te mogły z kolei przedostać się do otoczenia za pośrednictwem wody morskiej chłodzącej awaryjnie reaktory. Nie wydostały się natomiast z rdzeni reaktorów izotopy uranu oraz plutonu. Jak już wspomniano, duże zniszczenia, choć tylko lokalne, spowodowały wybuchy wodoru i pożary. Ich efekty były bardzo spektakularne, lecz nie stwarzały one poważniejszych zagrożeń. Należy dodać, że w elektrowni były zainstalowane układy rekombinacji wodoru, czyli układy stopniowo wiążące wodór, jednak układy te też wymagały dostarczania elektryczności, a zasilania z zewnątrz nie było.

Elektrownia Fukushima składała się z 6 wspomnianych już bloków z reaktorami wrzącymi, przy czym reaktory 5 i 6 zlokalizowano oddzielnie, a w chwili trzęsienia ziemi oba te reaktory były wyłączone i pozbawione paliwa. Reaktor 4, sąsiadujący z reaktorami 1÷3, był również wyłączony, lecz usunięte niedawno z niego wypalone paliwo znajdowało się w budynku reaktorowym, w zbiorniku wymagającym ciągłego, odpowiednio intensywnego, chłodzenia. W warunkach braku zasilania i ustania pracy pomp wody chłodzącej również tu moc powyłączeniowa wypalonego paliwa spowodowała jego przegrzanie, wytworzenie wolnego wodoru, a następnie prawdopodobnie eksplozję wodoru i pożar.

W trakcie trzęsienia ziemi zginęło 2 pracowników elektrowni, 2 dalszych uznano za zaginionych, zginął także jeden operator dźwigu po zawaleniu się jego konstrukcji w wyniku wybuchu wodoru. Bardzo istotne i równocześnie charakterystyczne są natomiast skutki zdrowotne w przypadku personelu i osób biorących udział w reaktorowej akcji ratowniczej. Awarie reaktorów i późniejsze wydarzenia w rejonie budynków reaktorowych elektrowni Fukushima nie spowodowały wypadków śmiertelnych, nie stwierdzono też pochłonięcia dawek zagrażających życiu. Rannych zostało ok. 20 pracowników, kilku z nich na krótko zapobiegawczo hospitalizowano. Sześć osób otrzymało dawki promieniowania nieco przekraczające górną, dopuszczalną w szczególnych sytuacjach, granicę, a prawdopodobnie ok. 1000 innych pracowników i ratowników dostało dawkę poniżej tej granicy. Niewątpliwie teren w sąsiedztwie elektrowni został w pewien sposób skażony, ale masowe ewakuacje ludności były chyba jednak reakcją przesadną. Przesadne nieco chyba też były alarmistyczne informacje na temat skażenia promieniotwórczego wody morskiej chłodzącej reaktory.

Wydarzenia w Fukushimie porównywano do katastrofy czarnobylskiej, a nawet próbowano stawiać między nimi przybliżony znak równości. Jak wynika z zaprezentowanych opisów były to zupełnie różne zdarzenia, zarówno jeśli chodzi o przebieg, powstałe zagrożenia, jak i późniejsze skutki. Warto podkreślić, że zarówno trzęsienie ziemi o ogromnej mocy, jak i późniejsza gigantyczna fala oceaniczna, bezpośrednio nie spowodowały praktycznie żadnych uszkodzeń w układach reaktorowych. Zawiodły instalacje tradycyjne, konwencjonalne: sieci przesyłowe, awaryjne agregaty prądotwórcze z silnikami Diesla. I o tym powinni przede wszystkim pamiętać projektanci przyszłych elektrowni jądrowych.

6. Skale awarii w instalacjach jądrowych

Do oceny zagrożeń wynikających z awarii w instalacjach jądrowych służy skala INES (International Nuclear Event Scale). Skala ta zawiera 7 poziomów, przy czym poziomy 1-3 dotyczą incydentów, poziomy 4-7 zaś awarii jądrowych. Awaria na poziomie 4 nie stwarza znaczącego zagrożenia poza obiektem, choć na jego terenie mogą wystąpić poważne uszkodzenia oraz napromieniowanie kilku pracowników nawet dawką zbliżoną do śmiertelnej. W przypadku poziomu 5 występuje już zagrożenie poza obiektem. Instalacja jądrowa może ulec poważnemu uszkodzeniu, a na jej terenie może nastąpić uwolnienie większych ilości substancji promieniotwórczych. Poziom 6 odpowiada poważnej awarii, o bardziej istotnych skutkach dla obiektu i związanej z wydostaniem się do otoczenia znacznych ilości substancji promieniotwórczych. Poziom 7 to wielka awaria połączona z uwolnieniem do otoczenia bardzo dużych ilości substancji promieniotwórczych. Związane z tym są poważne skutki zdrowotne natychmiastowe oraz późniejsze, jak też długotrwałe skutki środowiskowe na większym obszarze.

Skala INES jest wykorzystywana do oceny zdarzeń we wszelkich instalacjach jądrowych, w tym, co oczywiste, w elektrowniach jądrowych. Awarii w Harrisburgu jest przypisywany poziom 5, katastrofie w Czarnobylu zaś poziom 7, co nie wzbudza zastrzeżeń. Problem występuje natomiast w przypadku wydarzeń w Fukushimie. Awarie poszczególnych bloków klasyfikowane są na

ogół na poziomie 5, jednak z uwagi na ich równoczesne wystąpienie w kilku blokach pojawiły się informacje o możliwości usytuowania całości wydarzeń w japońskiej elektrowni na poziomie 7.

Warto wspomnieć o jeszcze dwóch awariach, a nawet katastrofach, w sposób pośredni związanych z reaktorami jądrowymi. Pierwsza z nich miała miejsce w roku 1957 w radzieckim, zamkniętym, syberyjskim, ośrodku Majak w rejonie Czelabińska, w południowo-wschodniej części Uralu, w pobliżu miasta Kysztym. Kombinat Majak wytwarzał pluton do celów militarnych, z odpowiednio nisko wypalonego paliwa jądrowego. W zakładzie tym miał miejsce wybuch termiczny w zbiorniku zawierającym rozpuszczone w kwasie azotowym wysokoaktywne odpady promieniotwórcze. W wyniku przegrzania podziemnego zbiornika, zawierającego prawdopodobnie kilkaset metrów sześciennych roztworu substancji silnie radioaktywnych, doszło do gwałtownego uwolnienia do otoczenia znacznej ich ilości. Nastąpiło skażenie promieniotwórcze dużego terenu, bardzo mało jest natomiast wiarygodnych informacji o wypadkach śmiertelnych, choć trudno przypuszczać, aby przypadków takich nie było. Istnieją szacunki wskazujące na 200 ofiar, w dalszym ciągu jednak przebieg i skutki katastrofy kysztymskiej, wynikającej głównie z niewłaściwego chłodzenia zbiornika roztworu, nie są w pełni wyjaśnione. Do otoczenia wydostała się, jak wspomniano, ogromna ilość silnie promieniotwórczej substancji, która skaziła bardzo rozległy teren, prawdopodobnie zupełnie niszcząc na dużej jego części życie biologiczne. Katastrofie tej „przyznano" poziom 6, co chyba jest oceną zaniżoną. Drugi wspomniany przypadek wystąpił w roku 1999 w japońskim mieście Tokaimura. Miała tam miejsce awaria polegająca na niezamierzonym osiąganiu krótkotrwałych stanów krytycznych z reakcją łańcuchową w zbiorniku doświadczalnej instalacji produkującej paliwo reaktorowe. Niekompetencja i lekkomyślność personelu spowodowały silne napromieniowanie 3 osób, z czego 2 pracowników wkrótce zmarło. Napromieniowaniu o mniejszej dawce uległo ponad 100 osób, awaria została zaś sklasyfikowana na poziomie 5.

6. Przykłady wybranych katastrof wywołanych „przemysłową" działalnością ludzkości

Od początku rozwoju energetyki jądrowej na zagadnienia bezpieczeństwa zwracano szczególną uwagę. Nie zapobiegło to jednak wielu awariom i sytuacjom stwarzającym, przez ten sektor, zagrożenie dla środowiska. O najbardziej znanych takich przypadkach już wspomniano, ale należy wyraźnie zaznaczyć, że historia rozwoju technicznego ludzkości pełna jest wydarzeń awaryjnych, a nawet tragicznych, którymi „płacono" za postęp i rozwój gospodarczo – ekonomiczny. Poniżej podano zestawienie zaledwie kilku wybranych zdarzeń, które bądź wiązały się z wieloma ofiarami śmiertelnymi, bądź też zostały wyjątkowo nagłośnione przez środki masowego przekazu (po prawej stronie podano liczbę ofiar śmiertelnych).

Zwraca tu szczególną uwagę fakt tragicznych następstw wypadków w układach z zaporowymi elektrowniami wodnymi oraz katastrofa w Bhopalu 3 grudnia 1984. W tym ostatnim przypadku wybuch w wytwórni pestycydów spowodował wydostanie się do otoczenia ok. 40 ton silnie toksycznego izocyjanianu metylu, co skutkowało ogromną liczbą ofiar ludzkich, przy czym liczba rannych i niezdolnych do pracy była kilka razy większa od liczby ofiar śmiertelnych. Zupełnie wyjątkową i tragiczną postać miała jednak seria katastrof elektrowni wodnych w Chinach w roku 1975 zapoczątkowana zerwaniem tamy Banqiao w nocy z 7 na 8 sierpnia. Tajfun Nina spowodował opady deszczu o intensywności spodziewanej raz na 2000 lat. Tama nie wytrzymała naporu wody, a gwałtowna fala powodziowa o niezwykłym zasięgu spowodowała zalanie ogromnego obszaru zamieszkałego przez 11 milionów ludzi, jak też zniszczenie dalszych zapór. Ogółem zerwaniu uległy 62 tamy, zniszczonych zostało blisko 6 milionów budynków oraz według oficjalnych danych 26 tysięcy osób zginęło bezpośrednio podczas powodzi, a 145 tysięcy zmarło następnie w rezultacie epidemii i głodu.

Rok	Katastrofa	Ofiary
1903	wybuch metanu w kopalni w Wyoming (USA)	1 234
1942	wybuch pyłu węglowego w kopalni w Chinach	1 550
1957	pożar reaktora Windscale (WB)	0
1959	zniszczenie zapory rzecznej (Francja)	420
1963	przelanie się wody przez zaporę w Vajont (Włochy)	~ 2 600
1975	zawalenie się zapory elektrowni wodnej Banqiao (Chiny)	~ 171 000
1979	stopienie rdzenia reaktora jądrowego (TMI - USA)	0
1984	wyciek trującego gazu (Bhopal – Indie)	~ 20 000
1986	zniszczenie reaktora jądrowego, Czarnobyl, ZSRR / Ukraina	31+?
2011	wydarzenia w Fukushimie	2+2+1(?)

Niektóre źródła nieoficjalne sugerują jednak, że łączna liczba ofiar mogła osiągnąć wielkość ok. 230 tysięcy.

Powyżej przedstawiono wybrane awarie oraz katastrofy spowodowane ludzką działalnością i w zdecydowanej większości przypadków bezpośrednio lub pośrednio związane z szeroko rozumianą energetyką. Jak widać z podanych informacji rozgłos nadawany przez media takim zdarzeniom pozostaje często w rażącej dysproporcji w stosunku do rzeczywistych, nieraz rzeczywiście dramatycznych, ale nieraz też przecenianych skutków.

7. Energetyczne reaktory jądrowe generacji III , III+ oraz HTR

W przypadku budowy w Polsce elektrowni jądrowej niewątpliwie zainstalowane w niej zostaną reaktory wodne generacji III lub III+. Jak już wspomniano, w przypadku bloków z reaktorami wodnymi bardzo istotne jest, aby w razie najpoważniejszej nawet awarii substancje radioaktywne nie wydostały się na zewnątrz obudowy bezpieczeństwa. W przypadku awarii w Harrisburgu warunek ten został zachowany i na zewnątrz budynku reaktorowego wydostały się jedynie śladowe ilości izotopów promieniotwórczych. Odmienna sytuacja miała miejsce w Fukushimie, gdzie nadmierny przyrost ciśnienia wewnątrz obudów bezpieczeństwa spowodował wydostanie się do otoczenia już w pierwszym stadium awarii pewnej ilości substancji promieniotwórczych. W obu wspomnianych elektrowniach działały reaktory generacji II. Generację trzecią tworzą reaktory o bardziej rozwiniętych systemach bezpieczeństwa, przy czym podstawowym celem dokonanych modyfikacji było zwiększenie ich niezawodności oraz wyeliminowanie zagrożeń wynikających z błędów ludzkich przy obsłudze reaktorów. Wprowadzone w tym celu innowacje polegały głównie na zwielokrotnieniu systemów bezpieczeństwa lub na rozbudowie systemów pasywnych.

Przykładem pierwszego podejścia jest europejski reaktor EPR (rys. 4) . Jest to reaktor trzeciej generacji o konstrukcji bazującej na starszym typie reaktora PWR, ale charakteryzujący się korzystniejszymi parametrami eksploatacyjnymi oraz uproszczoną obsługą. Przy projektowaniu tego reaktora zastosowano podejście ewolucyjne, a poziom bezpieczeństwa podniesiono przez zwiększenie dyspozycyjności i niezawodności sprawdzonych systemów bezpieczeństwa (zwielokrotnienie systemów) oraz przez zastosowanie nowych rozwiązań łagodzących skutki potencjalnych awarii. Bezpieczeństwo reaktora zapewniają cztery oddzielne ciągi wszystkich układów bezpieczeństwa zainstalowane w czterech różnych segmentach, przy czym każdy z czterech ciągów systemów bezpieczeństwa posiada pełną wydajność. Elementem nowości w stosunku do poprzedniej generacji jest też podwójna obudowa bezpieczeństwa i wewnętrzna struktura budynku reaktorowego. W przypadku najgroźniejszej możliwej awarii wyciek stopionego rdzenia oraz jego schładzanie będzie się odbywać w specjalnie do tego przeznaczonym dole chłonnym na dnie studni reaktora. Ściany i podłoże tego pomieszczenia są pokryte grubą warstwą betonu, a układ chłodzący pod dołem chłonnym umożliwia odprowadzenie ciepła powyłączeniowego, schłodzenie oraz szybkie zestalenie materiału rdzenia. Na wypadek pojawienia się wodoru w obudowie bezpieczeństwa zainstalowano około 40 katalitycznych urządzeń do usuwania (wypalania) tego gazu.

Reaktory AP-600 oraz AP-1000 firmy Westinghouse to z kolei konstrukcje reaktorów wodnych ciśnieniowych z bardzo rozbudowanymi pasywnymi systemami bezpieczeństwa. Systemy te w maksymalnie możliwym stopniu wykorzystują naturalne zjawiska i nie zawierają żadnych ruchomych elementów aktywnych. Liczba i stopień złożoności czynności obsługowych tych systemów została ograniczona do minimum. Rdzeń reaktora, zbiornik ciśnieniowy i jego struktura wewnętrzna są podobne do tych z wcześniejszych wersji reaktorów PWR firmy Westinghouse. Pętle chłodzące zawierają dwie gorące i cztery zimne gałęzie, a główne pompy chłodziwa zainstalowane są bezpośrednio w wytwornicach pary (rys. 5). W systemie awaryjnego chłodzenia rdzenia zainstalowano akumulatory wodne znane z poprzednich wersji reaktorów ciśnieniowych. Chłodzenie awaryjne następuje również za pomocą wody z układu oczyszczania chłodziwa (zbiorniki CMT). Nowością jest także wykorzystanie do chłodzenia obiegu pierwotnego wody z położonego powyżej reaktora olbrzymiego zbiornika (IRWST). Stalowy zbiornik obudowy bezpieczeństwa mieści cały obieg pierwotny wraz z pasywnymi systemami bezpieczeństwa. Zbiornik ten otoczony jest betonowym budynkiem ochronnym. Pomiędzy tym budynkiem a obudową bezpieczeństwa znajduje się szczelina gazowa pozwalająca na swobodny przepływ powietrza. Obniżanie nadciśnienia w stalowej obudowie jest realizowane wyłącznie na drodze naturalnej cyrkulacji i kondensacji pary. Ciepło z wnętrza obudowy bezpieczeństwa jest przewodzone przez stalową ścianę i unoszone przez przepływające powietrze. W przypadku dużej awarii rozszczelnieniowej naturalne chłodzenie przepływającym powietrzem jest wspomaga-

ne przez odparowanie wody na zewnętrznej powierzchni stalowej obudowy. Woda ta spływa grawitacyjnie do dysz spryskiwaczy ze zbiorników znajdujących się w szczycie budynku ochronnego.

Schemat typowego reaktora BWR drugiej generacji oraz jego obudowy bezpieczeństwa przedstawiono na rys. 6, rys. 7 zaś zawiera analogiczne schematy dla reaktora ABWR, a więc reaktora wrzącego trzeciej generacji. Projekt tego reaktora wykonany został przez firmę General Electric. Widoczne jest tu przede wszystkim znaczne uproszczenie bardzo istotnego układu reaktorowych pomp cyrkulacyjnych, polegające na wyeliminowaniu w projekcie zewnętrznych pętli recyrkulacyjnych chłodziwa. Rurociągi i zewnętrzne pompy recyrkulacyjne, a więc elementy będące miejscem potencjalnych wycieków chłodziwa, zastąpiono dziesięcioma wewnętrznymi pompami recyrkulacyjnymi umieszczonymi w komorze dolnej zbiornika ciśnieniowego reaktora. Rozwiązanie to zostało opracowane już wcześniej przez firmę ASEA-Atom i zastosowane w szwedzkich elektrowniach jądrowych. Zapotrzebowanie mocy do napędu pomp recyrkulacyjnych w reaktorze ABWR jest niemal o połowę niższe niż w przypadku pomp tradycyjnych, co dodatkowo wpływa korzystnie na efektywność całej elektrowni. Eliminacja zewnętrznych pętli recyrkulacyjnych zredukowała również narażenie personelu na promieniowanie podczas czynności obsługowych. Inną cechą reaktora ABWR są uproszczone, trzy całkowicie niezależne, aktywne, systemy bezpieczeństwa. Systemy te mają zdolność utrzymania rdzenia reaktora pod wodą w każdych warunkach. W przypadku awarii LOCA automatyczny system sterowania jest zdolny do kontrolowania przebiegu awarii w sposób niewymagający interwencji człowieka nawet przez 3 dni. Reaktor jest również wyposażony w pasywne systemy łagodzące skutki groźnych awarii, jak np. stopienie rdzenia. Jednym z nich jest system zatapiania wodą obszaru obudowy bezpieczeństwa poniżej zbiornika reaktora. Reaktor ABWR posiada również pasywny system chroniący obudowę bezpieczeństwa przed zniszczeniem w wyniku zbyt wysokiego ciśnienia.

Mówiąc o perspektywach rozwoju techniki reaktorów jądrowych warto nadmienić, że w ostatnich latach można zaobserwować na świecie i w Polsce pewien powrót do idei wspomnianych już reaktorów z moderatorem grafitowym i chłodziwem helowym. Reaktory te są dobrze znane i bezpieczne, choć nie zbudowano jeszcze komercyjnej wersji reaktora tego typu. Reaktor taki, np., o mocy elektrycznej bloku 300 MW, pracował w RFN w latach 1983 – 1989, po czym został wyłączony z przyczyn wyłącznie politycznych. W chwili obecnej prace nad tego rodzaju reaktorami prowadzone są głównie w krajach azjatyckich oraz w USA. Reaktory grafitowo – helowe mają wiele zalet eksploatacyjnych, a w przypadku wykorzystania toru jako materiały rodnego możliwe jest w nich powielanie, nawet z nadmiarem, izotopów rozszczepialnych. Wysoka temperatura helu opuszczającego reaktor umożliwia ponadto jego wykorzystanie także jako źródła ciepła technologicznego, np. we wspomnianym już także procesie konwersji węgla na paliwa płynne. Ten fakt w warunkach polskich może stanowić dodatkową zaletę reaktorów HTR (High Temperature Reactors). Jeszcze inną zaletą reaktorów HTR, również bardzo istotną w warunkach polskich, jest ich stosunkowo niewielka moc – do ok. 300 MW_e, co ma znaczenie ze względów lokalizacyjnych, jak również z uwagi na uwarunkowania sieciowe, a zwłaszcza na tzw. „wyprowadzenie mocy".

8. Podsumowanie

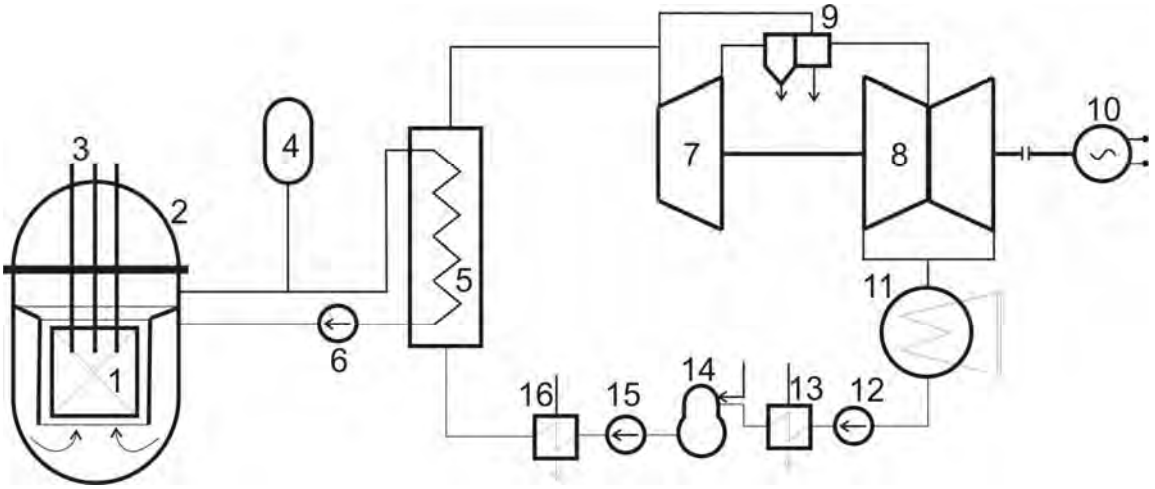
Sugerowana we wstępie celowość, a może nawet konieczność, budowy elektrowni jądrowych w Polsce jest przez pewne środowiska stanowczo kontestowana. Podstawowym argumentem wysuwanym przez część z nich są kwestie środowiskowe, czyli zagrożenia stwarzane przez eksploatację bloków energetycznych z reaktorami jądrowymi. Akurat te zarzuty są, paradoksalnie, najmniej uzasadnione. Jak wykazują statystyki, i o czym już wspomniano, produkcja elektryczności w układach z jądrowymi reaktorami wodnymi jest z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz zagrożeń środowiskowych bardzo korzystna i porównywalna jedynie z energetyką gazową. Przedstawione powyżej reaktory wodne trzeciej generacji spełniają bardzo rygorystyczne wymagania stawiane elektrowniom jądrowym. Zgodnie z tymi wymaganiami, nawet w przypadku rozerwania obiegu pierwotnego obszar położony w odległości powyżej ok 1 km od elektrowni powinien być całkowicie bezpieczny i nie wymagać żadnych natychmiastowych działań ochronnych.

Możliwość budowy elektrowni jądrowej w Polsce jest uzależniona jednak od spełnienia także innych warunków, niż wyjątkowo ostre warunki bezpieczeństwa. Przede wszystkim niezbędne jest przyzwolenie społeczeństwa, a środowiska tzw. ekowojowników z pewnością wykorzystają wszystkie możliwości, aby nie dopuścić do akceptacji rozwoju energetyki jądrowej. Budowa elektrowni jądrowej wymaga także wielokierunkowych działań władz centralnych, a przede wszystkim Ministerstwa Gospodarki, w ramach, którego istnieje Departament Energetyki Jądrowej. Konieczna jest odpowiednia modyfikacja obo-

wiązującego ustawodawstwa, w znacznym stopniu już zrealizowana, jak też niezbędny jest szereg bardzo istotnych działań „pomocniczych" – odpowiednie dostosowanie elektroenergetycznych sieci przesyłowych, powstanie na bazie Państwowej Agencji Atomistyki energicznie i restrykcyjnie działające organu nadzorczego, utworzenie odpowiedniego zaplecza naukowo-badawczego, czy też stworzenie warunków do maksymalnego wykorzystania możliwości polskich firm przemysłowych i budowlanych. Istnieje jeszcze jeden problem, o którym „głośno" się na ogół nie wspomina. Elektrownia jądrowa jest przedsięwzięciem niezwykle kapitałochłonnym, a z drugiej strony standardowy czas pracy obecnie budowanych bloków jądrowych to 60 lat, przy relatywnie niskich kosztach eksploatacyjnych. Konieczne jest, zatem zapewnienie odpowiednich źródeł finansowania, przy zapewnieniu opłacalności całej inwestycji. Jest to tym trudniejsze, że bloki jądrowe są w warunkach europejskich instalacjami o charakterze jednostkowym, indywidualnym, z trudnymi do dokładnego określenia całkowitymi kosztami. Niewątpliwie przeciwnicy powstania w Polsce elektrowni jądrowej będą wskazywać na przykład fińskiego bloku z reaktorem EPR w elektrowni Olkiluoto, którego budowa się znacznie przedłuża przy wzrastających kosztach. Z drugiej jednak strony budowa bloków jądrowych w Polsce może wiązać się z bardzo potrzebną zmianą struktury sektora energetycznego oraz z innymi, trudno wymiernymi korzyściami. Polska ma, jak wiadomo, unikalną strukturę źródeł elektryczności, gdyż ponad 90% procent tego nośnika energii powstaje na bazie węglowej. Utrzymanie takiego stanu nie wydaje się możliwe, a odnawialne źródła energii w naszych warunkach nie są w stanie dostarczać znaczących ilości prądu elektrycznego. Wielką niewiadomą są źródła gazu łupkowego. Nawet jednak gdyby potwierdziły się optymistyczne prognozy dotyczące tych źródeł, to spalanie znacznych ilości takiego paliwa w elektrowniach z turbinami gazowymi byłoby ewidentnym marnotrawstwem tego cennego paliwa i także surowca chemicznego. Rozwój energetyki jądrowej realizowany w odpowiedni sposób może i powinien ponadto przyczynić się do rozwoju sektora przemysłowego oraz badawczego związanego z tą bardzo nowoczesną i wymagającą technologicznie sferą wytwarzania elektryczności. Nie ulega przy tym wątpliwości, że pomimo przeprowadzenia niezbędnych działań zmierzających do ograniczenia energochłonności polskiej gospodarki oraz sektora komunalnego, zużycie elektryczności w Polsce będzie wzrastać, jeśli dalej mamy się wszechstronnie rozwijać.

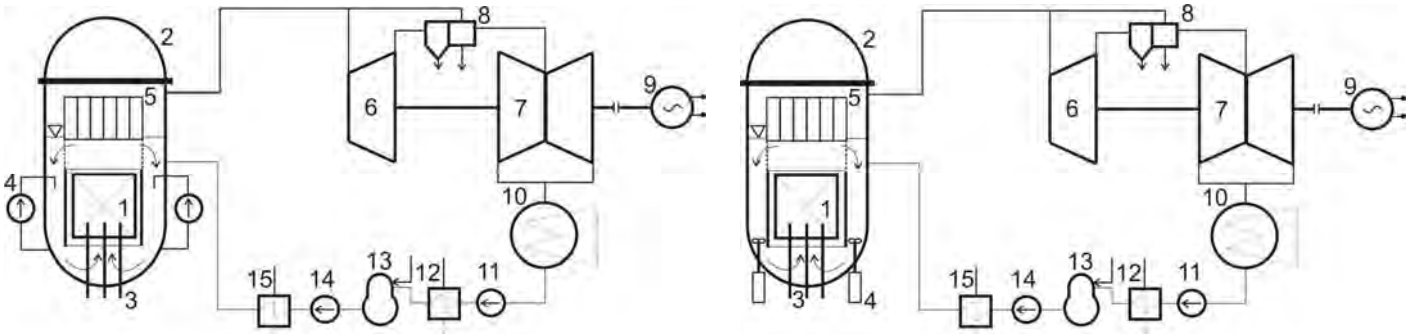
Bibliografia

Celiński Z., Strupczewski A.: Podstawy energetyki jądrowej, WNT, Warszawa 1984.
Hore-Lacy I.: Nuclear Energy in the 21st Century, Elsevier Inc., Burlington 2006.
Jezierski G.: Energia jądrowa wczoraj i dziś, WNT, Warszawa 2005.
Składzień J.: Wydarzenia w Fukushimie, a perspektywy rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, Informator Oddziału Wrocławskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Nr 12 i 13, Wrocław 2012.
Składzień J., Bury T.: Współczesne układy zabezpieczeń w elektrowniach jądrowych, Energetyka cieplna i zawodowa 6, 2009.
Składzień J., Bury T.: Czy i jaka energetyka jądrowa w Polsce, Energetyka cieplna i zawodowa 7/8, 2010.
Składzień J., Bury T., Fic A.: Bezpieczeństwo współczesnych wodnych reaktorów jądrowych na tle dotychczasowych najpoważniejszych awarii w energetyce jądrowej, rozdział monografii Jeleń K., Rau Z. (red.) – Energetyka jądrowa w Polsce, Wolters Kluwer Polska, Warszawa 2012.
Strupczewski A.: Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej, WNT, Warszawa 1990.
Strupczewski A.: Dlaczego awaria typu Czarnobyla nie może powtórzyć się w Polsce, referat wygłoszony podczas konferencji: Nukleonika na początku XXI wieku, XII Zjazd Polskiego Towarzystwa Nukleonicznego, Warszawa 16.04.2011.
Tsoulfanidis N. (ed.): Nuclear Energy, Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, 2013.
Mohrbach L.: Tohoku-Kanto Earthquake and Tsunami March 11, 2011 and Consequences for Northeast Honshu Nuclear Power Plants, VGB Power Tech., Quelle: GRS, 2011.
http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima I Nuclear Power Plant, 15.03.2011.
http://en.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_w_Bhopalu.
http://en.wikipedia.org/wiki/Tama_w_Banqiuao.
http://en.wikipedia.org/wiki/Kysztym.



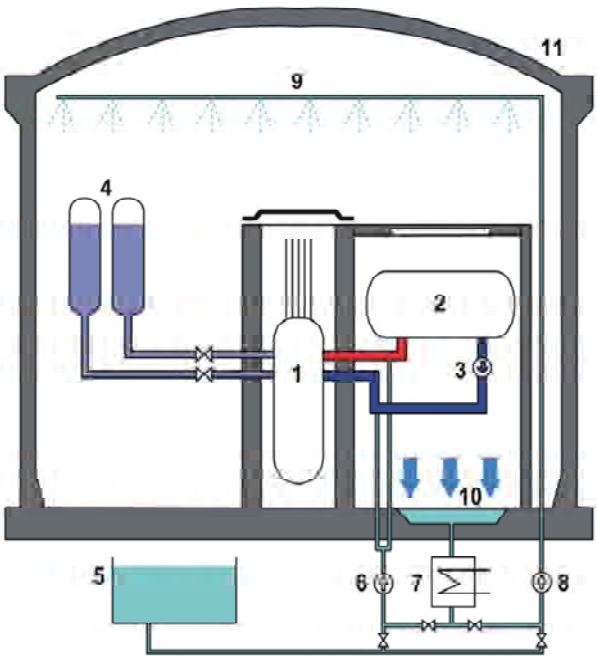
Rys. 1. Schemat bloku jądrowego z reaktorem wodnym ciśnieniowym PWR [Źródło: Praca własna autora]

1 – rdzeń reaktora, 2 – zbiornik reaktora, 3 – pręty pochłaniające neutrony, 4 – stabilizator ciśnienia, 5 – wytwornica pary , 6 – główna pompa cyrkulacyjna, 7 – część wysokoprężna turbiny, 8 – część niskoprężna turbiny, 9 – separator i przegrzewacz pary, 10 – generator prądu elektrycznego, 11 – skraplacz, 12 – pompa skroplin, 13 – podgrzewacze skroplin, 14 – odgazowywacz, 15 – pompa wody zasilającej, 16 – podgrzewacze wody zasilającej



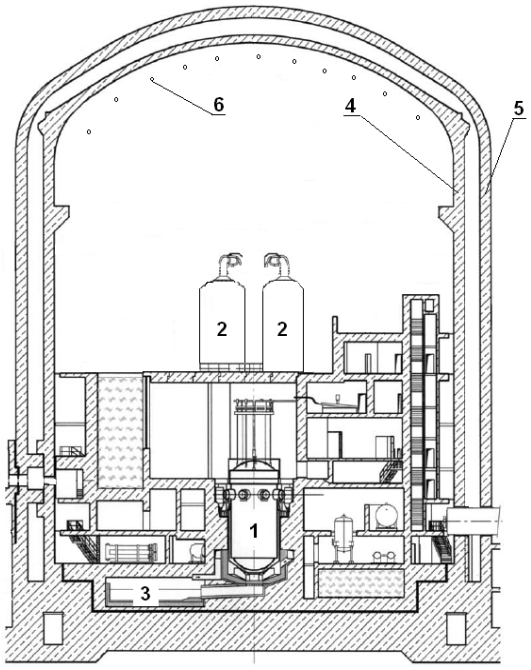
Rys. 2. Schemat bloku jądrowego z reaktorem wodnym wrzącym: a) BWR, b) ABWR [Źródło: Praca własna autora]

1 – rdzeń reaktora, 2 – zbiornik reaktora, 3 – pręty pochłaniające neutrony, 4 – reaktorowe pompy cyrkulacyjne, 5 – separator wilgoci, 6 – część wysokoprężna turbiny, 7 – część niskoprężna turbiny, 8 – separator i przegrzewacz pary , 9 – generator prądu elektrycznego, 10 – skraplacz, 11 – pompa skroplin, 12 – podgrzewacze skroplin, 13 – odgazowywacz, 14 – pompa wody zasilającej, 15 – podgrzewacze wody zasilającej,



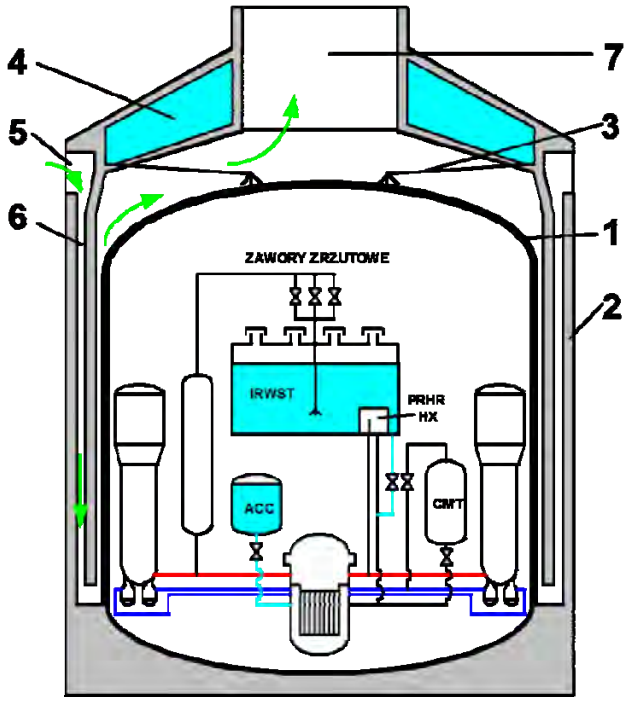
Rys. 3. Obudowa bezpieczeństwa oraz typowe układy lokalizacji awarii w reaktorze PWR II generacji. [Źródło: Wykonał mgr inż. Tomasz Bury]

1 – reaktor, 2 – wytwornice pary oraz stabilizator ciśnienia, 3 – główna pompa cyrkulacyjna, 4 – akumulatory wodne, 5 – awaryjny zbiornik wody, 6 – pompa systemu wtrysku chłodziwa, 7 – wymiennik ciepła, 8 – pompa systemu zraszania, 9 – spryskiwacze, 10 – zbiornik ściekowy wody, 11 – obudowa bezpieczeństwa



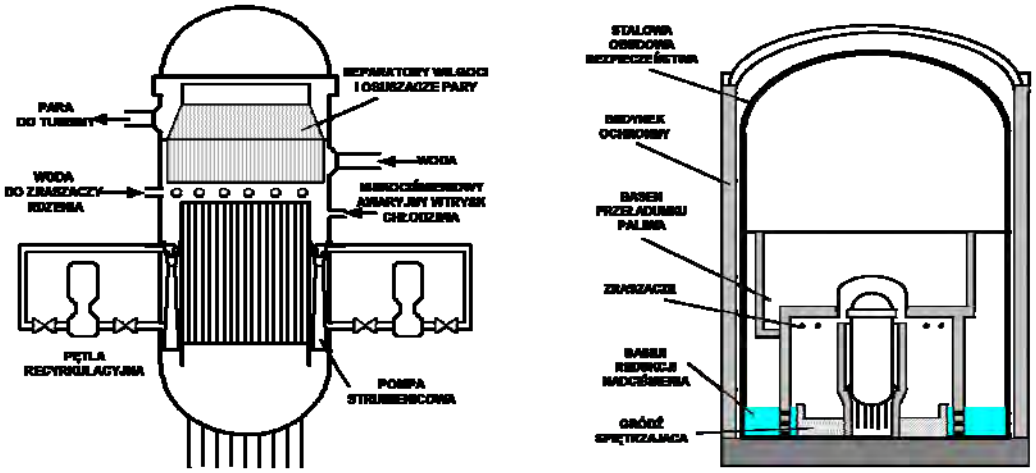
Rys. 4. Przekrój przez obudowę bezpieczeństwa reaktora EPR [Źródło: Wykonał mgr inż. Tomasz Bury]

1 – zbiornik ciśnieniowy reaktora, 2 – wytwornice pary, 3 – „łapacz" stopionego rdzenia, 4 – wewnętrzna obudowa bezpieczeństwa, 5 – zewnętrzna obudowa bezpieczeństwa, 6 – dysze systemu zraszania

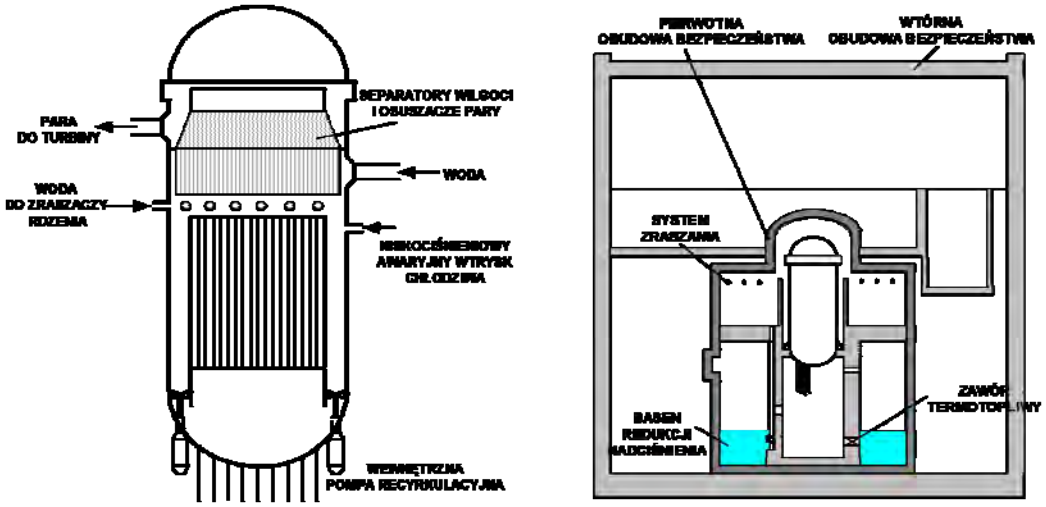


Rys. 5. Uproszczony schemat systemów bezpieczeństwa reaktora AP-600 (AP-1000)
[Źródło: Wykonał mgr inż. Adam Fic]

1 – stalowa obudowa bezpieczeństwa, 2 – betonowy budynek ochronny, 3 – zewnętrzny system zraszania obudowy bezpieczeństwa, 4 – zbiornik wody, 5 – dopływ powietrza, 6 – szczelina gazowa, 7 – wypływ powietrza



Rys. 6. Schemat układu chłodzenia oraz obudowy bezpieczeństwa typowego reaktora BWR
[Źródło: Wykonał mgr inż. Adam Fic]



Rys. 7. Schemat układu chłodzenia oraz obudowy bezpieczeństwa reaktora ABWR
[Źródło: Wykonał mgr inż. Adam Fic]

EkoAtom edukacja

Postępowanie z wysokoaktywnymi
głębokie składowiska geologiczne.

Wstęp

Podczas wieloletniej eksploatacji reaktorów elektrowni jądrowej powstają odpady promieniotwórcze, które mogą mieć szkodliwy wpływ na ludzi oraz środowisko naturalne. Zgodnie z polskim Prawem Atomowym są to „materiały stałe, ciekłe lub gazowe, zawierające substancje promieniotwórcze lub skażone tymi substancjami, których wykorzystanie jest niecelowe lub niemożliwe". Z definicji tej wynika, że praktycznie za odpady promieniotwórcze mogą być uznane wszystkie urządzenia i materiały wykorzystywane w zakładach w jakikolwiek sposób związanych z przemysłem jądrowym, a więc w warunkach Polskich przede wszystkim w medycynie nuklearnej, chemii i technice jądrowej.

Materiały te oczywiście różnią się między sobą aktywnością i długością życia, a więc potencjalnie szkodliwym oddziaływaniem na otoczenie, jak również okresem, przez jaki muszą być przechowywane w sposób zapewniający odizolowanie od środowiska.

Z eksploatacją elektrowni jądrowej wiąże się powstawanie wypalonego paliwa jądrowego, zawierającego m.in. wysokoaktywne i długożyciowe produkty rozpadu uranu. Wypalone paliwo jądrowe wymaga długotrwałego magazynowania, a potem może być poddawane specjalnemu procesowi jego przerobu i unieszkodliwiania. Produkty przerobu paliwa wypalonego są wysokoaktywnymi odpadami promieniotwórczymi, wymagającymi odpowiedniego zabezpieczenia i składowania w miejscach uniemożliwiających bezpośredni dostęp człowieka oraz ograniczających wpływ na środowisko naturalne. Społeczność międzynarodowa doszła do wniosku, że najlepiej nadają się do tego celu głębokie składowiska geologiczne, chronione przed wspomnianymi wcześniej czynnikami, jak również zapewniające izolację zmagazynowanych w nich odpadów promieniotwórczych od środowiska naturalnego przez kilkusetmetrową nieprzepuszczalną warstwę skał.

Klasyfikacja odpadów promieniotwórczych.

Odpady powstające w cyklu życia elektrowni jądrowej dzieli się na kilka grup, różniących się między sobą aktywnością i okresem półrozpadu, a więc szkodliwością dla otoczenia i czasem przez jaki muszą być bezpiecznie odizolowane od środowiska. Aby ułatwić państwom członkowskim ustalanie norm dotyczących ich podziału, Międzynarodowa Agencja Energetyki Atomowej przedstawiła propozycję klasyfikacji dla odpadów stałych [1]:

1. Odpady wyłączone (Exempt waste – EW) – zawierają tak niskie stężenia radionuklidów (zbliżone do poziomu tła), że nie wymagają żadnych środków ochrony przed promieniowaniem, przechowuje się je tak, jak odpady konwencjonalne.

2. Odpady bardzo krótkożyciowe (Very short live waste – VSLW) – zawierają wyłącznie radionuklidy o bardzo krótkim czasie połowicznego zaniku (do 100 dni), po sprasowaniu są przechowywane w miejscu wytworzenia aż do spadku radioaktywności do poziomu odpadów wyłączonych.

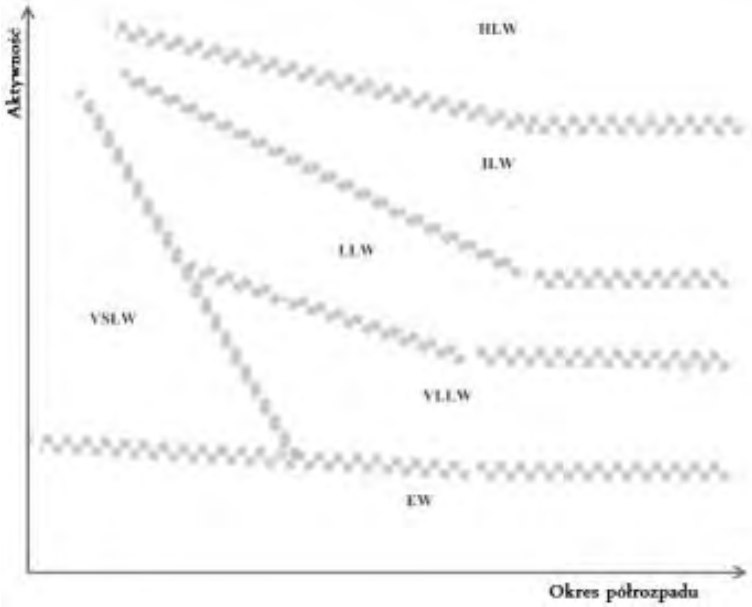
ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI

Maciej Lipka

3. Odpady bardzo niskoaktywne (Very low level waste – VLLW) – o stężeniu radionuklidów poniżej grupy EW, mogą stanowić ograniczone zagrożenie i jako takie są przechowywane w składowiskach powierzchniowych.

4. Odpady niskoaktywne (Low level waste – LLW) – zawierają małe stężenia radionuklidów długożyciowych, bądź duże krótkożyciowych. Są przeznaczone do składowania w składowiskach płytkich (do kilkudziesięciu metrów) przez okres do około 300 lat. Przypisano im orientacyjne poziomy aktywności (zależne od rodzajów i ilości barier) do średnio 400 Bq/g dla promieniowania alfa, oraz poziom kilkudziesięciu kBq/g dla beta i gamma.

5. Odpady średnioaktywne (Intermediate level waste – ILW) – wymagają lepszej i dłuższej izolacji od otoczenia, niż w przypadku poprzedniej grupy, przede wszystkim przez dłuższy okres półrozpadu. Orientacyjny poziom ich aktywności to 10^6 – 10^{10} Bq/kg. Wskazane dla nich jest składowanie na głębokości od kilkudziesięciu do kilkuset metrów, co ogranicza możliwość przeniknięcia do środowiska w dłuższej perspektywie czasowej.



Rys. 1 – Klasyfikacja odpadów radioaktywnych, na podstawie [1]
[Źródło: Classification of radioactive waste, IAEA standards for protecting people and the environment – General Safety Guide No. GSG-1, IAEA, Vienna 2009, s. 7]

6. Odpady wysokoaktywne (High level waste – HLW) – zawierają duże ilości wysokoaktywnych radionuklidów. Określono dla nich orientacyjny poziom aktywności - 10^4 – 10^6 TBq/m^3 i po kilkudziesięcioletnim okresie chłodzenia planowane jest ich długoterminowe przechowywanie w formacjach geologicznych. Do grupy tej należy przede wszystkim wypalone paliwo z elektrowni jądrowych jak również odpady z jego przerobu.

Przyjmuje się, że roczna eksploatacja bloku wielkości 1GW powoduje wytworzenie 300 m^3 średnioaktywnych i niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych różnej gęstości (wydaje się to dużo, lecz właści-

wego oszacowania skali trzeba wiedzieć, że 50 m basen olimpijski ma objętość 2500 m^3 a więc ponad ośmiokrotnie więcej) oraz 1,5 m^3 wysokoaktywnego, wypalonego paliwa [2]. Warto wspomnieć, że w tej niewielkiej ilości odpadów wysokoaktywnych zawiera się 95% radioaktywności [3].

Dla porównania taka sama moc zainstalowana w bloku węglowym (a więc takim, w jakim produkowane jest około 90 % polskiej energii elektrycznej) powoduje wytworzenie 20 milionów ton popiołu, które gdyby były poddane wymogom dla przemysłu jądrowego należałoby składować tak jak odpady nisko-aktywne (ok. 200 Bq/kg) [4].

Określenia polskiego Prawa Atomowego

Rozdział 7

Odpady promieniotwórcze i wypalone paliwo jądrowe

Art. 47. 1. Odpady promieniotwórcze są kwalifikowane ze względu na poziom aktywności lub moc dawki na powierzchni do kategorii odpadów: niskoaktywnych, średnioaktywnych i wysokoaktywnych. Kategorie mogą być podzielone na podkategorie ze względu na okres połowicznego rozpadu zawartych w odpadach izotopów promieniotwórczych lub moc cieplną.

Art. 52. 1. Odpady promieniotwórcze ciekłe lub gazowe, powstałe w wyniku działalności określonej w art. 4 ust. 1, mogą być odprowadzane do środowiska, o ile ich stężenie promieniotwórcze w środowisku może być pominięte z punktu widzenia ochrony radiologicznej. Sposób odprowadzania odpadów i ich dopuszczalną aktywność określa się w zezwoleniu.

2. Odpady promieniotwórcze, które zostały przetworzone lub nie wymagają przetwarzania, oraz wypalone paliwo jądrowe, które nie będzie przerabiane – są składowane w składowiskach.

3. Wypalone paliwo jądrowe przeznaczone do składowania traktuje się jak odpady wysokoaktywne.

4. Odpady promieniotwórcze można składować wyłącznie w stanie stałym, w opakowaniach zapewniających bezpieczeństwo ludzi i środowiska pod względem ochrony radiologicznej, przy zapewnieniu odprowadzania ciepła i niedopuszczeniu do powstania masy krytycznej oraz prowadzeniu stałej kontroli tych czynników w okresie składowania, a także po zamknięciu składowiska.

Postępowanie z odpadami nisko i średnioaktywnymi

Składowanie odpadów innych, niż wysokoaktywne jest dobrze opanowane i od wielu lat wdrożone na całym świecie. W Polsce za tego typu działalność odpowiada Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP), który od roku 1961 bezpiecznie zarządza Krajowym Składowiskiem Odpadów Promieniotwórczych w Różanie (KSOP) na Mazowszu, zlokalizowanym w dawnym forcie wojskowym.

Zanim odpady trafią do składowiska są kondycjonowane, czyli przygotowywane do długotrwałego i bezpiecznego przechowywania. Proces ten obejmuje zmniejszanie objętości poprzez sprasowanie, zestalanie, zatapianie w trudno przepuszczalnym materiale, takim jak beton, asfalt lub żywica i zapakowanie w szczelny pojemnik osłonowy. Tak zabezpieczone odpady przewożone są na miejsce składowania i umieszczane w warunkach zapewniających dokładne odizolowanie od środowiska zewnętrznego. W przypadku KSOP w Różanie są to betonowe budowle o grubości ścian 1,2 - 1,5 metra.

Składowisko i jego otoczenie jest monitorowane radiologicznie przez kilka niezależnych instytucji. Dawki promieniowania gamma otrzymywane przez mieszkańców Różana nie odbiegają od tych dla reszty kraju, pochodzących wyłącznie od źródeł naturalnych [5]. Po roku 2020 wobec zapełnienia składowiska konieczna będzie budowa nowego.

Postępowanie z odpadami wysokoaktywnymi

Od początków istnienia przemysłu jądrowego zdawano sobie sprawę z problemów, jakie stwarzają odpady promieniotwórcze, zwłaszcza długożyciowe i wysokoaktywne. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat opracowano różne koncepcje ich przechowywania, od składowania w płytkich, tymczasowych przechowalnikach, poprzez zatapianie w oceanie, magazynowanie w formacjach geologicznych i odwiertach, aż po wysyłanie w przestrzeń kosmiczną. Część z nich została zakazana międzynarodowymi konwencjami (zatapianie, składowanie w lodzie antarktycznym), części nie zrealizowano ze względu na koszty (przestrzeń kosmiczna), inne projekty (iniekcja skalna) zostały zaniechane ze względu na niepewność dotyczącą zachowania się odpadów. Obecnie najbardziej rozpowszechnione są przechowalniki znajdujące się w miejscach wytworzenia odpadów oraz centralne krajowe składowiska powierzchniowe i płytkie. Rosnąca ilość odpadów, przede wszystkim wysokoaktywnych wymusiła jednak podjęcie prac nad głębokimi składowiskami geologicznymi – w odwiertach, opuszczonych kopalniach, bądź wyrobiskach solnych.

Powody budowy i wymagania stawiane składowiskom geologicznym

Podstawową zasadą, wyznawaną podczas procesu wyboru lokalizacji i budowy składowiska jest jego długoterminowe bezpieczeństwo i uniemożliwienie emisji radionuklidów do otoczenia, zapewnione przez trwałość bariery geologicznej, bez dozoru od chwili jego zamknięcia. Miejsca wybrane na składowiska muszą więc być asejsmiczne, niezatapialne (brak zagrożenia ze strony powodzi, jak również podziemnych cieków wodnych), nieprzydatne gospodarczo (brak bogactw kopalnych) i możliwie oddalone od skupisk siedzib ludzkich.

Podczas procesu wyboru lokalizacji analizuje się dane dotyczące przede wszystkim [6]:

a. Rodzaju formacji geologicznej, w której zostanie umiejscowione składowisko (głębokość, wytrzymałość struktur).
b. Przewidywanych przyszłych zmian środowiska naturalnego. Wymagana jest odporność na czynniki sejsmiczne, wulkaniczne i tektoniczne, jak również możliwe zmiany klimatu.
c. Hydrogeologii – identyfikowane są cieki wodne i ich ewentualny wpływ na trwałość i odizolowanie składowiska.
d. Geochemii – analizowana jest możliwość rozprzestrzeniania się radionuklidów poza składowisko, w wyniku czynników fizykochemicznych takich jak m.in. sorpcja, dyfuzja i oddziaływania chemiczne oraz biologiczne.
e. Oddziaływania człowieka – wybierane są miejsca odległe od wszelkiego rodzaju złóż bogactw naturalnych, co minimalizuje ryzyko zainteresowania składowiskiem w dalekiej przyszłości.
f. Łatwość transportu odpadów do składowiska – analizowane są możliwości budowy dróg dojazdowych.
g. Ochronę środowiska naturalnego – analizowany jest możliwy wpływ składowiska na degradację natury.

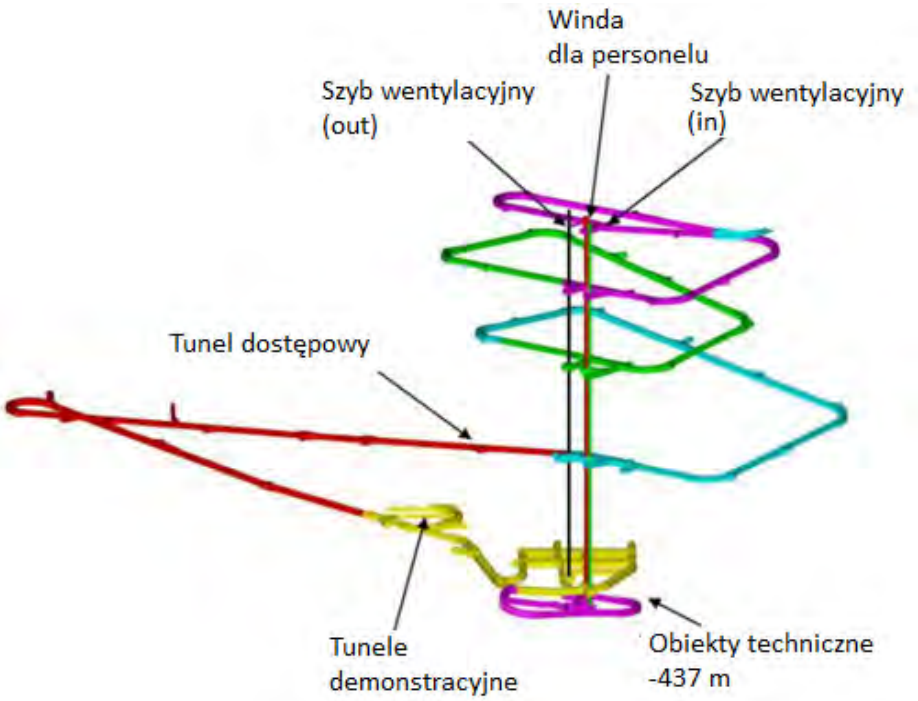
Plany i stan na dziś

Do tej pory zbudowano na całym świecie kilkanaście ośrodków badawczych, w których zbierane są dane na temat zachowania się odpadów promieniotwórczych w głębokich składowiskach. Powstało także kilka składowisk „przemysłowych", w żadnym z nich nie składuje się jednak wypalonego paliwa (choć w zlokalizowanym w USA składowisku WIPP są przechowywane wysokoaktywne odpady powstałe w wyniku produkcji broni jądrowej). W najbliższym stuleciu na całym świecie planowane jest wybudowanie kilkunastu składowisk odpadów wysokoaktywnych, jednak po zamknięciu projektu Yucca Mountain w USA jedynym będącym obecnie w fazie konstrukcji jest Onkalo w Olkiluoto w Finlandii.

Przykład – Onkalo (Finlandia)

Historia

Prace nad koncepcją głębokiego składowania wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych rozpoczęły się wraz ze startem fińskiego programu energetyki jądrowej w latach siedemdziesiątych XX wieku. W latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych na terenie Finlandii przeprowadzono szereg badań dotyczących potencjalnych lokalizacji składowi-



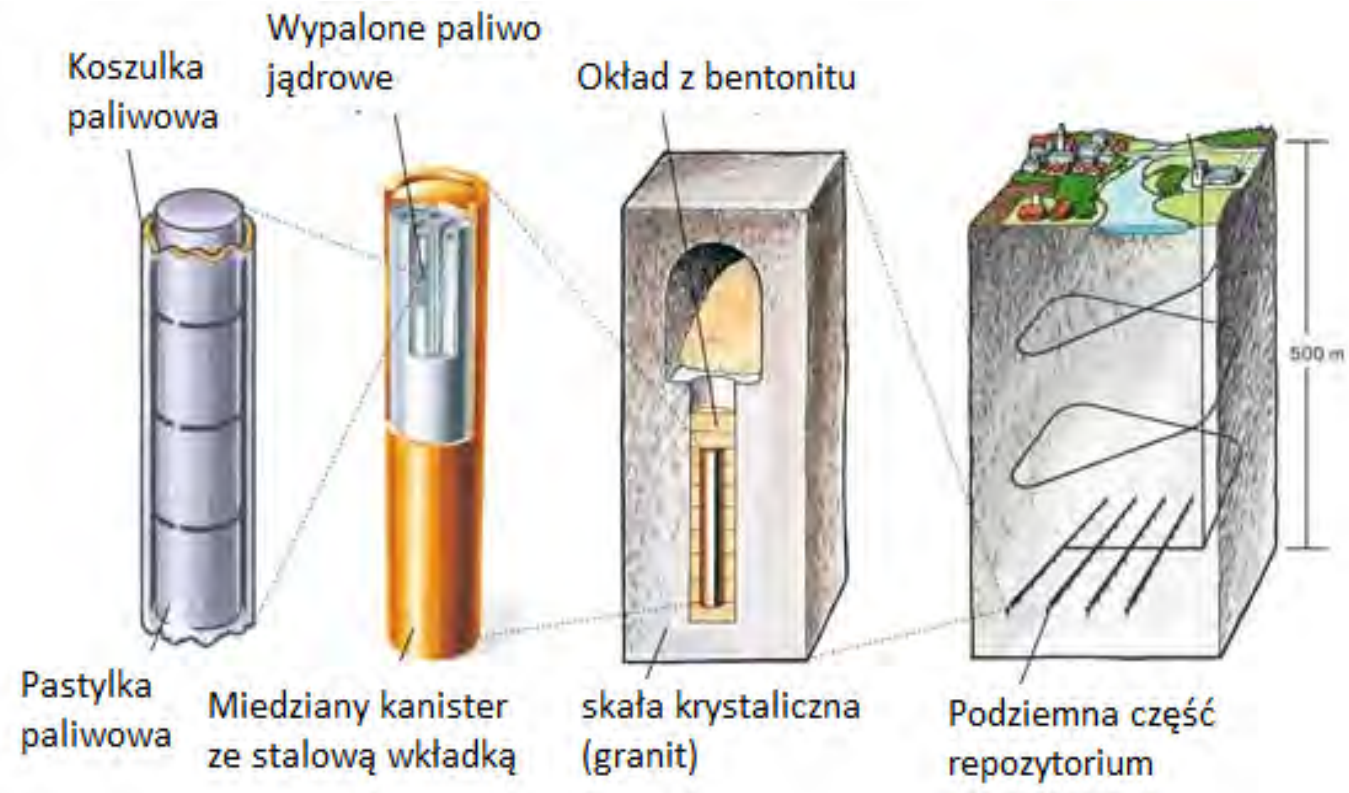
Rys. 2 – Schemat składowiska Onkalo, na podstawie [7] System KBS-3 zakłada, że po wypełnieniu składowiska tunele dostępowe zostaną zasypane i cały kompleks nigdy już nie będzie otwierany.
[Źródło: E. Palonen: Finnish experience Facility Design and ONKALO, Blue Ribbon Commision Open Meeting, Eurajoki (prezentacja), s. 15]

ska, które pozwoliły na wskazanie w 1999 roku Olkiluoto. Decyzja ta została dwa lata później zatwierdzona przez fiński parlament. Prace budowlane rozpoczęto w 2004 roku, otwarcie planowane jest na rok 2020.

Ogólna charakterystyka

Składowisko znajduje się około 185 kilometrów na północny zachód od Helsinek, na wyspie Olkiluoto. Miejsce zostało wybrane ze względu na bliskość elektrowni jądrowej, dzięki czemu uniknie się konieczności transportowania odpadów na duże odległości. Główne poziomy, na których będą składowane odpady mają się znajdować na głębokości 420 i 520 m poniżej poziomu morza–a dostęp do nich zostanie zapewniony pięciokilometrowym, spiralnym tunelem o nachyleniu 1/10 oraz szybem z windą. Do dnia 08.08.2012 udało się wydrążyć tunele do głębokości 455 m. Pod koniec roku 2012 firma Posiva Oy (dostawca rozwiązania i konstrukcji) wystąpiła o licencję na budowę instalacji składowiska na odpowiednich głębokościach, otwarcie zaplanowano na rok 2020. Łączna objętość składowiska wynosić będzie 365 tys. m^3 Docelowo ma pomieścić około 28 tys. ton wypalonego paliwa i zostać zapełnione oraz zamknięte na zawsze około roku 2120 [7].

Przewidywany koszt inwestycji to 3 miliardy euro, z czego 650 milionów kosztować będzie sama budowa składowiska, a reszta przeznaczona zostanie na obsługę i zamknięcie składowiska. Kwota ta wydaje się bardzo duża, lecz należy



Rys. 3 – Schemat systemu KBS-3, na podstawie [11]
[Źródło: - http://www.skb.se/Templates/Standard____24109.aspx]

pamiętać, że zaledwie ¼ wydana zostanie już, a pozostałe ¾ zostanie rozłożone na 100 lat działania składowiska. Budowa jest finansowana z podatku odprowadzanego przez operatorów fińskich elektrowni jądrowych [8].

Bariery ochronne

System barier mających zapewnić szczelność składowiska oparto na szwedzkiej koncepcji KBS-3. Oznacza to, że wypalone paliwo, po około trzydziestoletnim okresie chłodzenia, jest zamykane za pomocą wiązki elektronów w pojemnikach ze stali, wkładanych w kolejne, tym razem miedziane kanistry. Pojemniki te są otaczane izolującą warstwą bentonitu, który zapewnia dodatkową izolację i zabezpiecza przed wilgocią. Dopiero tak przygotowany „pakiet" trafia do podziemnego składowiska z litego granitu, w którym jest umieszczana pionowo w warstwie betonu pod poziomem tunelu dostępowego w tak zwanej niszy depozytowej [9][10].

Podsumowanie

Zapewnienie rozwiązania problemu składowania odpadów wysokoaktywnych ma kluczowe znaczenie dla przyszłości przemysłu jądrowego. Wraz z rozwojem energetyki jądrowej przybywać będzie odpadów z wypalonego paliwa, które trzeba będzie bezpiecznie składować przez tysiące lat. Jedynym rozwiązaniem, które jest w stanie zapewnić w tym czasie wysoki poziom bezpieczeństwa i odizolowania od środowiska wydają się być głębokie składowiska, w których odpady otoczone kilkoma warstwami osłony „inżynierskiej" umieszczone są pod kilkusetmetrową warstwą nieprzepuszczalnej skały.

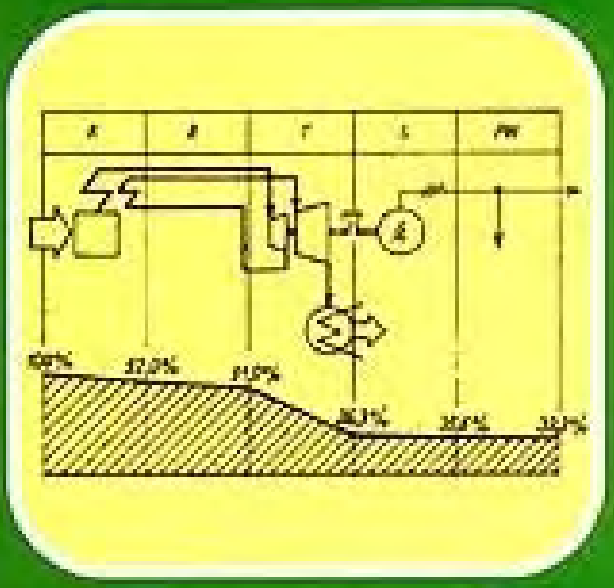
Obawy budzić może los odpadów pozostawionych bez nadzoru przez tysiące lat, lecz pewnych dowodów na bezpieczeństwo tego rozwiązania dostarczyła nam jednak sama natura. W Oklo położonym w afrykańskim Gabonie przy okazji eksploatacji złóż uranu natrafiono na produkty rozszczepienia, będące efektem działania naturalnego "reaktora jądrowego" sprzed około 1,8 miliarda lat. Warstwa skał, w której się te produkty znajdowały skutecznie zatrzymała ich migrację aż po dziś dzień (oczywiście nie było tam warstwy osłon inżynierskich, lecz „goły" wypalony uran, a więc z naszego punktu widzenia odpady [12].

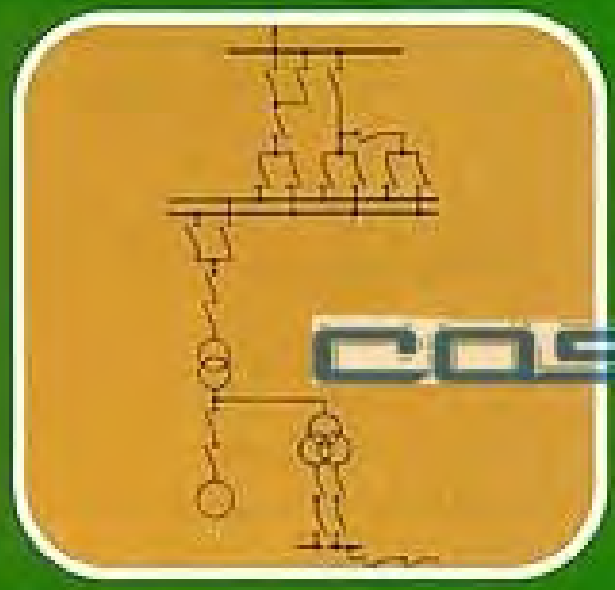
Pomimo rozwoju obiecujących technologii przerobu i wykorzystania wypalonego paliwa, jak choćby możliwość spalenia znaczącej jego części w reaktorach IV generacji, zawsze pozostaną odpady wymagające składowania, przez co odpowiednie składowiska będą musiały zostać wybudowane w kilkudziesięcioletniej perspektywie czasowej.

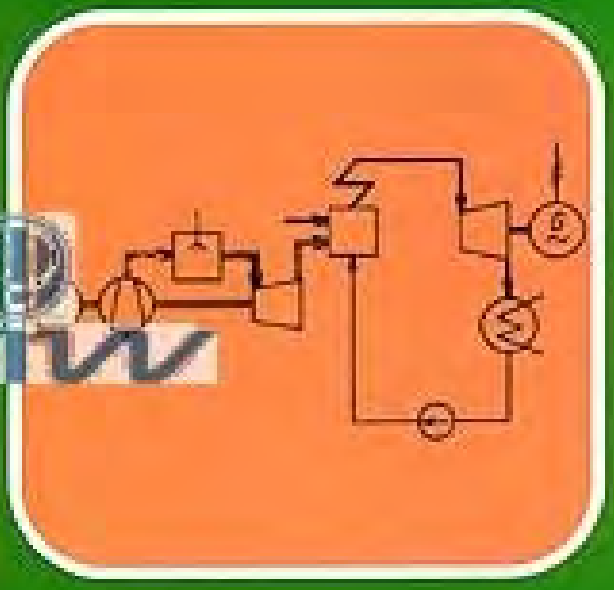
Bibligrafia

[1] Classification of radioactive waste, IAEA standards for protecting people and the environment, IAEA, Vienna 2009
[2] http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/manradwa.html
[3]http://www.nda.gov.uk/ukinventory/documents/Reports/upload/2010-UK-Radioactive-Waste-Inventory-Summary-of-the-2010-Inventory.pdf
[4] http://www.epa.gov/radiation/tenorm/coalandcoalash.html
[5] http://www.zuop.pl/ksop.html
[6] Siting of geological disposal facilities – a safety guide, IAEA, Vienna 1994
[7] E. Palonen: Finnish experience Facility Design and ONKALO, Posiva Oy
[8] http://www.posiva.fi/en/final_disposal/total_costs_and_funding_for_final_disposal
[9] E. Palonen, S. Mustonen, T. Aikas:Underground repository facility for nuclear waste –underground characterization and research facility Onkalo, Posiva Oy, Finland
[10] http://www.posiva.fi/en/final_disposal/the_principles_for_final_disposal
[11] http://www.skb.se/Templates/Standard___24109.aspx
[12] B. Nagy, M. J. Rigali: Newly discovered, organic matter-rich natural fission reactors at Oklo and Bangombé: Are they useful analogs for long-term anthropogenic nuclear waste containment?, Waste Management

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE







cosiw

Damazy Laudyn
Maciej Pawlik
Franciszek Strzekzyk

ELEKTROWNIE

Do nabycia w sklepie internetowym

REAKTORY PODKRYTYCZNE STEROWANE AKCELERATORAMI

REALNE ROZWIĄZANIE PROBLEMU ODPADÓW NUKLEARNYCH?

Piotr Darnowski

Streszczenie

Praca omawia podstawy fizyczne działania reaktorów podkrytycznych sterowanych akceleratorami. Omawiane są ogólne zasady konstrukcji tego typu reaktorów z naciskiem na ich zalety oraz wady. Nakreślone są potencjalne możliwości zastosowania technologii ADS w energetyce jądrowej w kontekście zamknięcia cyklu paliwowego i utylizacji (transmutacji) odpadów jądrowych.

Abstract

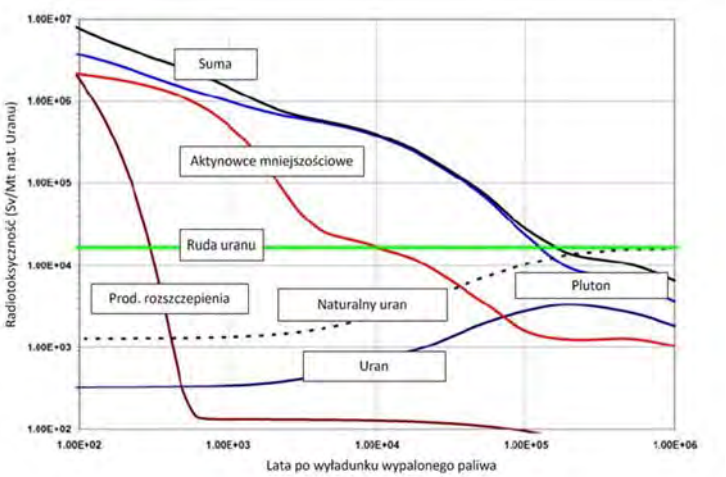
The Paper briefly describes physical principles of Accelerator Driven Systems (ADS) reactors with special emphasis onto their general design and their advantages and disadvantages. The potential capabilities and role of ADS technology in the nuclear industry is described with special attention given to nuclear fuel cycle closure and utilization (transmutation) of nuclear waste.

Wstęp

Jednym z najpopularniejszych argumentów, którymi posługują się przeciwnicy energii nuklearnej jest zagadnienie odpadów jądrowych, a w szczególności składowanie wypalonego paliwa jądrowego i potencjalne ryzyko dla społeczeństwa, jakie stwarza. Pytanie jak odpady nuklearne z pracujących reaktorów jądrowych wpłyną na nasze pokolenie i kolejne pokolenia jest również jednym z pierwszych pytań i wątpliwości, jakie ma każda osoba niezorientowana w temacie energetyki jądrowej. Zadziwiające, ale nawet inżynierowie – ludzie z wykształceniem technicznym z różnych branż (nie jądrowych) często zadają pytanie, co się stanie z odpadami jądrowymi i budzi to zwykle wątpliwości. W poniższym tekście pokuszę się o skrótowe przedstawienie, jaka technologia jest obecnie rozpatrywana, jako jedno z najlepszych rozwiązań tego problemu.

Z technicznego punktu widzenia można pokusić się o stwierdzenie, że problem jest wyolbrzymiony i przez lata utrwalił się w świadomości społeczeństwa tworząc wręcz stereotyp, mit nie do obalenia. Podobny problem ten dotyczy niestety, również wszelkich innych zagadnień związanych z energetyką jądrową. Tymczasem, jak dobrze wiadomo dla atomistów, potrafimy sobie całkiem nieźle radzić z odpadami stosując istniejące już dzisiaj technologie. Możemy z dużą dozą prawdopodobieństwa zagwarantować, że przez następne tysiące lat nikt od tych odpadów nie ucierpi. Budowanie składowisk geologicznych na następne dziesiątki tysięcy lat w bardzo stabilnych pokładach geologicznych niemal ponad wszelką wątpliwość zapewnia takie bezpieczeństwo i aktualny stan techniki pozwala na to. Gdyby każdy inny przemysł - niejądrowy zapewniał taki poziom bezpieczeństwa jak przemysł nuklearny zapewnia dzisiaj, to żylibyśmy naprawdę w dużo lepszym i na pewno zdrowszym środowisku. Strach nabudowany wokół energetyki jądrowej jest wręcz niewspółmiernie wielki w porównaniu do licznych innych zagrożeń przemysłowych i naturalnych, jakie mogą wystąpić. Świetnym przykładem jest tutaj trzęsienie ziemi w Japonii w 2011 roku i awaria w EJ Fukushima. Media, a częściowo w wyniku ich działań społeczeństwo utożsamiają tragedię trzęsienia ziemi, w którym zginęło nota bene ok. 20 000 osób właśnie z awarią w elektrowni jądrowej. Tymczasem w wyniku awarii elektrowni zginęły pojedyncze osoby, a skutki zagrażające życiu i zdrowiu reszty populacji są znikome. Uderzającym kontr przykładem do awarii w elektrowniach jądrowych są awarie tam wodnych, przykładowym zdarzeniem jest zniszczenie tamy w Morvi w Indiach w wyniku, której w 1979 roku zginęło 30 000 osób. Jednakże nawet po tego typu wydarzeniach nikt nie utożsamia stosowania tam wodnych z katastrofami oraz z zagrożeniem. Na pewno też nikt rozsądny nie wysuwa tez, aby kategorycznie zabronić budowy tam [12]. Podobnie, jeżeli pokusimy się o podobne porównanie zliczając ilość ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w Polsce w okresie 1975-2011, liczba jest zatrważająca i wynosi 210415 (!) [13]. Jednak nikt nie śmie twierdzić, że należałoby zakazać stosowania samochodów. Nakreśla to poziom absurdu, do którego dochodzimy – jądrowe = złe i utożsamiane, ze śmiercią i zagrożeniem. Tymczasem prawda okazuje się jak zwykle być dużo bardziej złożona.

Powracają do głównego nurtu tej pracy i zagadnienia odpadów nuklearnych należy stwierdzić, że technika nuklearna może zapewnić rozwiązanie problemu długożyciowych odpadów już nie tylko poprzez ich bezpieczne składowanie, ale przez ich fizyczną dezintegrację. O tym jak to zrobić wspomnę w następnych podrozdziałach. Wcześniej jednak trzeba jasno określić, co trzeba usunąć lub zdezintegrować w wypalonym paliwie jądrowym i co sprawia, że jest ono takie niebezpieczne.



Rysunek 1 Radiotoksyczność wypalonego paliwa w czasie odniesiona do rudy uranowej [2].

Wypalone paliwo

Wypalone paliwo jądrowe to mieszania dziesiątek różnych izotopów (w tym promieniotwórczych), które nie były obecne w świeżym paliwie i pojawiają się dopiero w wyniku wypalania paliwa i procesów jądrowych w nim zachodzących. Warto podkreślić, że typowe wypalone paliwo jądrowej dla reaktora lekko-wodnego w ponad 95% składa się z tych samych materiałów, co przed wypalaniem, czyli głównie z tlenku uranu(1), koszulek paliwowych i elementów konstrukcyjnych. Pozostały procent masy to powstałe w wyniku rozszczepień jąder ciężkich produkty rozszczepienia oraz produkty konwersji uranu, czyli transuranowce jak pluton, ameryk, kiur itp. Świeże paliwo jądrowe jest relatywnie niegroźnym materiałem, emituje niewielkie ilości promieniowania alfa i zasadniczo uranową pastylkę paliwową można trzymać w ręku. Skóra wystarcza by zatrzymać cząstki alfa emitowane w rozpadach jąder uranu. W wyniku wypalania paliwa ta sama pastylka staje się śmiercionośną trucizną generującą około milion razy większą dawkę promieniowania [1].

Większość produktów rozszczepienia charakteryzuje się bardzo wysoką aktywnością, ale za to krótkim czasem połowicznego zaniku. Przeciwnie aktynowce zwykle charakteryzują się relatywnie mniejszymi aktywnościami, ale za to bardzo długim czasem połowicznego zaniku. Efekt tego jest taki, że produkty rozszczepienia stwarzają największe zagrożenie (generują radiotoksyczność) i przeważają nad aktynowcami przez okres około 300-1000 lat od zakończenia wypalania paliwa. Następnie aktywność produktów rozszczepienia po kolejnych kilkuset latach staje się bardzo mała i przez dalsze kilkadziesiąt do kilkuset tysięcy lat za nadmierną radiotoksyczność odpowiadają aktynowce. Wśród aktynowców dominuje pluton i izotopy pochodne oraz izotopy aktynowców mniejszościowych (MA – Minor Actinides). Przykładowy rozkład radiotoksyczności w czasie dla wypalonego paliwa z podziałem na jej źródła przedstawia Rysunek 1.

Trzeba wspomnieć dla jasności, że w inżynierii jądrowej przyjęło się stosować radiotoksyczność, jako miarę ilościową potencjalnego zagrożenia, jakie dla zdrowia i życia ludzi stwarza dana ilość materiału radioaktywnego. Radiotoksyczność zwykle określa się w [Sv/g], czyli jest to efektywna dawka na jednostkę masy materiału, jaką otrzyma osoba, która przez inhalację lub spożycie(2) pochłonęła dany izotop. W analizach przyjęło się odnosić radiotoksyczność wypalonego paliwa jądrowego do radiotoksyczności rudy uranowej, która wynosi około 18 mSv/g [5],[6].

Rozpatrując zagadnienie, szybko nasuwa się wniosek, że jeżeli inżynierowie i naukowcy chcą zlikwidować problem radiotoksyczności w czasie, czyli de facto problem długożyciowych odpadów nuklearnych to konieczna jest utylizacja izotopów plutonu i aktynowców mniejszościowych. Dodatkowo redukcja większości z tych substancji doprowadziłaby do znacznego zmniejszenia generacji ciepła w wypalonym paliwie i w konsekwencji zwiększenia pojemności podziemnych składowisk na odpady nuklearne i zmniejszenia kosztów składowania [12].

Technologia transmutacji

Utylizacja i ograniczanie zasobów plutonu w cyklu paliwowym do zadań szczególnie prostych nie należy, ale jest wykonalne przy aktualnie istniejącej technice prze-

(1) Tlenek uranu jest zwykle wykorzystywany w paliwie nuklearnym. Istnieją oczywiście inne opcje i inne paliwa nuklearne jak węgliki, azotki, paliwa metaliczne zarówno z uranem, ale również plutonem czy torem.

(2) Radiotoksyczność dla inhalacji (ang. inhalation) i spożycia (ang. ingestion) jest zasadniczo inna, bo inne są też konsekwencje dostarczenia materiału radioaktywnego dla każdej za tych dróg. Przez Inhalację rozumiemy wdychanie, a przez ingestię wchłonięcie drogą pokarmową

robu i wykorzystaniu odpowiednio zaprojektowanych reaktorów jądrowych. W reaktorach prędkich powielających pluton jest bardzo skutecznie wytwarzany w dużych ilościach, a w reaktorach prędkich niepowielających (krytycznych) pluton można również sukcesywnie wypalać. Stosując reaktory prędkie bez płaszcza powielającego zmniejszana jest ilość izotopów plutonu i sumaryczna radiotoksyczność wszystkich odpadów nuklearnych maleje. Przykładowa koncepcja wykorzystania reaktora prędkiego krytycznego, który jest częściowo dedykowany pod wypalanie plutonu jest komercyjny reaktor PRISM koncernu GE-Hitachi. Istnieją poważne plany zastosowania tej technologii w Wielkiej Brytanii do utylizacji plutonu z głowic nuklearnych [3].

Zasadniczo gdyby celem było tylko pozbycie się plutonu, reaktory prędkie krytyczne niemalże wystarczałby, aby sprostać temu trudnemu zadaniu. Sytuacja przedstawia się diametralnie inaczej, gdy chcemy pójść krok dalej i pozbyć się aktynowców mniejszościowych. Niestety - jest to konieczne żeby wyeliminować zagrożenie radiotoksycznością w czasie z odpadów nuklearnych.

Głównym źródłem radiotoksyczności aktynowców mniejszościowych są izotopy ameryku (głównie Am-241), ale również kiuru, neptunu i kalifornu. Istotne jest to, że nie istnieje technologia pozwalająca skutecznie oddzielić ameryk od kiuru i kalifornu na przemysłową skalę, co dodatkowo utrudnia ich przetwarzanie. Jeżeli chcemy je wypalać przemysłowo to na dzisiejszy tylko razem. Utylizacja tych substancji w strumieniu neutronów prędkich jest możliwa podobnie jak dla Plutonu, ale dodanie dużych ich ilości do paliwa w reaktorach prędkich jest niewskazane. Dodanie nawet niewielkich ilości aktynowców mniejszościowych do paliwa w celu ich wypalania prowadzi do znacznej redukcji reaktywnościowego efektu Dopplera, ponadto podnosi efekt reaktywnościowych od przestrzeni pustych oraz redukuje efektywny udział neutronów opóźnionych. Wszystkie te efekty prowadzą do sytuacji, w której ze względów bezpieczeństwa zawartość MA w paliwie jest ograniczona do około 5-6% dla najbardziej wyrafinowanych konstrukcji reaktorów przeznaczonych do transmutacji [5],[4]. Wyższe zawartości MA w paliwie prowadziłby do niedopuszczalnych wartości współczynników bezpieczeństwa i w trakcie potencjalnych stanów przejściowych byłoby to niebezpieczne.

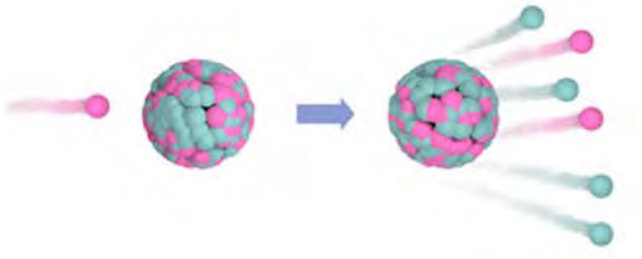
Istnieją szacunki, które mówią, że dla reaktorów prędkich krytycznych w celu ustabilizowania zawartości MA w cyklu paliwowym należałoby zbudować flotę reaktorów prędkich, które stanowiłby od 35% do 50% (pod względem mocy) całej floty reaktorów jądrowych [5]. Można postawić twierdzenie, że jest to pewne rozwiązanie problem jednakże dość ograniczone i obkupione bardzo dużym kosztem.

Istnieje alternatywne rozwiązanie, zaproponowane i nakreślone już w latach siedemdziesiątych dwudziestego wieku. Pomysł ten na wiele lat porzucono i dopiero na początku lat dziewięćdziesiątych pojawiło się znaczne zainteresowanie tematem. Rozwiązanie to reaktor podkrytyczny sterowany akceleratorem ADS (Accelerator Driven System), w niektórych publikacjach nazywany ADR (Accelerator Driven Reactor).

Podstawy fizyczne reaktorów ADS

Reaktory podkrytyczne to alternatywne zupełnie inne podejście do koncepcji reaktora jądrowego. W klasycznym reaktorze w stanie krytycznym reakcja łańcuchowa jest samopodtrzymująca. Upraszczając w rdzeniu jest wystarczająco neutronów, aby poprzez interakcje z paliwem wygenerować kolejne pokolenia neutronów w tej samej ilości i automatycznie podtrzymać stan krytyczny.

Koncepcja reaktora podkrytycznego bazuje na niejako sztucznym podtrzymywaniu stanu, który można określić, jako kwazi-krytyczny poprzez zastosowanie akceleratora protonów. Tylko dzięki tym protonom w rdzeniu podtrzymywane są reakcje jądrowe przy odpowiednio dużej intensywności. W sytuacji, gdy nie ma źródła protonów reakcja szybko wygasa podobnie, (ale nie tak samo) jak w zwykłym reaktorze, który jest w stanie podkrytycznym. Konstrukcja reaktora sama w sobie nie jest w żadnym przypadku krytyczna, byłoby to wielce niepożądane.

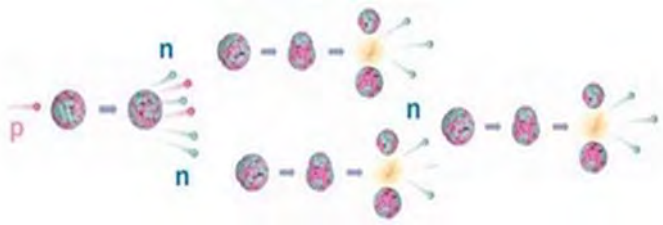


Rysunek 2 Proces spallacji ciężkich jąder [10].

W układzie ADS protony są przyśpieszane w akceleratorze liniowym (lub innym) do około 0.6-1 GeV i z

tą ogromną energią trafiają w tarczę z ciężkiego materiału, która znajduje się w środku rdzenia. W wyniku procesu spallacji (Rysunek 2), czyli rozrywania jąder tarczy przez wysokoenergetyczne protony generowane są kaskady kilkudziesięciu neutronów (ok. 20-40). Neutrony te zderzają się z jądrami ciężkimi (jak uran) w rdzeniu. W ten sposób protony generują neutrony, a te neutrony produkują dodatkowe neutrony poprzez reakcje rozszczepienia i utrzymywany jest w rdzeniu znaczny strumień neutronów, pomimo, że reaktor sam w sobie nie jest krytyczny (Rysunek 3). Źródło energii, czyli protony z akceleratora prowadzą do wytworzenia znacznie większej ilości energii dzięki rozszczepieniom i można dzięki temu można nazwać tego typu układ wzmacniaczem energii (Energy Amplifier).

Neutrony generowane w źródle neutronów są mnożone w całym reaktorze i mają prędkie widmo, które można skutecznie wykorzystać do przeprowadzania wypa-



Rysunek 3 Rozszczepienie poprzedzone kaskadą spallacji [10].

lania zarówno plutonu, aktynowców mniejszościowych jak i niektórych długożyciowych produktów rozszczepienia.

Na zakończenie tego podrozdziału przyzwoicie byłoby zadać sobie pytanie:, po co tak komplikować sprawę? Jaka jest przyczyna tego, że chcemy stosować reaktory ADS? Odpowiedź okazuje się być bardzo prosta. Reaktory tego typu pozwalają na dodanie do paliwa o rząd wielkości większych ilości aktynowców mniejszych niż ma to miejsce w reaktorach prędkich krytycznych i w konsekwencji pozwalają dużo efektywniej je wypalać. Istnieją szacunki, które mówią, że wystarczy, aby cała flota składała się od 5% do 10% (mocy), aby ostatecznie zamknąć cykl paliwowy, czyli zredukować o ponad dwa rzędy wielkości ilość długożyciowych odpadów nuklearnych [7].

Dzięki możliwości umieszczenia tak dużych ilości aktynowców mniejszościowych w paliwie reaktory te mogą służyć, jako instalacje przemysłowe stricte dedykowane pod wypalanie odpadów w sposób bezpieczny [12]. Przyczyny takiego stanu rzeczy należy się doszukiwać w tym, że reaktory te opisuje inna kinetyka(3) niż reaktory prędkie. Wszelkiego rodzaju awarie prowadzące do efektów reaktywnościwych (jak wystrzelenie pręta sterującego, wrzenie w rdzeniu itp.), które dla reaktorów prędkich prowadziłyby do nieakceptowalnych konsekwencji dla dużych zawartości aktynowców mniejszych, w reaktorach ADS są zupełnie akceptowalne i nie stanowią zagrożenia. Koncepcja reaktora ADS wydaje się relatywnie prosta jednak, wykonanie z inżynierskiego punktu widzenia jest już zadaniem trudniejszym, o czym w kolejnym podrozdziale.

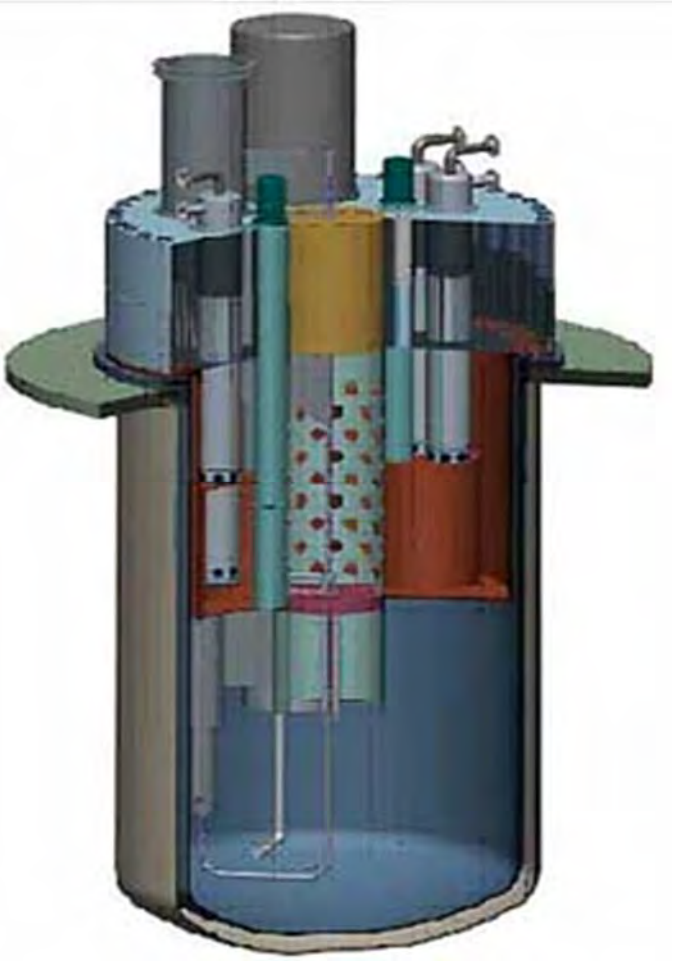
Reaktory Podkrytyczne Sterowane Akceleratorem

Istnieje szereg zagadnień, jakie trzeba rozwiązać, aby można było budować i eksploatować reaktory podkrytyczne. Autor nie śmie nawet próbować wymieniać wszystkich problemów technicznych, dalej zostaną nakreślone niektóre najbardziej istotne.

Pierwsza fundamentalna sprawa to wybór odpowiedniego paliwa jądrowego dla tego typu reaktora. Planowane paliwo dla reaktorów ADS jest inne niż typowe paliwo dla reaktorów jądrowych krytycznych. Niemal we wszystkich paliwach jądrowych dla klasycznych reaktorów zarówno prędkich jak i termicznych stosowany jest uran U_{92}^{238} jako „wypełniacz" dla rozszczepialnego U_{92}^{235}, izotopów plutonu lub (hipotetycznie) toru. Zwykle paliwo dla takich reaktorów jest w postaci tlenków, możliwe są również inne postacie ceramiki jak azotki, węgliki czy paliwa metaliczne. W przypadku reaktorów podkrytycznych zachowane są paliwa tego typu, ale pożądane jest wyeliminowanie dodatkowego uranu i zastąpienie go materiałem obojętnym (inertnym). Główny cel tego zabiegu to podwyższenie przewodności cieplnej paliwa, która wpływa na warunki termiczne pracy paliwa oraz podwyższenie parametrów bezpieczeństwa pracy rdzenia, które ten nadmiarowy uran obniża [5]. Materiał inertny powinien mieć możliwie mały przekrój czynny na pochłanianie neutronów, powinien być łatwy w wykorzystaniu przy przerobie wypalonego paliwa, musi być odporny na promieniowanie oraz być stabilny w Mo^{92} wysokich temperaturach. Jako materiały inertne dla paliw tlenkowych rozważa się m.in. tlenek magnezu MgO i metaliczny molibden, a dla paliw azotkowych azotek cyrkonu ZrN [5], [8].

(3) Kinetyka to w dużym uproszczeniu sposób zachowania się reaktora w czasie (np. zmiany mocy i populacji neutronów) pod wpływem wymuszeń w rdzeniu (np.: wysunięcie pręta, awarie).

Wybór chłodziwa w reaktorach ADS jest kolejnym zagadnieniem, jakie staje przed konstruktorami tego typu instalacji. Zwykle problem jest tego samego typu, co w reaktorach prędkich, chłodziwo musi minimalnie oddziaływać z neutronami i mieć bardzo dobre własności cieplne. Z tego powodu wybór jest podobny i rozpatruje się zwykle ciekły sód, ciekły ołów, eutektykę ołowiu z bizmutem oraz chłodziwa gazowe jak hel. Dla pierwszego konstruowanego reaktora Mhyrra(4) (Rys. 4) wybrano eutektykę ołowiu z bizmutem głównie przez to, że jej temperatura topnienia jest relatywnie niska ok. 396 K i jest mniejsze zużycie energii na grzanie układu chłodzenia w trakcie, gdy reaktor jest wyłączony [10]. Dla przyszłych projektów reaktorów ADS najprawdopodobniej stosowany będzie ciekły ołów, jako optymalny materiał. Ciekły ołów świetnie odbiera ciepło i dzięki temu, że ma dużą rozszerzalność cieplną jest skuteczny przy pasywnym chłodzeniu rdzenia przy naturalnej konwekcji.



Rysunek 4 Reaktor hybrydowy FR-ADS Myrrha [10].

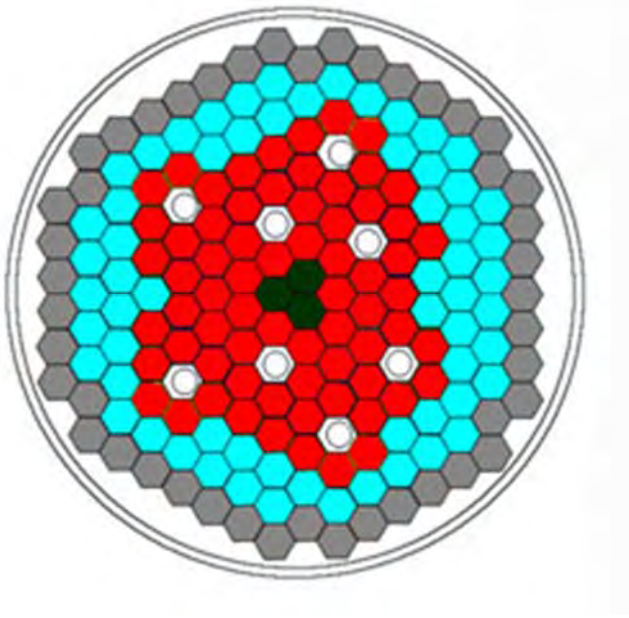
Następne ważkie zagadnienie to konstrukcja akceleratora o odpowiednich parametrach pracy. Obecnie rozważane są głównie akceleratory liniowe, ale możliwe jest stosowanie cyklotronów. Konstruktorzy reaktora Myrrha argumentują wybór akceleratora liniowego m.in. możliwością jego ulepszania, modułowością, większą niezawodnością i lepszymi parametrami wiązki [10]. Jeżeli cele będzie zbudowanie przemysłowego reaktora podkrytycznego to powinna być zapewniona relatywnie ciągła i stabilna praca akceleratora, bez przerw w jego działaniu. Współczesna technika akceleratorowa jest bardzo rozwinięta i budowane są akceleratory wytwarzające wiązki o energiach wielokrotnie większych niż wymagany dla ADS 0.6 GeV. Jednakże, budowa niezawodnych akceleratorów przemysłowych o parametrach wymaganych dla ADS jest już dużym wyzwaniem technicznym. Wymagana wiązka protonów dla akceleratora jest rzędu 10-100 mA, co przy 1 GeV daje moc wiązki rzędu 10-100 MW. Celem w rozwoju akceleratorów dla reaktorów jest znaczne obniżenie częstości występowania wybiegów (trip) akceleratora z obecnych kilku wybiegów na godzinę o czasie powyżej 3 sekund do jedynie kilku wybiegów na rok. [8].

Jednym z najważniejszych elementów składowych reaktora podkrytycznego jest tarcza, w której odbywają się procesy spallacji. Umiejscowiona jest ona zwykle w centrum rdzenia i wykonana jest z metalu ciężkiego jak wolfram lub ołów (zielone elementy Rys. 5). Panuje przekonanie, że ołów jest najlepszym rozwiązanie m.in. dlatego, że może być jednocześnie materiałem tarczowym jak i chłodziwem [10].

Tarcza jest swoistym źródłem neutronów w rdzeniu i panują w niej najbardziej ekstremalne warunki. Jest tam najwyższy strumień wysoko energetycznych neutronów i protonów oraz największe obciążenie cieplne. Istotnym problemem są wymiary tarczy, które ograniczają możliwości reaktora. Tarcza nie może być zbyt duża, ponieważ prowadzi to do zmniejszenia średniej energii neutronów z niej wychodzących i mniejszej efektywności transmutacji dla wielu aktynowców. Mniejsze tarcze dają większe wzmocnienie energii przez rozszczepianie neutronami o wyższych energiach. Przeciwnie tarcza nie może być zbyt mała, ponieważ istnieją poważne ograniczenia na odbiór generowanej w niej mocy i mała tarcza ogranicza moc reaktora [5],[10].

Obciążenia cieplne w tarczy narzucają ograniczenia na moc, jaką może generować rdzeń. Dla przykładowej tarczy reaktora ADS chłodzonego ciekły ołowiem podawana jest maksymalna moc uwalniana w tarczy, jako ok. 20MWth, co przy współczynniku wzmocnienia mocy 30 odpowiada całkowitej mocy rdzenia około 600

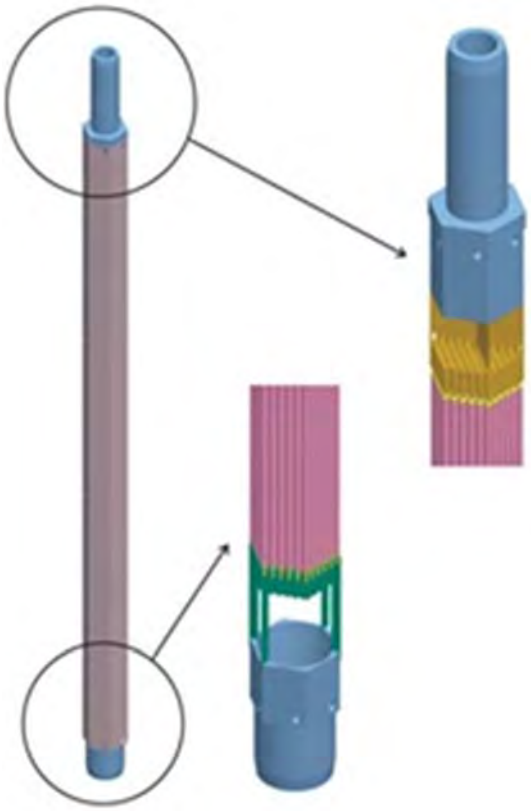
(4) Mhyrra ma być reaktorem hybrydowym, który będzie działał zarówno jak reaktor krytyczny, ale też jak reaktor podkrytyczny.



Rysunek 5 Rdzeń reaktora hybrydowego Mhyrra [10].

MWth. Dla przykładu reaktor eksperymentalny Myrrha będzie wykorzystywał wiązkę o energii 600 MeV i prądzie 4 mA, a moc wiązki będzie wynosiła ok. 3.2 MW. Całkowita moc reaktora w trybie podkrytycznym będzie w przedziale 65-100 MWth.

Kolejnym zagadnieniem, nad, którym wymagane są intensywne prace jest opracowanie w pełni skutecznych metod zapobiegania awarii. Niestety pręty sterujące w kinetyce tego reaktora są bardzo nieefektywne i najbardziej pożądane jest odcięcie akceleratora. Należy zapewnić technicznie, że każda sytuacja awaryjna doprowadzi do tego, że układy automatycznej regulacji, a najlepiej układy bierne odetną akcelerator [5],[10].



Rysunek 6 Element paliwowy reaktora hybrydowego Mhyrra [10].

Cykl paliwowy z reaktorami ADS

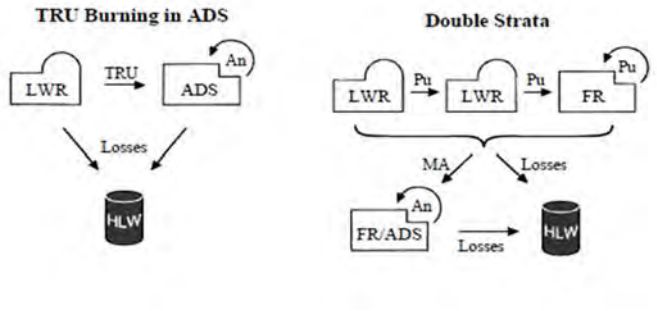
W przeciągu ostatnich kilkunastu lat powstały dziesiątki koncepcji i wariantów zamkniętego cyklu paliwowego z reaktorami ADS. Rozważane jest zastosowanie różnych metod przerobu wypalonego paliwa oraz współpracy reaktorów lekko-wodnych, prędkich i podkrytycznych.

Dwie podstawowe koncepcje przedstawione są na Rysunku 7. Pierwsza z nich (po lewej) pokazuje cykl paliwowy, w którym wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych (LWR) trafia do przerobu i z niego odzyskiwane są transuranowce czyli MA i pluton, które trafiają do paliwa, które jest wypalane w reaktorach ADS. Wypalone paliwo ADS trafia do ponownego przerobu, w którym odzyskiwane są aktynowce. Materiał stracony w procesach przerobu (w tym również niewielki procent transuranowców) oraz odpady HLW(6) jak koszulki paliwowe czy materiały konstrukcyjne i produkty rozszczepienia trafiają do składowania. Tego typu cykl maksymalizuje udział standardowych reaktorów LWR przez co można oczekiwać, że jest to opcja najtańsza. Druga koncepcja (po prawej stronie Rys. 7) przedstawia cykl wykorzystujący dodatkowo reaktory prędkie krytyczne (FR). Wypalone paliwo z reaktorów LWR trafia do przerobu, i w postaci paliwa MOX wypalane jest po raz kolejny w reaktorach LWR. Po jednokrotnym wypaleniu (wielokrotne wypalanie jest niepożądane w LWR [5]) paliwo MOX trafia ponownie do przerobu i z odzyskanego plutonu wytwarzane jest paliwo do reaktorów prędkich, które zasadniczo utylizują pluton. Wypalone paliwo z reaktorów FR ponownie trafia do przerobu i pluton z niego znowu wypalany jest w reaktorach prędkich. Na każdym etapie przerobu paliwa odseparowane aktynowce mniejszościowe trafiają do dedykowanych instalacji wypalania, – czyli ADS lub ewentualnie FR. Wszystkie straty w postaci produktów rozszczepienia i materiałów konstrukcyjnych trafiają do składowania. Niewątpliwe wariant ten jest opcją bardziej skomplikowaną i prawdopodobnie droższą.

Obszerna analiza i warianty cykli paliwowych opisane są w studium OECD: „Accelerator-Driven Systems and Fast Reactors in Advanced Fuel Cycles" [11].

(6) HLW – High Level Waste – Odpady wysoko aktywne.

W rozsądnej perspektywie czasu, jeżeli podjęta zostanie próba zamknięcia cyklu paliwowego i zastosowania w tym celu reaktorów podkrytycznych to najpewniej kluczowym czynnikiem będzie ekonomia cyklu paliwowego. Na dzień dzisiejszy perspektywa podjęcia tego typu próby jest wciąż odległa w czasie i przez najbliższe kilkadziesiąt lat mało prawdopodobna.



Rysunek 7 Przykładowe koncepcje cyklu paliwowego z reaktorami ADS [11].

Podsumowanie

Współczesna nauka i technika dostarczają rozwiązań bardzo wielu problemów, które dla poprzednich pokoleń były nie do pokonania. Wiele z tych problemów było obcych naszym pradziadom, wiele z nich jest aktualnych dla nas, a dla naszych wnuków nie będą żadnym problemem. Będzie tak tylko dzięki pracy naukowców i inżynierów, którzy mają odwagę podejmować najtrudniejsze wyzwania i rozwiązywać najtrudniejsze problemy.

Okazuje się, że najbardziej przełomowy, pod niemal każdym względem, okres w historii ludzkości - XX wiek, dostarczył potencjalnie ostatecznego rozwiązania wielu najistotniejszych problemów – energię jądrową. Remedium na problemy z dostępem do taniej energii w ogromnych ilościach dla całej ludzkości, ale także w konsekwencji tego rozwiązanie wielu problemów gospodarczych, politycznych i społecznych. Jednocześnie w XX wieku z energii jądrowej uczyniono ostateczną broń, która może unicestwić cywilizację, ale także źródło bardzo niebezpiecznych i problematycznych odpadów. W rękach atomistów drzemie ogromna odpowiedzialność, jednocześnie potrafią oni uczynić świat dużo lepszym miejscem, a zarazem mogą go zniszczyć i zatruć. W XXI wieku atomistom przychodzi się zmierzyć z duchami przeszłości – spuścizną XX wieku – nagromadzonymi odpadami nuklearnymi zarówno cywilnymi jak i militarnymi. Dlatego też można patrzeć na badania nad transmutacją odpadów nuklearnych jak na wyraz poczucia odpowiedzialności za to, co nauka i technika same stworzyły. Reaktory podkrytyczne to jedno z eleganckich rozwiązań, które, może sprawić, że energia nuklearna będzie jeszcze bardziej czysta i bezpieczna, a kolejne pokolenia będą mogły z niej korzystać bardziej efektywnie i odpowiedzialnie.

Bibliografia

[1] Nuclear Fuel in a Reactor Accident, P. C. Burns, R. C. Ewingm A. Navrotsky, Science 335, 1184 (2012); DOI: 10.1126/science.1211285
[2] Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf, obraz: Salvatores, NEA report 6090, 2006; adres: http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=30396&pNid=2721
[3] The Independent, S. Connor, 20.08.2012, http://www.independent.co.uk/news/science/untested-nuclear-reactors-may-be-used-to-burn up-plutonium-waste-8061660.html
[4] P. Darnowski, EKOATOM nr 6, „Reaktory Prędkie Chłodzone Ciekłymi Metalami"
[5] J. Wallenius, Transmutation of Nuclear Waste, KTH textbook, 2011
[6] A. E. Waltar, D. R. Todd, P. V. Tsvetkov. *Fast Spectrum Reactors.* s.l. : Springer, 2011.
[7] Wallenius, J. *Generation IV reactors (SH2604).* [http://www.neutron.kth.se/study] Stokholm : Materiały wykładowe KTH, 2012.
[8] Wallenius, J. *Transmutation of nuclear waste (SH2602).* [Materiały wykładowe KTH] Stockholm : s.n., 2012.
[9] D. Westlen, Why Faster is Better – On Minor Actinide Transmutation in Hard Neutron Spectra, Disseration, KTH, Stockholm, Sweden, 2007
[10] SCK-CEN webpage, Belgium Mol, Mhyrra Project ; http://myrrha.sckcen.be/en
[11] Accelerator-Driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, A Comparative Study, Nuclear Energy Agency OECD.
[12] H. Nifenecker, O. Meplan, S. David, Accelerator Driven Subcritical Recator, Institute of Physics, Series in Fundamental and Applied Nuclear Physics
[13] http://dlakierowcow.policja.pl/dk/statystyka/47493,dok.html

EkoAtom in English

NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL

LATEST FEATURES

Book review: Managing Nuclear Projects

Robert Margolis reviews Woodhead's latest book on managing nuclear...

Read Feature

Today on Nuclear Engineering In

News

Kurion sets up in Tokyo

18 March, 2014

Kurion, Inc, supplier of ion-exchange resins and decontamination systems,...

Opinion

Financing nuclear pr

12 March, 2014

The lack of financing ha new-build in recent yea

FREE Newsletter
Latest nuclear news & technology.
Enter Email Address GO

LOG IN or REGISTER

Enter Keyword Search

Buyers' Guide | Company A - Z | Subscribe Online

| Order Publications

iMechE Marie

Book review: Managing Nuclear Projects

Radiation protection: Q&A with Agneta Rising

A eulogy for San Onofre

DON'T MISS OUT

NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL

Always have the latest trends and breakthrough technologies at your fingertips.

Subscribe Online

ternational

133

ojects — new options?

as held back nuclear
rs,...

EkoAtom in English

iMechE Marie

Doosan Power Systems engineer Marie Carruthers has been named one of the youngest-ever fellows of the UK Institution of Mechanical Engineers. Will Dalrymple speaks to her about her work and balancing the demands of a career with being a young mother.

Engineer Marie Carruthers, 35, manages technology integration across nine sites in Scotland and Northern England for Doosan Babcock. Her role touches many different sectors including nuclear, oil & gas and pharmaceuticals.

"In my role I am the site teams' primary contact for any technology-related queries or issues or simply if there is a way for technology to solve a current problem or improve delivery or assist in customer relations," she told Will Dalrymple in February.

The varied role involves integration of Doosan Babcock's technology businesses (NDT, Metallurgy, Plant Integrity, RVI, Laser Scanning, Nuclear Technology Services), with the Doosan North Branch site services.

Ten years after starting her career with Doosan Babcock, Marie Carruthers has been named a Fellow of the Institution of Mechanical Engineers. Fellowship is the Institution's highest class of membership and requires an engineer to hold a position of senior responsibility in their chosen area of mechanical engineering as well as meet criteria that test their leadership, influencing and strategic qualities.

Marie Carruthers, who grew up in Sweden, spoke with Will Dalrymple about her role and what inspired here to become an engineer.

Will Dalrymple. Doosan works across many different sectors, from nuclear to pharmaceuticals, which have very different needs. Isn't it hard to cater to such diversity?

Marie Carruthers: I started off in nuclear. That always helps, and it is the most particular of the industries that I deal with, although oil and gas is not far behind. It is also very particular, but more likely to try new things.

I work on bringing in new technologies; we might try it in an oil and gas environment first (or vice versa depending on the technology), or in other sectors, and build up a good case as to why it works and capture any lessons learned. That is the reason why it is beneficial to span all of these industries: we can draw different experiences from different sectors. Each one does things differently; sometimes that is because it has always been done that way, but if they see that something new has been used elsewhere and we have a ready-made solution, it is reassuring.

"I started off in nuclear... and it is the most particular of the industries that I deal with"

WD: Could you give me an example of what you do?

MC: It varies a lot! One example is site support. A site might phone up after inspection found corrosion issues in a vessel. Do they know how much it has corroded? Is more inspection needed? Should it be repaired? Has anyone done a fitness-for-service test? What are the customers' wishes: do they want to use their own in-house people? I build up a picture of what has happened, and suggest a way forward.

I tie into 180 specialists, all of whom are managed by group leaders... Once a project is up and running, it becomes more a customer relations role; sometimes there is project management as well, which I like. There is so much on the go. A lot of the work is reactive, but there are long-term improvements and inspections that are done alongside.

WD: You said that your first job was in nuclear: what was that?

MC: It was a summer placement for my mechanical engineering degree in Sweden, which requires practical experience. I had 10 weeks welding on the Oskarshamn maintenance team, supporting all three units.

Why welding? I'm a mechanical engineer; it is a very commonly used construction method that is really useful to have a deeper understanding of, and that placement was what was available. It was great experience and it helps me a lot now. It was nearly 30 degrees that summer in Sweden, but fortunately at the plant there were lots of places where you could swim during the lunch breaks.

I started my mechanical engineering degree in 1998, and came over to UK in 2001. I did a master's degree here in materials technology. During my mechanical engineering degree, I worked part

time at a Swedish foundry doing metallurgy. I wanted more academic skills in this area, and fancied metallurgy. I applied to Doosan, and worked in their metallurgy and NDT department. At that time, its NDT department was doing work at Oskarshamn. I never ended up at Oskarshamn- I did some work at Forsmark, and then did my main work in the British Energy fleet.

I spent 3-4 years in Doosan's NDT department, and then moved on to destructive testing. It was really interesting! The work I do now with inspection wouldn't be possible without a background in metallurgy and NDT. I worked in destructive testing until 2009; that was a great job. There was a year's maternity leave in there.
When I came back, I was asked to take on an integration role to site teams in the North of UK. They needed someone who understands the different departments within asset integrity, who could tie together the sites, and support them, be visible to customers, and break down internal silos.

"I worked in destructive testing until 2009; that was a great job."

WD: What was your favourite job?

MC: The current one. My favourite project was on weld development, looking at corrosion under insulation, because it needs quite a few different disciplines to come together. There was a research element, and I worked with great people, and I learned so much, and we left the customer with something real, an approved weld procedure, that if they have an issue, they can go in and repair it.

WD: In nuclear, don't you find it difficult to manage so many different disciplines?

MC: Sometimes I find that engineers from different disciplines are talking a different language - messages can get lost. I need to make sure that this doesn't happen. I don't think that we at Doosan are particularly bad at it; it is an industry thing.
The first time I was ever in a Swedish foundry, I walked in just as a mechanical engineer had left the office. The metallurgist who was still there was complaining that the mechanical engineer wasn't listening. Thicker aluminium castings are generally weaker because of the grain structure. When the mechanical engineer designer assumes that he can make the casting stronger by making it twice as thick, there is a disconnect. People are trained in specific areas; one person can't know everything, so the general roles can help support in making sure the message doesn't get lost.

WD: What constitutes good engineering?

MC: It might sound silly, but the right attitude; because you can teach most things, but you need passion and drive to solve a problem and get good solutions, wanting to learn more and get good solutions. I work with a lot of people who really enjoy being engineers; in my opinion, they make the best ones. It doesn't matter what the challenge is, they will come up with a solution. It may not be perfect, but I think the most important thing is about having an interest in coming up with solutions.

WD: What really annoys you about engineers?

MC: I'm one myself so I can't point too many fingers. There are quite an array of personalities, and there can sometimes be interesting personality clashes. Another thing that some do is strive for the ultimate solution, which may not always be needed. We need to reign ourselves in and not get too carried away with what we are trying to develop. Simplicity is usually the best way.

WD: Is Britain over-engineered?

MC: I'm from Sweden, which I would say is even more over-engineered. In my opinion no. Britain has a more pragmatic approach to problems; Sweden relies on quite a theoretical approach that takes a bit longer. For example, after I came over, I took a polymer (plastics) class, and my friend Lina, who was a mechanical engineer, did the same course in Sweden, and we had the same exam question: how can you tell whether a polymer is amorphous or crystalline? Lina had to do a really long calculation that took half an hour. In Britain we were taught that if you can see through it, that is, if it is transparent, it's generally amorphous, if you can't, it's crystalline. That's the difference between Britain and Sweden. If you have to think on your feet its better to have the British training.

WD: What is your role supposed to be as a fellow of the iMechE?

MC: There is nothing official; being a fellow is the highest level of membership. What I had to do to become a fellow was to demonstrate that I had relevant experience and also show how I was engaged on a personal level in driving technology forward and promoting engineering. I work mainly bringing young people into engineering, and focus on girls.
Another thing to do is to work with careers advisors. They don't tend to suggest engineering to go into as a career. For example I was good at maths; my career advisor suggested I train to be a pharmacist. They have a big role to play, and they need to be educated to encourage girls into engineering as well.

"I work mainly bringing young people into engineering, and focus on girls."

WD: How would you respond to girls who say that they are no good at maths?

MC: I have several friends who said that about maths, but who would have had no problems training to be an engineer. Boys are given more confidence at school than girls. We need to give girls more confidence that it is not going to be as difficult as they think. Another thing to do is to work with careers advisors. They don't tend to suggest engineering to go into as a career. For example I was good at maths; my career advisor suggested I train to be a pharmacist. They have a big role to play, and they need to be educated to encourage girls into engineering as well.

WD: Your father was an inspiration?

MC: In Sweden it was not uncommon to bring kids in to work during the school holidays. When I was nine, I went to the E.ON headquarters in Sweden. My father also took me to visit gas storage vessels. And when my dad worked at Barseback, which was closed down, there was a family day organized to demonstrate against its closure, which we attended. When I was older, 18-19, he brought be to Barseback before it closed and gave me desk jobs to try...Those trips gave me interest, encouragement, and the confidence to be able to do it.

WD: You are a young mum, and are now part time. In my neighbourhood many parents, and the school, seem to expect that mums should pick up their kids from school. Have you felt these pressures? How do you deal with them?

MC: It is a challenge at times. I'm part-time-ish. I do a couple school pickups a week. I try to be there when it matters. I don't think engineering companies are as far forward in terms of dealing with working mothers as more traditionally female industries-just because of experience, that is, there are a lot fewer women. At Doosan I think that I was the first nuclear-classified worker who regularly entered the RCA to be pregnant in 15 years.

I also see that maternity leave pay is pretty bad in engineering apart from big operators-BP, EDF-you are on statutory minimum, because again women are not a big part of the workforce. This is something that is important for the future, as more and more women are coming into engineering. But I have a very flexible manager who respects that I have to strike a work-life balance. It has made such a difference, the support of management, and they know that I will be there when I can. I answer the phone on my day off; I talk inspection on the playground.

WD: It all sounds very intense.

"I don't think engineering companies are as far forward in terms of dealing with working mothers as more traditionally female industries"

MC: I've never had a boring day in my life; I would definitely recommend it. I really enjoy my job!
My son is already drawing power stations. When I pick him up, he talks about his day, and I talk about mine. When his bike breaks, I can help fix it. I am not the only one that does maintenance, but I am one option. There's a problem that needs fixing; let's have a look and see if we can do something. I am trying to get across that science is fun, and to have the right attitude.

Based on an interview with Will Dalrymple, editor of Nuclear Engineering International. Follow Will Dalrymple on Google+

NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL

First Haiyang AP1000 takes shape

The final module - the containment water tank - has been installed at the first of two AP1000 units under construction at Haiyang in China's Shandong province.

The operation to lift the 285-tonne containment cooling tank - with an outer diameter of almost 26 metres, an inner diameter of 10.6 metres and a height of just over 10 metres - took about 2 hours and 30 minutes on the morning of 9 March.

wnn world nuclear news

GRZEGORZ
JEZIERSKI
energia
jądrowa
wczoraj
i dziś

czy wiesz
jaka jest różnica między
elektrownią jądrową
a bombą atomową?
SERIA: COSiW Multimedia # 5
Materiały z
XII Festiwalu Nauki w Warszawie
energetyka jądrowa
ochrona radiologiczna
organizatorzy:
Instytut
Energii
Atomowej
IEA
Centralne
Laboratorium
Ochrony
Radiologicznej
CLOR
20 września 2008

TADEUSZ CHMIELNIAK
technologie
energetyczne
WNT
Wydawnictwa Naukowo-Techniczne