

Korzyści i zagrożenia wynikające z budowy elektrowni jądrowej w Polsce

Data wpłynięcia do Redakcji: 06/2021
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 12/2021

2021, volume 10, issue 1, pp. 20-33

Romuald Awskiuk
Politechnika Śląska, Poland



Streszczenie: W poniższym artykule autor porusza kilka zagadnień związanych z energetyką jądrową i elektrowniami jądrowymi. W pierwszej kolejności wyjaśniono zjawisko uwalniania energii jądrowej i jej wykorzystanie w reaktorach energetycznych oraz wskazano zalety energetyki jądrowej. Dodatkowo omówiono problematykę powstawania, składowania i neutralizacji odpadów promieniotwórczych. Następnie krótko scharakteryzowano największe awarie elektrowni jądrowych na świecie i ich skutki, ponieważ awarie te miały silny wpływ na decyzje o zamknięciu lub nawet zaniechaniu budowy takich elektrowni. Jednak wdrożenie nowych rozwiązań w budowie reaktorów jądrowych, opartych na wnioskach z poprzednich awarii, znacznie ogranicza możliwość wystąpienia tego typów awarii w przyszłości. Na koniec autor omawia kwestię budowy elektrowni jądrowych w Polsce, wskazując na fakt eliminacji węgla i gazu z produkcji energii elektrycznej w celu ograniczenia emisji CO₂. Konieczność budowy elektrowni jądrowej wynika również z faktu, że energia pozyskiwana z tzw. odnawialnych źródeł energii nie zaspokoi w pełni zapotrzebowania na energię, jednak przed rozpoczęciem jej budowy w Polsce należy rozwiązać kilka problemów.

Słowa kluczowe: energia wiązania, reaktor jądrowy, odpady promieniotwórcze, elektrownia jądrowa

WSTĘP

Energia jądrowa [2, 3] a właściwie energia wiązania wynika z faktu, iż masa jądra każdego pierwiastka jest mniejsza od masy jego składników. Tak więc przy syntezie jądra atomowego z nukleonów mamy do czynienia z defektem masy:

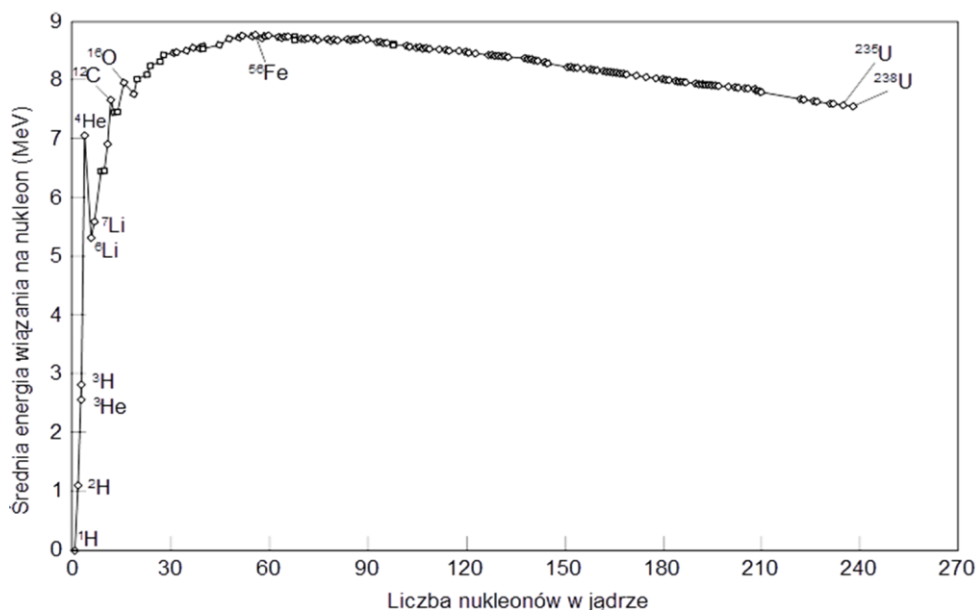
$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_j(A, Z) \quad (1)$$

W związku z czym wydzielili się energia zgodnie z regułą Einstein:

$$B = \Delta m \cdot c^2 \quad (2)$$

Wielkość B zwana jest energią wiązania. Z charakteru oddziaływania nukleon-nukleon energia wiązania przypadająca na jeden nukleon powinna być stała dla wszystkich jąder. Jednak ze względu na to, że nukleony na powierzchni jądra są słabiej związane niż te leżące w środku, energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w jądrach pierwiastków lekkich jest mniejsza, gdyż większość nukleonów znajduje się na powierzchni. W przypadku jąder cięższych pierwiastków z końca tablicy Mendelejewa musimy uwzględnić oddziaływanie elektrostatyczne pomiędzy dodatnio naładowanymi protonami, które zmniejsza energię wiązania, więc są one również słabiej związane. Pełną zależność pomiędzy energią wiązania

przypadającą na jeden nukleon a liczbą masową pierwiastka przedstawia wykres, rys. 1



Rys. 1 Zależność energii wiązania przypadająca na jeden nukleon od liczby nukleonów w jądrze

Jądra o liczbie masowej od 50 do 150 są silniej związane od jąder o liczbie masowej przekraczającej 200 o około 1 MeV na każdy nukleon.

ZASADA DZIAŁANIA REAKTORA JĄDROWEGO

Podstawą działania reaktora jądrowego jest odkryta 1938r. przez O. Hahna i F. Strassmana [4] a opisana w 1939r. przez L. Meitner i O.R. Frischa [5] reakcja rozszczepienia jąder. Schemat takiej reakcji przedstawia reakcja 1. Jądro ^{235}U pochłania neutron i powstaje niestabilne jądro ^{239}U , które dzieli się na dwa niesymetryczne jeden o liczbie masowej około 90 a drugi o liczbie masowej około 140 przy czym emitowane są dwa lub trzy neutrony, w nielicznych przypadkach może ich być o jeden więcej lub mniej.

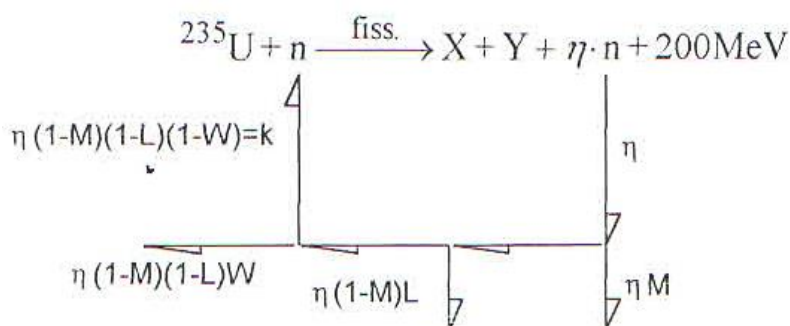


W wyniku takich reakcji z powodu, iż jądra fragmentów rozszczepienia obejmują zakres liczb masowych od 90 do 140 i są silniej związane o około 1 MeV na nukleon niż jądro ^{235}U , wyzwoli się około 200 MeV energii na jedno rozszczepienie. Ilość energii wyzwolonej w wyniku rozszczepienia jąder 1kg ^{235}U wynosi 82 TJ, co odpowiada w zależności od wartości opałowej spalaniu od 2800 do 5000 ton węgla kamiennego

W szczególnym przypadku, gdybyśmy mieli czysty ^{235}U , rozwinęłyby się reakcja łańcuchowa, to znaczy każdy powstały neutron powodowałby następne rozszczepienie i uległyby rozszczepieniu wszystkie jądra wyzwalając w ten sposób potężną energię, w takim przypadku mamy do czynienia z wybuchem jądrowym. Aby wykorzystywać energię jądrową należy znaleźć sposób na kontrolę reakcji

łańcuchowej. Urządzeniem, które przeprowadza kontrolowane reakcje rozszczepienia jąder jest reaktor jądrowy. Pierwsze takie urządzenie „Chicago Pile no 1” uruchomił w ramach programu Manhattan, na Uniwersytecie w Chicago 2 grudnia 1942 r Enrico Fermi.

Aby zrozumieć zasadę działania reaktora jądrowego [2] musimy wziąć pod uwagę następujące fakty związane z obowiązującymi w fizyce jądra atomowego prawami. Naturalny uran zawiera zaledwie 0.7% izotopu ^{235}U . Izotop ^{238}U rozszczepia w reakcji z neutronem, o ile neutron posiada energię powyżej 1 MeV, w przeciwnym przypadku zmoże zostać pochłonięty. W reakcji rozszczepienia powstają neutrony o energii 2-5 MeV. Miarą prawdopodobieństwa zajścia każdej reakcji jądrowej jest przekrój czynny. W przypadku neutronów wysokoenergetycznych jakie powstają w reakcjach rozszczepienia przekrój czynny na poszczególne reakcje zależy dla obu izotopów uranu od energii neutronu i w przypadku reakcji rozszczepienia jest niewielki natomiast w przypadku ^{238}U przy pewnych energiach neutronu przekrój czynny na jego pochłanianie gwałtownie rośnie, więc mamy do czynienia z rezonansowym pochłanianiem neutronu. Następnym bardzo ważnym faktem jest to, iż w przypadku ^{235}U przekrój czynny na rozszczepienie jest znacząco większy dla neutronów termicznych, to znaczy o energii ok. 0,035 eV. Aby zapobiec ucieczce neutronów z rdzenia i zapewnić odpowiednią ilość rozszczepień konieczne jest spowolnienie neutronów powstałych w wyniku reakcji rozszczepienia do energii termicznej, w tym celu stosuje się moderator. Dlatego moderator powinien mieć małą masę atomową i nie pochłaniać neutronów. Warunki te spełnia woda, ciężka woda oraz węgiel. Uwzględniając powyższe prawa, zasadę działania reaktora przedstawia schemat przedstawiony na rys. 2.



- M – prawdopodobieństwo wychwytu neutronu przez moderator
- L – prawdopodobieństwo ucieczki neutronu z rdzenia
- W – prawdopodobieństwo wychwytu radiacyjnego w paliwie

Rys. 2 Schemat działania reaktora jądrowego

W wyniku reakcji rozszczepienia powstaje η neutronów. Część z nich z prawdopodobieństwem M zostanie pochłonięta przez moderator, część z prawdopodobieństwem L ucieknie z rdzenia, wreszcie część z prawdopodobieństwem W zostanie wychwycona w paliwie. Pozostała ilość neutronów w następnej generacji dokona rozszczepienia. Stałą moc reaktora osiągniemy wtedy gdy ilość neutronów powodujących rozszczepienie pierwszej i

drugiej generacji będzie taka sama. Możemy więc zdefiniować współczynnik rozmnożenia k jako stosunek liczby neutronów w dwu następujących po sobie generacjach:

$$k = \eta \cdot (1-S) \quad (4)$$

gdzie:

S – prawdopodobieństwo sumy strat.

Czynnik rozmnożenia decyduje, czy moc reaktora rośnie czy maleje w czasie, gdyż zależność mocy reaktora od czasu określa reguła:

$$P(t) = P_0 \exp \left[(k - 1) \frac{t}{\tau} \right] \quad (5)$$

gdzie:

P_0 – moc początkowa

τ – odstęp czasu pomiędzy generacjami.

Jak wynika z powyższej zależności, reaktor może być w stanie podkrytycznym $k < 1$, moc jego maleje, w stanie krytycznym $k = 1$ utrzymuje stałą moc oraz nadkrytycznym moc reaktora rośnie. Problemem jest sterowanie pracą reaktora. Współczynnik rozmnożenia neutronów określa konstrukcja reaktora. Czas potrzebny na rozszczepienie jest rzędu 10^{-14} s, w takim czasie emitowane są neutrony nazwane neutronami natychmiastowymi. Średni czas życia neutronów w rdzeniu reaktora, który jest odstępem między generacjami i wynosi 10^{-3} s, gdyby współczynnik k miał wartość 1.005 to w ciągu 1s moc reaktora wzrosłaby e^5 czyli około 150 razy, sterowanie mocą reaktora byłoby niemożliwe. Na szczęście w przypadku rozszczepienia ^{235}U oprócz neutronów natychmiastowych w 0,67% przypadków emitowane są neutrony opóźnione przy czym średni czas opóźnienia wynosi około 12s co wystarcza aby skutecznie sterować pracą reaktora.

RODZAJE REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH

Reaktory energetyczne [1] możemy podzielić ze względu na sposób spowalniania neutronów i wyróżniamy tu:

1. Reaktory grafitowe moderatorem jest węgiel.
2. Reaktory lekkowodne moderatorem jest zwykła woda
3. Reaktory ciężkowodne moderatorem jest ciężka woda D_2O .

Następnym podziałem jest podział ze względu na konstrukcję i wyróżniamy tu:

1. Reaktory zbiornikowe. W zbiorniku umieszczone są elementy paliwowe razem z moderatorem.
2. Reaktory kanałowe. W moderatorze umieszczone są kanały paliwowe przez które przepływa czynnik chłodzący

Najliczniejszą grupę pracujących w elektrowniach jądrowych stanowią reaktory lekkowodne, w których moderatorem i czynnikiem odbierającym ciepło, jest zwykła woda. Przy czym rozróżniamy dwa typy tych reaktorów.

Po pierwsze reaktor PWR (Pressurized light-Water-moderated and cooled Reactor) posiadający dwa obiegi – pierwotny woda pod ciśnieniem odbiera ciepło z rdzenia reaktora a następnie oddaje ciepło w wymienniku którym, jest

wytwornica pary. Drugi obieg stanowi wytwornica pary, turbina i skraplacz. Rosyjską wersją tego typu jest reaktor WWER. Największą zaletą tych reaktorów jest to, że woda mająca kontakt podczas pracy z paliwem co może być powodem jej zanieczyszczenia izotopami promieniotwórczymi, zawarta jest tylko w pierwszego obiegu co znacznie ogranicza możliwość skażenia środowiska. Dalszymi zaletami są zastosowanie zwykłej wody jako chłodziwa moderatora oraz reflektora neutronów, dojrzałość techniczna oraz prostota i niewielkie wymiary rdzenia. Niestety rozwiązanie to posiada także wady. Największa z nich to wysokie parametry pracy układu chłodzenia ciśnienie 15 MPa oraz temperatura 340°C, silne działanie korozyjne wody, konieczność stosowania paliwa wzbogaconego w izotop ^{235}U do 3-4%, duża gęstość mocy w rdzeniu oraz krótki okres pracy pomiędzy przeładunkiem paliwa (około 12 miesięcy).

Po drugie reaktor typu BWR (Boiling light-Water-moderated and cooled Reactor). Działa on jak kotłowiec, posiada tylko jeden obieg i wytworzona para bezpośrednio zasila turbinę. Do największych zalet tego rozwiązania należą o wiele niższe parametry czynnika chłodzącego. Ciśnienie ograniczone jest do 7 MPa, co powoduje mniejsze wymagania co do zbiornika reaktora w konsekwencji znaczne obniżenie jego kosztów, oprócz tego w porównaniu do reaktorów PWR gęstość mocy jest dwukrotnie niższa, niższa jest także ilość wody w zbiorniku.

Drugą grupę reaktorów energetycznych stanowią reaktory kanałowe. Znaczenie mają dwa typy reaktorów a mianowicie:

Ciężkowodny reaktor kanałowy CANDU (CANadian Deuterium-Uranium Reactor) konstrukcji kanadyjskiej. Jest to również reaktor dwuobiegowy z ciśnieniowym obiegiem pierwszym. Jednak w obiegu pierwotnym zamiast zwykłej wody jako moderatora, czynnika chłodzącego i reflektora neutronów zastosowano ciężką wodę D_2O . Zastosowanie ciężkiej wody jest zarówno największą zaletą jak i wadą tego reaktora. Wadą ze względu na bardzo duże koszty ciężkiej wody, zaletą gdyż jako jedyny energetyczny reaktor pracuje na naturalnym uranie i zbędny jest proces wzbogacania w izotop ^{235}U . Oprócz tego zaletami są niskie ciśnienie i temperatura w zbiorniku reaktora, prostota konstrukcji prętów paliwowych, możliwość ciągłej wymiany prętów paliwowych podczas normalnej pracy oraz lepsze wykorzystanie paliwa. Wadami są:

- konieczność stosowania wysokiego ciśnienia w kanałach paliwowych,
- duże wymiary rdzenia,
- konieczność stosowania kolektorów.

Ostatnim typem reaktora jaki chcę przedstawić, to RBMK (Reaktor Bolszoi Moszcznosti Kipiaszczyj) reaktor kanałowy chłodzony wrzącą wodą z moderatorem grafitowym. Kontrowersję wzbudza z dwóch powodów. Pierwszym z nich jest, iż zainstalowany jest w elektrowniach jądrowych i oficjalnie przeznaczony jest do produkcji energii elektrycznej. Jednak wiele szczegółów konstrukcyjnych, uwzględniając fakty wynikające z praw fizyki jądra atomowego świadczy, iż głównym produktem reaktora RBMK był pluton niezbędny w produkcji broni jądrowej. Fakt ten miał decydujące znaczenie w ocenie przyczyn

największej awarii w zakładach nuklearnych o czym będzie mowa w dalszej części artykułu.

ZALETY POZYSKIWANIA ENERGII JĄDROWEJ

Największą zaletą elektrowni jądrowej jest niskie zużycie paliwa w wyniku rozszczepienia jąder 1 kg ^{235}U otrzymujemy 82 TJ energii, jak wcześniej przytoczono, aby otrzymać taką samą ilość energii trzeba spalić około 3500 ton węgla. Dla porównania elektrownia węglowa o mocy 1GW spala rocznie około $4 \cdot 10^6$ ton węgla, w przypadku elektrowni jądrowych z zainstalowanym reaktorem PWR o mocy 1,1 GW masa paliwa wymienianego co 12 miesięcy wynosi 98 t, przy czym średnie wypalenie paliwa wynosi $32 \cdot 10^3$ MWd/t, a z reaktorem BWR o mocy 1,22 GW masa paliwa wymienianego co 12 miesięcy wynosi 155 t przy średnim wypaleniu paliwa $28,4 \cdot 10^3$ MWd/t. Ilość wypalonego paliwa ma bezpośrednie przełożenie na ilość odpadów. Możemy oszacować, iż w elektrowni jądrowej rocznie w formie odpadu powstanie kilkanaście ton wypalonego paliwa.

Następną zaletą elektrowni jądrowej jest podczas bezawaryjnej pracy to, iż nie emituje do środowiska żadnych zanieczyszczeń. Z uwagi na szczególnie charakter możliwych promieniotwórczych skażeń normy dotyczące bezpieczeństwa pracy i zabezpieczenia przed awariami są bardzo ostre i rygorystycznie kontrolowane. Również rozwiązania konstrukcyjne stale podnoszą bezpieczeństwo pracy zarówno czynne jak i bierne reaktorów jądrowych.

Niewątpliwie do zalet pracy elektrowni jądrowych jest to, iż w okresie między przeładunkiem paliwa, który wynosi 12 miesięcy, pracują ze znamionową mocą i działanie ich nie jest uzależnione od warunków atmosferycznych oraz dostaw paliwa.

Obecnie istnieją techniczne możliwości budowy reaktorów jądrowych w bardzo szerokim zakresie mocy od kilkudziesięciu MW do ponad 1,5 GW. Dodatkowo mniejsze moduły można łączyć w razie potrzeby w jedną większą elektrownię.

WADY ORAZ SPOSOBY OGRANICZANIA ICH WPŁYWU NA BEZPIECZEŃSTWO I EFEKTYWNOŚĆ DZIAŁANIA REAKTORÓW JĄDROWYCH

Pierwszą grupę stanowią problemy konstrukcyjne [1]. Należą do nich:

1. Wysoka średnia gęstość mocy w rdzeniu reaktora, która powoduje zmniejszenie marginesów występowania warunków bliskich uszkodzenia rdzenia i powstawania znacznej mocy powyłączeniowej.
2. Małe wymiary zbiornika reaktora powodujące znaczne neutronowe napromieniowanie ścianek zbiornika i degradację jego właściwości mechanicznych (występowanie kruchości popromiennej)
3. Znaczny nadmiar paliwa do zapewnienia pracy oraz krótki okres czasu pomiędzy załadunkami paliwa około 12 miesięcy.
4. Brak układów neutralizacji wodoru, który może wydzielić się przy reakcji w wysokiej temperaturze wody z cyrkonem lub UO_2 .

Obecnie prowadzone są prace, aby wydłużyć okres czasu pomiędzy załadunkami paliwa w reaktorach lekkowodnych do 1,5 a nawet 2 lat. Planuje się także podnieść średnie wypalenie paliwa do wartości $(40-50) \cdot 10^3$ MWd/t.

Największym problemem energetyki jądrowej są promieniotwórcze odpady. Wyróżniamy trzy grupy odpadów. Pierwsze dwie stanowią izotopy promieniotwórcze zawarte w wypalonym paliwie. Wypalone paliwo [6] w około 5% zawiera produkty rozszczepienia, natomiast około 1% wypalonego paliwa stanowią transuranowce. Jądra powstałe w wyniku reakcji rozszczepienia posiadają nadmiar neutronów, dlatego ulegają rozpadom β . Większość z nich posiada czas połowicznego zaniku poniżej kilku dni i rozpad ich stanowi moc powyłaczeniową reaktora, z tego powodu po wyłączeniu reaktora musi on przez okres jednego miesiąca ostygnąć, zanim przystąpi się do przeładowania paliwa potem w dalszym ciągu przez następne miesiące wypalone paliwo musi być przechowywane i chłodzone, zanim będzie można je przetransportować do przerobu lub składowania. Po ostygnięciu wypalone paliwo zawiera w dalszym ciągu produkty rozszczepienia o długim czasie połowicznego zaniku. Tabela 1 zawiera ich zestawienie. Kolumna 1 zawiera informację o udziale procentowym w całkowitej ilości produktów rozszczepienia, w drugiej kolumnie zamieszczono rodzaj izotopu, w trzeciej czasie jego połowicznego zaniku w latach, czwarta to jego maksymalna energia rozpadu β , w piątej masę w kg danego izotopu powstałą po rocznej pracy reaktora PWR lub BWR o mocy 1GW.

Tabela 1 Izotopy promieniotwórcze zawarte w wypalonym paliwie o czasie połowicznego zaniku powyżej 10 lat

P [%]	Izotop	$T_{1/2}$ [lat]
0,04	^{238}Pu	87,7
0,7	^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^3$
0,3	^{240}Pu	$6,56 \cdot 10^3$
0,2	^{241}Pu	14,4
0,1	^{242}Pu	$373,3 \cdot 10^3$
0,07	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$
0,03	^{241}Am	432,7
0,01	^{244}Cm	18

Źródło: [6]

Drugą grupą izotopów promieniotwórczych w wypalonym paliwie stanowią transuranowce powstałe w wyniku pochłaniania przez paliwo neutronów. Główną grupą wynoszącą około 1% wypalonego paliwa są izotopy plutonu a mianowicie ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu i ^{242}Pu oraz pomniejsze aktynowce (MA) zawartość ich w przypadku, gdy paliwem jest UO_2 jest około 0,1%.

Zaliczamy do nich neptun ^{237}Np , ameryk ^{241}Am i Kiur ^{244}Cm . Transuranowce rozpadają się głównie przez rozpad α . Tabela 2 zawiera następujące dane w kolumnie 1 procentowy udział w wypalonym paliwie, w kolumnie 2 izotop transuranowca i w kolumnie 3 czas połowicznego zaniku. Udział w wypalonym paliwie ^{239}Pu jest największy uwzględniając fakt, iż jest on głównym składnikiem zarówno bomby atomowej jak i wodorowej a także może być dodawany do paliwa

następnych reaktorów tworząc paliwo MOX, należy się zastanowić czy jest on tylko odpadem czy stanowi dodatkowy użyteczny produkt.

Tabela 2 Zawartość transuranowców w wypalonym paliwie

P [%]	Izotop	$T_{1/2}$ [lat]	E_{β} [keV]	Masa [kg]
0,3	⁹⁵ Kr	11,72	687	0,4
5,7	⁹⁰ Sr	28,5	546	13,4
6,15	¹³⁷ Cs	30	1175	31,8
0,2	¹⁵¹ Sm	90,6	421	0,4
0,01	¹²⁶ Sn	10 ⁵	250	1
0,6	⁹⁹ Te	2,13·10 ⁵	295	24,7
6,5	⁹³ Zr	1,53·10 ⁶	60	23,2

Źródło: [6]

Dlatego przedstawimy jego własności, po pierwsze rozpada się on przez rozpad α do ²³⁵U z czasem połowicznego zaniku 24000 lat, jest on niezwykle toksyczny zarówno chemicznie jak i radiologicznie, zawartość 27 μ g w płucach powoduje ich nowotwór. W przypadku postępowania z plutonem możemy mieć do czynienia z naruszeniem stanu krytyczności, w kuli plutonu o masie 11 kg rozwinie się reakcja łańcuchowa ze wszystkimi jej konsekwencjami. Dlatego nie może on znajdować się w niebezpiecznych ilościach.

Ze względu na duże czasy połowicznego zaniku radioaktywnych odpadów pomimo ich niewielkiej objętości sprawiają one znaczne problemy związane z ich utylizacją. Najprostszą metodą a co za tym idzie najbardziej kontrowersyjną jest składowanie geologiczne. Miejsce [7] na składowisko pod względem geologicznym powinno się charakteryzować:

1. Odpowiednimi rozmiarami.
2. Jednorodną i prostą budową.
3. Szczelnością zapewniającą niezawodnienie.
4. Wytrzymałością na odkształcenia.
5. Stabilnością w historii geologicznej.
6. Brakiem aktywności sejsmicznej.

Jako perspektywiczne wskazano dwa miejsca [7]:

1. Skały ilaste monokliny przedsudeckiej okolicy Jarocina kompleks górnotriasowy, gdzie na podstawie badań geofizycznych wskazano optymalną lokalizację.
2. Wysady solne Damasławek rozpoznane szczegółowo oraz Kłodawa i Łanięta wyznaczone na podstawie analizy materiałów archiwalnych.

Jednak znacznie lepszą metodą byłoby składowanie geologiczne czasowe, to znaczy przez czas potrzebny na opracowanie bezpiecznych i pewnych metod przerobu wypalonego paliwa przez ekstrakcję z niego wszystkich pierwiastków promieniotwórczych i poddanie tych o czasie połowicznego zaniku rzędu tysięcy lat transmutacji a tym o czasie połowicznego zaniku rzędu 30 lat zapewnienie bezpiecznego składowania przez 300 lat co zapewni ich całkowity rozpad do izotopów stabilnych.

Dochodzimy do drugiej metody postępowania z wypalonym paliwem czyli przerobem jak wyżej zaznaczyłem polega on na ekstrakcji transuranowców i produktów rozszczepienia z wypalonego paliwa pozostawiając jako produkt końcowy zubożony uran może on być użyty ponownie w różnych celach. Po ekstrakcji transuranowców uzyskany ^{239}Pu może być dodawany do paliwa uranowego tworząc paliwo MOX. Może również wymieszany z zubożonym uranem stanowić doskonałe paliwo dla reaktorów na neutrony prężkie. Analizując dane odnośnie przekrojów czynnych na rozszczepienie ^{238}U transmutację transuranowców oraz konwersję paliwa np. ^{232}Th w ^{233}U widzimy, iż procesy te zachodzą najefektywniej przy energii neutronów 1-10 MeV. Mając to na uwadze C Rubbia [1] w CERN opracował koncepcję wzmacniacza energii EA. Urządzenie to stanowi reaktor podkrytyczny, gdzie niedomiar neutronów jest uzyskiwany w wyniku oddziaływania wiązki protonów o prądzie 12,5 mA przyspieszanej w akceleratorze do energii 1 GeV. Protony o tej energii uderzają w tarczę Tungstenu, w wyniku spalacji powstaje kaskada wysokoenergetycznych neutronów, które dokonują rozszczepienia ciężkich jąder i transmutacji aktynowców.

Największym problemem związanym z zakładami przerobu wypalonego paliwa jądrowego jest to, iż w latach 1945-1965 prowadziły działalność związaną z ekstrakcją plutonu dla celów wojskowych, nie licząc się z skażeniem środowiska. Najjaskrawszym przykładem takiej działalności były pozbawiona wszelkiej kontroli cywilnej zakłady produkcji i ekstrakcji plutonu Hanford w stanie Waszyngton najbardziej skażonym promieniotwórczo miejscem na Ziemi. Na dekontaminację tego terenu Rząd USA ma przeznaczyć około 100 miliardów dolarów. Sytuacja została opisana w amerykańskim czasopiśmie Scientific American a polskie tłumaczenie artykułu zamieścił Świat Nauki[8] w lipcu 1996r. Dlatego w USA zaprzestano przerobu wypalonego paliwa i na mocy ustawy jest ono składowane w formacjach geologicznych

Należy dodać, iż podobną sytuację mamy choć na mniejszą skalę w zakładach w Sellafield w Wielkiej Brytanii, gdzie 10.10.1957r. w wyniku samozapłonu grafitu rdzenia reaktora doszło dużego skażenia promieniotwórczego środowiska.

Obecnie na Świecie przerobu wypalonego paliwa jądrowego i produkcji paliwa MOX dokonuje się w zakładach:

1. Sellafield w Wielkiej Brytanii (Thermal Oxide Reprocessing Plant).
2. La Hague we Francji.
3. Ozersk w Rosji (zakłady Majak pod Czelabińskiem).
4. Rokkasho w Japonii.
5. Kompleks przemysłowy w Indiach zajmujący się przerobem paliwa z indyjskich reaktorów.

Trzecią grupą skażenia promieniotwórczego jest produkcja radioaktywnych izotopów w wyniku aktywacji neutronami materiałów konstrukcyjnych, w szczególności ^{59}Cr , ^{58}Fe , ^{56}Mn oraz ^{59}Co , wchodzącymi w skład stali nierdzewnej.

NAJWIĘKSZE AWARIE ELEKTROWNI JĄDROWYCH

Najwięcej argumentów przeciwnikom wykorzystania energii jądrowej dały skutki awarii reaktorów jądrowych. Działanie dużych grup przeciwników elektrowni jądrowych i ich znaczny wpływ na polityków spowodowały, iż w wielu krajach wycofano się z budowy nowych elektrowni a działające zaczęto zamykać. Przykładem jest także Polska, gdzie nie dokończono budowy elektrowni w Żarnowcu. Aby zracjonalizować pogląd na awaryjność elektrowni jądrowych przedstawię przyczyny i skutki trzech największych awarii elektrowni jądrowych polegających na stopieniu się rdzenia reaktora.

Pierwsza miała miejsce 29 marca 1979r. w elektrowni Three Mile Island pod Harrisburgiem. Awarii uległ reaktor TMI2 typu PWR, a jej przyczyną była uszkodzona pompa tłocząca kondensat obiegu wtórnego chłodzenia reaktora. W momencie awarii obsługa wyłączyła automatykę i przeszła na sterowanie ręczne. Na skutek wielu błędnych interpretacji wskazań aparatury pomiarowej i podjętych decyzji, doszło do zaniku chłodzenia rdzenia, w wyniku którego nastąpiło stopienie się znacznej części rdzenia reaktora. W trakcie incydentu po otwarciu zaworu bezpieczeństwa do atmosfery wraz z parą wodną przedostały się gazowe radioaktywne produkty reakcji rozszczepienia. Co więcej do pomieszczeń reaktora wydostała się przez zawór rezerwowo radioaktywna woda z obiegu pierwotnego. Doszło również do wybuchu wodoru powstałego w wyniku reakcji wody ze stopionymi prętami paliwowymi. Jednak należy podkreślić, że zbiornik reaktora nie uległ rozszczelnieniu i stopione części paliwa pozostały w jego wnętrzu.

Największy wpływ na skażenie środowiska naturalnego miała awaria w 4 bloku Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej mająca miejsce 26 kwietnia 1986r. Analizując przyczyny jej wystąpienia musimy wziąć pod uwagę fakt, iż pomimo produkcji energii elektrycznej to konstrukcja reaktorów RBMK wskazuje na to, że głównym produktem tego zakładu był pluton służący do wytwarzania broni jądrowej. Przyczyny wystąpienia awarii możemy podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich to czynniki konstrukcyjne samego reaktora, do których zaliczamy założenie konstruktorów, aby możliwie jak największa ilość neutronów była wychwytywana przez paliwo. Druga grupa to irracjonalne działania obsługi polegające na zbyt szybkim zwiększaniu mocy reaktora poprzez całkowite wyciągnięcie prętów kontrolnych. Powodem takich decyzji był fakt, iż inżynierowie nie zdawali sobie sprawy z stopnia zatrucia ksenonowego rdzenia reaktora. Działania te i cechy konstrukcyjne reaktora spowodowały wzrost mocy w ciągu kilku sekund z około 0,5 GW do 30 GW co spowodowało, że została dziesięciokrotnie przekroczona moc nominalna. Skutkiem wydzielonej energii nastąpiło rozerwanie i stopienie się kanałów paliwowych. Następstwem kontaktu stopionego paliwa i koszulek cyrkonowych z wodą była jej hydroliza czyli rozkład wody na tlen i wodór a tym samym budynek reaktora wypełniła mieszanina piorunująca. Nastąpił wybuch, który zniszczył budynek i spowodował zapłon grafitu będącego moderatorem. Pożar rdzenia reaktora trwał dziewięć dni, uwalniając do atmosfery wysoko radioaktywne produkty rozszczepienia oraz powstałe w paliwie transuranowce.

Radioaktywna chmura, która utworzyła się w wyniku pożaru przemieszczając się na skutek ruchów powietrza skażyła znaczne obszary Europy. Skutki skażenia są do dzisiaj widoczne w pomiarach aktywności ^{137}Cs , szczególnie jeżeli przejściu chmury towarzyszyły opady deszczu. Awaria w Czarnobylu spowodowała zamykanie działających elektrowni jądrowych a także wycofanie się z budowy nowych elektrowni. W Polsce przerwano i nigdy nie dokończono budowy elektrowni w Żarnowcu.

Druga po Czarnobylu oznaczona najwyższym 7 stopniem w skali INES awaria miała miejsce w Elektrowni Jądrowej Fukushima nr 1. W dniu 11.03.2011r. o godz. 16:46:23 czasu miejscowego na głębokości około 30 km w odległości 130 km na wschód od półwyspu Oshka miało miejsce trzęsienie Ziemi o magnitudzie 9 (w historii pomiarów w skali Richtera zanotowano jedynie cztery tak silne trzęsienia). Elektrownia była wyposażona w sześć reaktorów typu BWR. Samo trzęsienie nie spowodowało przecieków radioaktywnych na terenie elektrowni, a w momencie wystąpienia trzęsienia automatycznie zostały wyłączone działające bloki nr 1, 2 i 3 (bloki nr 4, 5 i 6 były wyłączone). Tragiczne w skutkach okazało się jednak nadejście fali tsunami. elektrownia położona bezpośrednio nad brzegiem oceanu miała zabezpieczenie przed falą tsunami o wysokości 6 m, natomiast przy tak silnym trzęsieniu Ziemi wysokość fali wyniosła 14 m. W wyniku jej nadejścia zostały zalane nisko położone części budynków reaktorów 1, 2, 3 i 4. Na skutek trzęsienia i zalania przez falę tsunami zakład został pozbawiany dopływu energii. W rdzeniu reaktorów nr 1, 2 i 3 oraz w basenie z wypalonym paliwem reaktora nr 4 ciągle wydzielala się energia powyłączeniowa. System chłodzenia przestał działać, nastąpiło stopienie się rdzeni reaktorów nr 1, 2 i 3 oraz paliwa w zbiorniku reaktora nr 4. W wyniku kontaktu stopionego paliwa z wodą nastąpiła jej hydroliza uwalniając do pomieszczeń budynków wodór, co pociągnęło za sobą serię wybuchów poważnie uszkadzając budynki bloków 1, 2 i 4. Zakwalifikowanie awarii jako incydent 7 stopnia świadczy, iż duża ilość jednak znacznie mniejsza niż w przypadku awarii w Czarnobylu pierwiastków radioaktywnych przedostała się poza obudowę bezpieczeństwa w blokach 1, 2 i 3 (pomimo nie stwierdzenia poważniejszych ich uszkodzeń). Największym jednak problemem okazało się oczyszczenie skażonej w trakcie awarii wody mającej kontakt z rdzeniami reaktorów.

PERSPEKTYWY ZBUDOWANIA ENERGETYKI JĄDROWEJ W POLSCE

Dotychczas przedstawiłem podstawy działania elektrowni jądrowej. Zwracając uwagę zarówno na zalety wykorzystania energii jądrowej jak i na wady a w konsekwencji na zagrożenia i negatywne skutki. Nie będę się rozwodził, czy decyzja o wycofaniu się z budowy elektrowni jądrowej była słuszna. Obecnie sytuacja w produkcji energii elektrycznej uległa zmianie. Po pierwsze panuje powszechne przekonanie, że za zmiany klimatu a konkretnie jego ocieplenie odpowiedzialny jest wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze, za co odpowiedzialne jest spalanie paliw kopalnych. Skutkiem tego jest pogląd, iż należy wycofać z

produkcji energii elektrycznej jako paliwa wszelkie rodzaje węgla. Po drugie zastąpienie węgla gazem ziemnym też nie eliminuje emisji do atmosfery CO₂, gdyż jest on paliwem kopalnym. Po trzecie oparcie produkcji energii elektrycznej tylko o tzw. źródła odnawialne też nie jest możliwe. Bo co zrobić w dłuższych okresach bezwietrznej pogody lub w zimie, gdy na półkuli północnej kąt padania promieni słonecznych jest mniejszy, a zapotrzebowanie na energię jest większe. Okazało się też, że największe promieniotwórcze skażenie środowiska naturalnego było związane z produkcją broni jądrowej a nie z produkcją prądu. Najdobitniejszymi tego przykładami są katastrofa w elektrowni w Czarnobylu, skutki pracy kompleksu zakładów jądrowych w Hanford oraz w Sellafield. Skutki pozostałych dwóch awarii nie spowodowały skażeń na wielką skalę. W przypadku elektrowni Three Mile Island pod Harrisburgiem w ogóle nie były zauważalne, a w przypadku elektrowni w Fukushima pomimo dużych zniszczeń budynków ograniczyły się do terenów samej elektrowni.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty, uważam w przypadku Polski uzasadnione a nawet konieczne jest uwzględnienie w produkcji energii elektrycznej elektrowni jądrowych.

Pierwszy krok w tym kierunku został już zrobiony. KGHM podpisał umowę z NuScale Power na dostawę reaktorów jądrowych w technologii SMR (small module reactor). Są to małe o mocy 77 MW modułowe reaktory typu PWR. Wydaje się, że w przypadku tej firmy jest to bardzo dobre rozwiązanie. Produkcja miedzi wymaga bardzo dużej ilości energii elektrycznej dostarczanej w sposób ciągły. Uruchomienie kilku modułów pozwoli na racjonalne zaplanowanie przeładunków paliwa, co zapewni ciągłość produkcji energii elektrycznej. Wadą tego rozwiązania jest nowatorska technologia nigdzie do tej pory niestosowana co może się wiązać z nieprzewidywalnymi problemami podczas realizacji umowy, co w konsekwencji może doprowadzić do opóźnień.

Uruchomienie małej elektrowni jądrowej stanowi początek realizacji programu polskiej energetyki jądrowej. Program ten został zaktualizowany Uchwałą Nr 141 Rady Ministrów R.P. i zakłada jako optymalną moc w zainstalowanych elektrowni jądrowych wynoszącą 7,7 GWe w 2045r. z perspektywą jej wzrostu w 2050r. do 10 GWe.

Realizacja tego programu wymaga budowy elektrowni z zainstalowanymi blokami dużej mocy rzędu 1-1,5 GWe. Mając na uwadze krótki jak na tak poważną inwestycję horyzont czasowy realizacji programu należy się oprzeć o aktualne rozwiązania techniczne. Obecnie najbardziej rozwiniętym technicznie rozwiązaniem jest blok energetyczny z reaktorem PWR. Największe doświadczenie w budowie reaktorów PWR mają dwie firmy. Pierwsza z nich to Westinghouse z USA a druga to koncerny Areva i Electricite de France z Francji i Siemens AG z Niemiec. Aktualnie najnowszą propozycją firmy Westinghouse [9] jest blok z reaktorem AP1000, który powstał w oparciu o doświadczenia w budowie wcześniejszych bloków z reaktorami PWR tej firmy. Nominalna moc tego bloku wynosi 1117 MWe a moc termiczna 3400 MW, przy czym paliwem jest wzbogacony

uran. W pracach nad konstrukcją tego reaktora największą uwagę poświęcono zapewnieniu bezawaryjnej i bezpiecznej jego pracy.

Ocenia się, iż ryzyko awarii związane z wyłączeniem zasilania w energię elektryczną, wydarzeniami spowodowanymi czynnikami wewnętrznymi, pożarami i powodziami wnosi $5 \cdot 10^{-7} r^{-1}$. Obecnie w Chinach pracują cztery takie bloki a następne cztery są w budowie w USA.

Propozycja francusko-niemiecka to blok z reaktorem EPR1600, który jest następcą reaktorów N4 Framatome oraz KONVOI. Moc elektryczna tego bloku wynosi 1650 MWe a moc cieplna 4500 MW, Paliwem tego reaktora może być zarówno wzbogacony uran o zawartości 5% izotopu 235 jak i paliwo MOX o zawartości do 50% plutonu. Prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia oceniono na $6,1 \cdot 10^{-7} r^{-1}$. Obecnie dwa bloki z reaktorami tego typu pracują w Chinach i jeden w Finlandii, w budowie znajdują się po dwa reaktory we Francji i w Chinach oraz jeden w Finlandii.

Przy podpisywaniu umowy na zbudowanie elektrowni oprócz parametrów technicznych i kosztów inwestycyjnych bardzo istotne są dodatkowe warunki umowy. Jednym z nich mógłby być zapis w kontrakcie z Francją o odbiorze wypalonego paliwa, gdyż posiada ona zakłady przerobu wypalonego paliwa. Obecnie w USA nie przerabia się paliwa, lecz składowuje geologicznie.

W obecnym stanie realizacji programu polskiej energetyki jądrowej bardzo pilnym staje się z myślą o wypalonym paliwie budowa składowiska odpadów promieniotwórczych.

Następnym problemem utrudniającym realizację programu tworzenia energetyki jądrowej jest brak wykształconej kadry. Na uczelniach technicznych nie kształcą inżynierów o specjalności energetyka jądrowa, zaś absolwentów fizyki o specjalności jądrowa niskich energii polskie uczelnie wypuszczają zaledwie kilkunastu w skali roku. Problemu nie rozwiążą studia podyplomowe dla inżynierów innych specjalności.

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę następujące fakty:

1. Praktycznie brak emisji do środowiska naturalnego zanieczyszczeń podczas normalnej pracy elektrowni jądrowych.
2. Wyciągnięcie wniosków z dotychczasowych awarii i uwzględnienie ich w konstrukcji najnowszych reaktorów. W wyniku czego znacznie zredukowano prawdopodobieństwo wystąpienia awarii polegającej na uszkodzeniu rdzenia reaktora do poziomu $5 \cdot 10^{-7} r^{-1}$.
3. Niskie zużycie paliwa, a co zatem idzie mała ilość odpadów.

Z tych powodów pozyskiwanie energii w elektrowniach jądrowych uważam za nie obciążającą środowisko naturalne czyli tzw. zieloną energię. Dlatego uważam budowę w Polsce elektrowni jądrowych za konieczną.

Niestety każde pozyskiwanie energii powoduje negatywne skutki. Dlatego pilnego rozwiązania potrzebują następujące problemy:

1. Wybranie metod postępowania z wypalonym paliwem.
2. Budowa składowiska odpadów promieniotwórczych.
3. Stworzenie systemu kształcenia kadr dla elektrowni jądrowych.

LITERATURA

- [1] M. Lech. *Kierunki rozwoju elektrowni jądrowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1997r.
- [2] A. Strzałkowski. *Wstęp do fizyki jądra atomowego*. PWN 1979r.
- [3] Sz. Szczeniowski. *Fizyka doświadczalna* t. IV PWN 1974.
- [4] Hahn, O., Strassmann, F.. Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. „Naturwissenschaften”. 27 (1), s. 11-15, 1939.
- [5] L. Meitner, O.E. Frish. Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type Nuclear Reaction. *Nature* 143 s. 239-240 (1939).
- [6] A. Zastawny Info.fizyka.polsl.
- [7] H.J. Jezierski Koncepcja budowy głębokiego geologicznego składowiska odpadów promieniotwórczych w Polsce. Geoportaol.pgi.gov.pl.
- [8] G. Zorpette. Nuklearnij śmietnik Hanford. *Świat Nauki* s. 74-83 (1996)
- [9] B. Dochnerd. Projekt reaktora elektroenergetego AP 1000 Westnghouse Electric Belgium.

Benefits and threats of building a nuclear power plant Poland

Abstract: In this article, the author addresses several issues related to nuclear energy and nuclear power plants. Firstly, the phenomenon of nuclear energy release and its usage in energy reactors is explained as well as the advantages of nuclear energy is pointed. Additionally, the attention to the problem of radioactive waste generation, neutralization and storage is discussed. Next, the largest failures of nuclear power plants and their effects were briefly characterized, since such accidents had a strong impact on decisions to close or even abandon the construction of such power plants. However, the implementation of new solutions in the construction of nuclear reactors, based on the conclusions of previous accidents, significantly reduces the possibility of their occurrence in the future. Finally, the author discuss the issue of construction of nuclear power plants in Poland pointing to the fact of elimination coal and gas from electricity production in order to reduce CO₂ emission. This is motivated by the fact that energy obtained from the so-called renewable energy sources will not fully meet the energy demand. However, a few problems should be solved before starting the construction of a nuclear power plant in Poland.

Keywords: binding energy, nuclear reactor, radioactive waste, nuclear power plant

Romuald Awskiuk

Politechnika Śląska

Emerytowany pracownik

Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej

tel. +48 605 591 525

e-mail romuald.awsiuk@polsl.pl