

Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych budowanych w Polsce

Doc. dr inż. Andrzej STRUPCZEWSKI

Źródła zagrożenia w elektrowni jądrowej

Budowa pierwszych elektrowni jądrowych rozpoczęła się niewiele lat po tragicznych wybuchach bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki. Nic dziwnego, że mimo obietnic obfitości energii społeczeństwo reagowało nieufnie bojąc się, czy w którejś elektrowni nie dojdzie do niekontrolowanego wybuchu, podobnego jak w bombie atomowej.

Na szczęście z samej budowy reaktora jądrowego wynika, że nie może on wybuchnąć jak bomba. W bombach stosuje się specjalne ładunki wybuchowe, by zbliżyć do siebie i utrzymać przez ułamek sekundy razem masę uranu potrzebną do wybuchu. W reaktorze geometria rdzenia jest starannie wyliczana i potrzebna do utrzymania reakcji łańcuchowej masa uranu już jest razem, a wszelkie zmiany w jej geometrii mogą tylko pogorszyć warunki realizacji reakcji rozszczepienia i doprowadzić do jej wygaszenia. A co najważniejsze, w bombie stosuje się niemal czysty ^{235}U — natomiast w reaktorze stanowi on tylko 3–4% paliwa. Dlatego paliwo reaktora energetycznego nie może „wybuchnąć”, podobnie jak nie może wybuchnąć kawałek węgla.

Zasadnicze zagrożenie w reaktorze wynika stąd, że w jego rdzeniu znajdują się produkty rozszczepienia nagromadzone w czasie pracy reaktora i stanowiące śmiertelne zagrożenie dla człowieka w przypadku wydostania się ich poza elektrownię.

System barier powstrzymujących rozprzestrzenianie się produktów rozszczepienia

Dlatego konstruktorzy elektrowni jądrowych wprowadzają system wielu barier chroniących przed rozprzestrzenianiem się produktów rozszczepienia. Pierwszą z nich stanowi sam materiał paliwowy, którym w reaktorze WWR jest dwutlenek uranu UO_2 , zatrzymujący w normalnych warunkach pracy ponad 99% produktów rozszczepienia. Niewielka ilość produktów rozszczepienia wydostająca się z pastylek paliwowych pozostaje zamknięta przez drugą barierę, to jest przez koszulkę paliwową. W reaktorach z moderatorem wodnym koszulki są wykonane ze stopów cyrkonu, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i odpornością na wysokie temperatury, znacznie przekraczające temperatury normalnej pracy.

W przypadku, gdyby koszulki okazały się nieszczelne — a dopuszczalny udział koszulek na tyle nieszczelnych, że woda może przeniknąć do paliwa, ogranicza się w reaktorach WWR do 0,1% — produkty rozszczepienia wydostają się do wody, ale pozostają w granicach obiegu pierwotnego. Granice te to np. potężne stalowe rury odporne na ciśnienie 12,5 MPa i temperaturę 300°C, wykonane z zachowaniem najwyższych wymagań jakości i wielokrotnie kontrolowane podczas produkcji, montażu i eksploatacji elektrowni. Jest to trzecia bariera, bardzo ważna, bo dopóki obieg pierwotny pozostaje szczelny, dopóty produkty rozszczepienia wydzielane z pojedynczych elementów paliwowych nie mogą zagrozić ani personelowi, ani otoczeniu elektrowni.

Ale konstruktorzy elektrowni jądrowych nie zadowalają się zaprojektowaniem jak najlepszego obiegu pierwotnego i sprawdzeniem drogą obliczeń i doświadczeń, że żaden jego element nie ulegnie zniszczeniu. Aby zapewnić jak najwyższe bezpieczeństwo elektrowni, stawiają oni sobie pytanie: „A co będzie, jeśli obieg pierwotny jednak pęknie?”

Odpowiedź na to pytanie nakazuje podjąć dalsze środki ostrożności. Wprawdzie w razie rozzerwania obiegu pierwotnego układy zabezpieczające spowodują wyłączenie reaktora, ale pewna część mocy reaktora — około 7% mocy nominalnej — będzie wydzielana nadal wskutek rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia. Powoduje to grzanie elementów paliwowych. Gdyby zabrakło wody chłodzącej, to temperatura paliwa rosnęłaby osiągając w końcu temperaturę topnienia paliwa. A to oznaczałoby jednoczesną utratę trzech barier — trzeciej w związku z założonym rozzerwaniem obiegu pierwotnego, a pierwszej i drugiej wskutek stopienia paliwa i koszulki.

Aby nie dopuścić do takiej sytuacji, elektrownie jądrowe z reaktorami WWR budowane w Polsce są wyposażone w dodatkowy Układ Awaryjnego Chłodzenia Rdzenia (UACR). Składa się on z trzech podukładów:

— trzech ciągów z pompami wysokociśnieniowymi, każdy z własnym zespołem zbiorników z wodą, rurociągów i zaworów,



Rozwiązanie zadania M 491. Z poprzedniego zadania wynika, że funkcją tworzącą $X_1 + \dots + X_m$ jest $f^m(s)$. Mamy teraz

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \cdot s^k = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \cdot s^k \cdot \\ & \times P(N = m) \cdot s^k = \sum_{m=0}^{\infty} P(N = m) \times \\ & \times \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \cdot s^k = \\ & = \sum_{m=0}^{\infty} P(N = m) \cdot f^m(s) = u(f(s)). \end{aligned}$$



Rozwiązanie zadania F 235. Niech n oznacza koncentrację neutronów, nV — ich całkowitą liczbę w objętości V , ρ — gęstość rozszczepiającej się substancji, r — jej charakterystyczny rozmiar liniowy (np. promień kuleczki uranu). Liczba neutronów powstających na skutek rozszczepienia spowodowanego przez pojedynczy neutron jest proporcjonalna do liczby zderzeń tego neutronu z jądrami, co zależy od koncentracji jąder, a więc od gęstości ρ . W ten sposób liczba wtórnych neutronów powstających w ciągu jednostki czasu, w całej objętości, jest równa $N_w = An\rho r^3$, gdzie A jest pewną stałą. Natomiast liczba neutronów uciekających N_u zależy od ich koncentracji i powierzchni substancji: $N_u = Bnr^2$. W powyższych wyrażeniach stałe A i B nie zależą od n , ρ i r . W stanie krytycznym $N_w = N_u$ lub inaczej $\rho r_{kryt} = C$. Stąd krytyczny promień r_{kryt} jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości substancji rozszczepialnej. Krytyczna objętość $\sim 1/\rho^3$, a masa krytyczna $\sim 1/\rho^2$. Przy zmniejszeniu rozmiarów liniowych ciała 10 razy gęstość jego rośnie 10^3 razy. Oznacza to, że krytyczna objętość maleje 10^9 , a krytyczna masa 10^6 razy.

FIZYCZNE NOWINKI

Redaguje dr hab. Andrzej KENNEL

NADPRZEWODNICTWO WYSOKOTEMPERATUROWE CIĄG DALSZY

Problematyka nadprzewodnictwa w wysokich temperaturach (występującego w materiałach ceramicznych), o której informowaliśmy przed miesiącem nadal pozostaje ważnym tematem zainteresowań fizyków ciała stałego i technologów. Najciekawsze rezultaty "z ostatniej chwili" nadeszły z Japonii. Jedno z laboratoriów doniosło w sierpniu 1987 o otrzymaniu nowego materiału o składzie $YBaSrCu_3O_7$, który jest nadprzewodnikiem aż do temperatury 338 K (czyli 65°C). Z kolei koncern Sanyo produkuje już drut nadprzewodzący o maksymalnej gęstości prądu elektrycznego wynoszącej 500 A/cm², a Mitsubishi Electric poinformowało, że dysponuje materiałem o blisko dziesięciokrotnie wyższej maksymalnej gęstości prądu (5680 A/cm²). Wyniki te dowodzą realnej możliwości zastosowań nowych materiałów nadprzewodzących przy przesyłaniu energii elektrycznej jak i otrzymywaniu wysokich pól magnetycznych. Niezmiernie frapującym problemem jest mechanizm fizyczny wysokotemperaturowego nadprzewodnictwa. Wielu znanych teoretyków proponowało już szereg koncepcji rozwiązania tego problemu. Mówi się nawet o efekcie "bucika Kopciuszka", do którego wszyscy usiłują włożyć stopę, lecz nikomu jeszcze się to nie udało. Pewne światło na rozwikłanie tego problemu mogą rzucić ostatnie rezultaty badań z dwóch laboratoriów amerykańskich (Bella i Uniwersytetu w Berkeley). W obydwóch laboratoriach zbadano wpływ podstawienia atomów tlenu O^{16} przez izotop O^{18} . W klasycznych nadprzewodnikach taka zamiana powoduje istotną zmianę wartości temperatury krytycznej, co dowodzi istotnego udziału drgań sieci w procesie nadprzewodnictwa (tzw. efekt izotopowy). W przypadku nowej klasy nadprzewodników ceramicznych "głównym podejrzanym" był lekki atom tlenu. Zamiana izotopów powinna więc dać kilku-stopniową zmianę wartości temperatury krytycznej. Tymczasem w eksperymentach niczego takiego nie zaobserwowano. Zmiana temperatury krytycznej (jeżeli w ogóle występuje) jest co najpóźniej rząd wielkości mniejsza od spodziewanej. Natomiast fizycy z Birmingham (Wielka Brytania) udowodnili, że podobnie jak w klasycznych nadprzewodnikach prąd elektryczny przewożony jest przez pary elektronowe. W konsekwencji kolejnym "poważnym podejrzanym" stała się miedź, która może występować w rónych stanach ładunkowych i dzięki temu umożliwiać tworzenie się nadprzewodzących par elektronowych. Co będzie dalej?

- trzech analogicznych ciągów z pompami niskociśnieniowymi,
- czterech zbiorników z wodą utrzymywaną pod wysokim ciśnieniem (6 MPa) przez poduszki azotu i oddzielonych od reaktora zaworami zwrotnymi, otwierającymi się samoczynnie, gdy tylko ciśnienie w rdzeniu spadnie poniżej ciśnienia w zbiornikach.

Obliczenia, badania modelowe, a w USA nawet próby na specjalnie w tym celu zbudowanym reaktorze wykazały, że UACR wystarcza do zalania wodą rdzenia i utrzymania chłodzenia paliwa w przypadku wszelkich możliwych awarii połączonych z rozerwaniem obiegu pierwotnego.

Aby jednak zapewnić dodatkową ochronę dla społeczeństwa, całość reaktora i obiegu pierwotnego umieszcza się w potężnej betonowej obudowie bezpieczeństwa, stanowiącej czwartą i ostatnią barierę, zapewniającą wysoką szczelność i powstrzymującą wydostawanie się na zewnątrz produktów rozszczepienia. Obudowę taką będzie także miała pierwsza polska elektrownia jądrowa budowana w Żarnowcu i następne elektrownie jądrowe z blokami WWER-1000.

Powody awarii elektrowni Czarnobyl

Ale — skoro elektrownie jądrowe z reaktorami WWER są wyposażone w tyle skutecznych zabezpieczeń, to czemu awaria w EJ Czarnobyl miała tak groźne skutki?

Bezpośrednią przyczyną awarii w EJ Czarnobyl były bardzo poważne błędy operatorów, sześć ciężkich wykroczeń przeciwko zasadom bezpieczeństwa i obowiązującym w reaktorze przepisom. Skutki tych błędów były tak tragiczne dlatego, że wydarzyły się one w reaktorze zasadniczo odmiennym niż reaktor WWER, mianowicie w reaktorze moderowanym grafitem i chłodzonym wodą, zwanym w skrócie reaktorem RBMK.

Zasadnicza różnica między tymi reaktorami wiąże się z przebiegiem kluczowego etapu łańcuchowej reakcji rozszczepienia, mianowicie z procesem spowalniania neutronów.

W reaktorze WWER podwyższenie temperatury chłodziwa, a przy dużym wzroście mocy odparowanie części wody w rdzeniu powoduje natychmiast znaczne zmniejszenie skuteczności spowalniania neutronów. Wskutek tego średnia energia neutronów rośnie, wraz z nią rosną straty neutronów na wychwyty w materiałach konstrukcyjnych i w nierozszczepialnym ^{238}U , a frakcja neutronów pochłanianych w rozszczepialnym ^{235}U maleje. Oznacza to spadek mocy reaktora, a w konsekwencji obniżenie jego temperatury i powrót do stanu równowagi. Reaktor WWER jest więc samostabilny, podobnie jak wszystkie inne odmiany wodnych reaktorów ciśnieniowych.

Natomiast w reaktorze RBMK brakuje takiego sprzężenia stabilizującego moc reaktora. Co więcej, występuje w nim w pewnych zakresach parametrów sprzężenie przeciwnie, prowadzące do samorzutnego wzrostu mocy. Dzieje się tak dlatego, że nawet bez wody grafit zapewnia spowolnienie neutronów. Wprawdzie długość drogi spowalniania w graficie jest znacznie większa niż w wodzie, ale z drugiej strony grafit praktycznie nie pochłania neutronów, podczas gdy woda pochłania ich stosunkowo dużo. Dlatego odparowanie części wody powoduje znaczny spadek pasożytniczych pochłonięć neutronów. Więcej ich dostaje się do grafitu, ulega spowolnieniu i wraca do ^{235}U , by spowodować nowe rozszczepienie. Wzrost liczby rozszczepień to wzrost mocy — i dalsze zwiększenie frakcji wody ulegającej odparowaniu, zmniejszenie liczby pochłonięć w wodzie, wzrost mocy itd. Właśnie to sprzężenie zwrotne sprawiło, że moc reaktora RBMK w EJ Czarnobyl, która przed awarią wynosiła 200 MW cieplnych, wzrosła tak szybko, że nie tylko przekroczyła moc nominalną równą 3000 MW cieplnych, ale doszła do 1 400 000 MW, zanim stopienie paliwa i rozsadzenie rdzenia powstrzymało dalszą reakcję rozszczepienia.

Dodatkowymi czynnikami powodującymi wzrost zagrożenia po awarii elektrowni Czarnobyl była obecność w rdzeniu dużej ilości gorącego grafitu, który płonął przez wiele dni po awarii, a także użycie cyrkonu jako materiału, z którego wykonano rury ciśnieniowe będące granicą obiegu pierwotnego w reaktorze. Brak też było obudowy bezpieczeństwa obejmującej cały reaktor i obieg pierwotny, a układy wyłączania awaryjnego reaktora i UACR działały mniej skutecznie niż w reaktorze WWER dla elektrowni Żarnowiec.

Najważniejszą jednak różnicą było sprzężenie zwrotne mocy i temperatury rdzenia, sprzężenie, którego działanie daje przeciwstawne skutki w reaktorze RBMK i w reaktorze WWER. Właśnie ta różnica, wynikająca z samej struktury rdzenia reaktora powoduje, że awaria „typu Czarnobyl” jest niemożliwa w reaktorze WWER.

Potencjalne zagrożenia w przypadku awarii elektrowni

Przytoczone powyżej skrótkowe rozumowanie jest podsumowaniem obszernych analiz obliczeniowych wchodzących w skład tzw. „raportu bezpieczeństwa”, to jest zbioru



Rozwiązanie zadania F 234. Jeśli przyjmiemy, że w małych otworach (porach) nie występują zderzenia między molekułami, to prawdopodobieństwo przenikania przez porowatą przegrodę jest jednakowe dla wszystkich molekul znajdujących się w strze. Liczba molekul trafiających w pory przegrody zależy od koncentracji i prędkości cząsteczek. W stałej temperaturze T prędkość cząsteczek zależy tylko od masy, gdyż średnia energia kinetyczna $E_{kin} = 3/2 \cdot kT$, k — stała Boltzmann.

Dlatego też możemy napisać

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}$$

gdzie indeks 1 dotyczy ^{235}U , a 2 — ^{238}U , $n_1/n_2 = \alpha_0$ jest stosunkiem koncentracji, a $\mu_1 = 349$ i $\mu_2 = 352$ są masami molowymi UF_6 . A więc stosunek prędkości v_1/v_2 jest proporcjonalny do stosunku koncentracji odpowiednich sześciofluorków w zbiorniku Z. Stąd zwiększenie stosunku koncentracji ^{235}U i ^{238}U : $\gamma = \sqrt{\mu_2/\mu_1} = 1,0043$ (jest to tzw. współczynnik wzbogacenia uranu). Jeśli przepuścimy gazowy UF_6 n razy przez takie urządzenie, to współczynnik wzbogacenia wyniesie $\gamma^n = \gamma^n$. A więc liczbę kolejnych przejść w celu uzyskania stosunku koncentracji równego α_n określimy z relacji:

$$\alpha_n = \alpha_0 \gamma^n, \quad \text{skąd} \\ n = \frac{\ln(\alpha_n/\alpha_0)}{\ln \gamma} \approx \frac{\alpha_n/\alpha_0 - 1}{\gamma - 1}$$

Przybliżona równość ma miejsce w przypadku, gdy α_n/α_0 jest bliskie jedynki. Stąd wynika, że stosunek koncentracji 0,05 otrzymamy po około 450 przejściach przez urządzenie wzbogacające.

dokumentów omawiających wszelkie możliwe awarie w elektrowni jądrowej. Raport bezpieczeństwa podlega szczegółowemu sprawdzeniu przez Dozór Jądrowy, niezależny urząd powołany do życia w Polsce w 1986 roku do nadzorowania bezpieczeństwa obiektów jądrowych.

W przypadku elektrowni Żarnowiec analizy wykazały, że po najgroźniejszej awarii, jaką jest rozerwanie obiegu pierwotnego i utrata chłodziwa z rdzenia, system zabezpieczeń i UACR wystarczają do przywrócenia chłodzenia rdzenia, a obudowa bezpieczeństwa zabezpiecza przed niekontrolowanym wydostawaniem się produktów roszczepienia do otoczenia.

Nawet przy założeniu, że wbrew wynikom analiz dochodzi do częściowego stopienia rdzenia, dawki na granicy strefy ochronnej otaczającej elektrownię jądrową będą znacznie mniejsze od dopuszczalnych, mianowicie dawka na całe ciało wyniesie 0,002 Sv (wartość dopuszczalna 0,1 Sv), a dawka na tarczycę 0,1 Sv (wartość dopuszczalna 0,3 Sv). Poza terenem sąsiadującym z elektrownią jądrową skutki awarii byłyby pomijalnie małe, tak, że nie byłoby trzeba ani ewakuować ludności, ani ograniczać spożycia produktów żywnościowych.

Prawdopodobieństwo wystąpienia takiej awarii jest bardzo małe, około 1 na 10 000 reaktorolat. Oznacza to, że gdyby w Polsce było 50 takich elektrowni, to awaria powodująca nie śmierć, lecz niewielkie zagrożenie zdrowia człowieka zdarzałaby się raz na 200 lat.

Takie zestawienie pozwala nam spojrzeć z właściwej perspektywy na zagrożenie związane z energetyką jądrową. A jednocześnie warto pamiętać, że zagrożenia związane ze spalaniem węgla są wciąż aktualne. Perspektywa utraty połowy lasów iglastych w Polsce, śmierć górników w kopalniach, skrócenie życia i choroby chroniczne mieszkańców Śląska — a więc jednej trzeciej ludności Polski — to koszty, które ponosimy stale. I nawet nie kwestionujemy ich, tak bardzo przywykliśmy do chmur spalin nad głową, pyłu w powietrzu, przenikającego przez okna do naszych mieszkań, do skażonych warzyw nie nadających się do jedzenia i do związków azotu wywołujących raka płuc. Analizy zagrożenia względnego wykazały, że energetyka oparta na węglu powoduje straty zdrowia i życia ludności setki razy wyższe niż energetyka jądrowa. Według ocen radzieckich skrócenie życia ludzi wywołane pracą elektrowni węglowych o mocy 1000 MWe w ciągu roku jest równoważne 200 przedwczesnym zgonom, gdy zagrożenia związane z pracą reaktora WWER (z uwzględnieniem całego cyklu wraz z wydobywaniem uranu i możliwymi awariami) dają zaledwie 0,2 zgonu rocznie. Gdyby nawet wliczyć skutki awarii w elektrowni Czarnobyl nie bacząc na zasadnicze różnice między reaktorami WWER i RBMK, to i tak zagrożenie wywołane pracą elektrowni jądrowych nie przekroczyłoby 0,4 zgonu na 1000 MWe na rok. Oznacza to, że energia jądrowa jest nie tylko niezbędna, by uchronić ludzką przetrwanie przed perspektywą nadchodzącego głodu energetycznego. Energia jądrowa jest także czysta i bezpieczna, wielokrotnie bezpieczniejsza od węgla i ropy, a w warunkach polskich stanowi ona jedyną realną drogę do zdecydowanego zmniejszenia skażeń naszego kraju i poprawy warunków, w których żyje znaczna część naszego społeczeństwa.



	Węgiel	Reaktor jądrowy WWER	Reaktor powielający	Tokamak	Synteza laserowa
Transport paliwa [ton/rok]	3 mln	200	23	100—400	10
Odpady stałe nieradioaktywne [ton/rok]	1 mln	90 tys.	9 tys.	0	0
radioaktywne [m ³ /rok]	0	340—1100	450—1200	450	30
Emisja gazów nieradioaktywne [ton/rok]	40 tys.	21	5	0	0
radioaktywne [Curie/rok]	?	250 tys.	150 tys.	1 tys.	1 tys.
Przedwczesna śmierć					
Personel	0—8	0,1—0,9			0,004
Ludność	2—111	0,01—0,2	?	?	0,003

Spółeczny koszt produkcji 1 GW energii elektrycznej (na podstawie *Proceedings of a Symposium: Behaviour of Tritium in the Environment*, San Francisco 1978).