

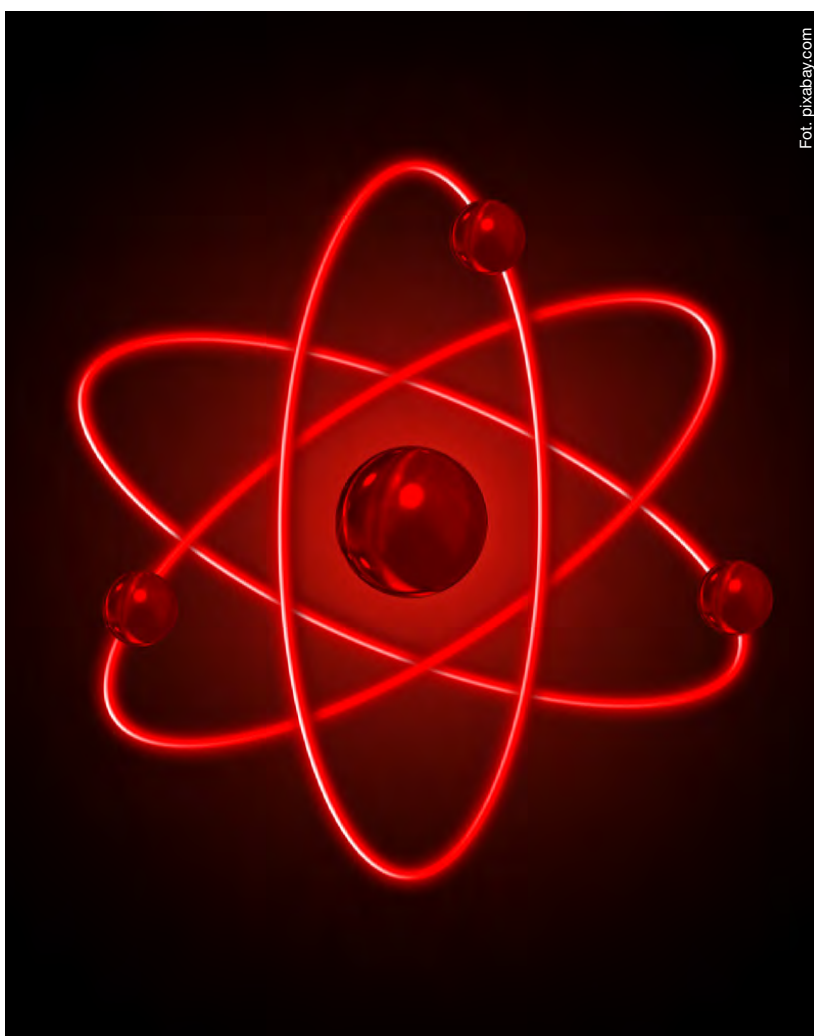
■ **Dr hab., Ludwik Pieńkowski, prof. AGH,**
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, KGHM Polska Miedź S.A.

Bezpieczeństwo i użyteczność energetyki jądrowej

Użyteczna elektrownia jądrowa, to taka która jest budowana w rozsądnym czasie, za rozsądne pieniądze i w sposób niezawodny generuje energię elektryczną po rozsądnych kosztach. Jeszcze rok temu określenie rozsądne oznaczało co innego niż obecnie i dlatego obecnie całkiem sporo projektów widać jako rozsądne, użyteczne.

Natomiast bezpieczny reaktor jądrowy to taki, który po pierwsze można w niezawodny sposób wyłączyć. Lekko-wodne reaktory ciśnieniowe typu PWR, które dominują w energetyce jądrowej, są tak zaprojektowane i wykonane, że pręty pochłaniające neutrony można wsunąć do ich rdzenia w czasie krótszym niż 5 sekund. Reakcja łańcuchowa rozszczepień wywołanych przez neutrony emitowane podczas wcześniejszych rozszczepień zostanie zatrzymana. Pewność działania systemów wyłączających reaktory energetyczne jest opanowana w bardzo dobrym stopniu, co pokazują między innymi liczne przypadki błyskawicznego i niezawodnego wyłączenia reaktorów w trakcie silnych trzęsień Ziemi.

Niestety wyłączony reaktor nie zawsze jest reaktorem bezpiecznym, gdyż w rdzeniu reaktora nadal generowane jest ciepło, nazywane ciepłem powyłęczeniowym. Jeśli nie zostanie ono sprawnie odprowadzone do otoczenia, to nastąpi wzrost temperatury rdzenia reaktora, jego stopienie (zniszczenie), a to może doprowadzić do skażenia oto-



Fot. pixabay.com

czenia. W Fukushima reaktory wyłączyły się automatycznie, gdy tylko zaczęło się trzęsienie Ziemi, ale ciepło powyłaczeniowe było wydajnie odprowadzane jedynie przez około godzinę, do czasu gdy systemy awaryjne zasilane silnikami diesla zostały zniszczone przez tsunami. Następnie temperatura rdzenia narastała przez kilkadziesiąt godzin, co doprowadziło do stopienia rdzenia reaktorów i w efekcie skażenia otoczenia.

Źródłem ciepła powyłaczeniowego są rozpady radioaktywne i wiadomo, że zatrzymanie tego procesu jest niemożliwe. Jeśli reaktor pracował przez rok lub dłużej, to jego paliwo jest silnie radioaktywne i sekundę po wyłączeniu reaktor generuje ciepło z mocą równą kilku procent mocy z jaką pracował. Po godzinie moc ta spada do ok. 1%, a po miesiącu do ok. 1 promila.

” Pewność działania systemów wyłączających reaktory energetyczne jest opanowana w bardzo dobrym stopniu, co pokazują między innymi liczne przypadki błyskawicznego i niezawodnego wyłączenia reaktorów w trakcie silnych trzęsień Ziemi

Dla reaktorów o bardzo małej mocy ciepło powyłaczeniowe nie stanowi zagrożenia, gdyż w bezpieczny sposób jest ono odprowadzane do otoczenia przez powierzchnię zbiornika reaktora. Jeśli możliwe jest zalanie dużą ilością wody pomieszczenia, w którym pracuje reaktor PWR, to bezpieczeństwo zostanie zapewnione dla reaktorów o mocy wystarczająco dużej do napędu okrętów podwodnych i lotniskowców. W historii znany jest co najmniej jeden przypadek, gdy okręt podwodny o napędzie atomowym z reaktorami typu PWR eksplodował, uległ zniszczeniu, zatonął, a jego reaktory napędowe same się wyłączyły, bezpiecznie wychłodziły i nie doszło do żadnego skażenia otoczenia.

Dla reaktorów o większej mocy takie samoczynne, bezpieczne wychłodzenie rdzenia reaktora jest niemożliwe, gdyż moc ciepła powyłaczeniowego jest zbyt duża. Z drugiej strony efekt skali powoduje, że reaktor o ośmiokrotnie większej

mocy jest jedynie ok. 4-krotnie droższy. Nic więc dziwnego, że w latach 60. ub. w. energetyka jądrowa postanowiła wejść w obszar sukcesów gospodarczych, a typowy reaktor energetyczny typu PWR osiągnął moc niemal 1 GW energii elektrycznej. Oczywiście reaktory o tak dużej mocy musiały zostać wyposażone w systemy awaryjnego chłodzenia zasilane silnikami diesla. Wówczas uznano takie rozwiązanie za bezpieczne i zostało ono z wielkim sukcesem gospodarczym wdrożone najpierw USA, gdzie w kilkanaście lat wybudowano niemal sto bloków energetycznych dużej mocy. Sukces ten powtórzono m. in. we Francji, budując w kilkanaście lat ponad 40 wielkoskalowych bloków energetycznych z reaktorami PWR. Wydawało się, że ówczesne wielkie sukcesy energetyki jądrowej dadzą euroatlantyckiej przestrzeni gospo-

darczej trwać niezależność energetyczną i kryzys energetyczny z początku lat 70. ub. w. nigdy więcej się nie powtórzy.

Niestety, z wielu powodów tak się nie stało, a jednym z nich było niedocenienie jak ważne jest zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego. W czasach wielkich sukcesów nikt z decydentów nie chciał słuchać o tym, że energetyka jądrowa wyszła z obszaru deterministycznego bezpieczeństwa, że jej bezpieczeństwo ma probabilistyczny charakter, że istnieje ryzyko, iż ciepło powyłaczeniowe zniszczy reaktor, gdyż występuje niezerowe prawdopodobieństwo, iż systemy bezpieczeństwa zawiodą.

W szczególności nikt nie słuchał Alwina Weinberga, który jeszcze na początku lat 70. ub. w. był w USA jednym z szefów programów rozwoju energetyki jądrowej. Co więcej, postanowiono usunąć go ze stanowiska, a zrobił to w 1972 r. kongresmen Chester E. Holifield, mówiąc do Alwina Weinberga: „*Alvin, if you are*

concerned about the safety of reactors, then I think it may be time for you to leave nuclear energy”. Historia pokazała, że rację miał Alvin Weinberg, o czym świat dowiedział się w dniu 28 marca 1979 r., gdy nieodprowadzone ciepło powyłaczeniowe stopiło rdzeń reaktora dużej mocy (900 MW elektrycznych) w elektrowni Three Mile Island. W wyniku tej awarii na szczęście nie doszło do skażenia otoczenia, co zawdzięczamy m. in. operatorom elektrowni. Podjęli oni odpowiedzialne działania, które wykraczały poza standardowe procedury. Pomimo to w krótkim czasie po tej katastrofie energetyka jądrowa w USA straciła wiodącą pozycję w wizji rozwoju gospodarczego. Katastrofa w Czarnobylu w 1986 r. pogłębiła kryzys i objął on całą euroatlantycką przestrzeń gospodarczą, a katastrofa w Fukushima w 2011 r. przedłużyła jego panowanie.

Przemysł jądrowy, pamiętając o sukcesach gospodarczych wielkoskalowych reaktorów w drugiej połowie ub. w. podjął działania celem powrotu do czasów świetności. Najkrótsza droga wiodła poprzez opracowanie nowej generacji wielkoskalowych reaktorów nazwanej Generacją III ze znacznie wzmocnionymi systemami bezpieczeństwa. Wprowadzono dodatkowe zabezpieczenia i zastąpiono aktywne systemy systemami pasywnymi, czyli w wielkim uproszczeniu zastąpiono zawodne silniki diesla niezawodną siłą grawitacji. Od dekady wielkoskalowe reaktory PWR Generacji III są komercyjnie dostępne, a kilka lat temu uruchomiono w Chinach pierwsze instalacje. Widać też, że chińska gospodarka docenia ich użyteczność, gdyż podejmowane są tam dość liczne nowe inwestycje.

Z drugiej strony widać, że w euroatlantyckiej przestrzeni gospodarczej wielkoskalowe reaktory PWR Generacji III pomimo podjętych prób - jak na razie nie odniosły sukcesu gospodarczego. Analizując przyczyny tego stanu podkreśla się, że nowe projekty stały się bardziej skomplikowane i wzrosły koszty inwestycji, co jednak nie przeszkodziło w rozwoju energetyki jądrowej w Chinach. Zauwa-

za się również, że kryzys w euroatlantycznej energetyce jądrowej trwa już ponad ćwierć wieku i w tym czasie z różnych przyczyn w naszej przestrzeni gospodarczej utracono w znacznym stopniu możliwość wytworzenia ciężkich, kosztownych elementów niezbędnych do wybudowania elektrowni jądrowej. Inne analizy wiążą zapaść rozwoju energetyki jądrowej w Europie i w USA z ograniczoną głębokością rynku, rozwojem energetyki wiatrowej, słonecznej i ekspansją energetyki gazowej, wypieraniem z Europy hut i innych uciążliwych, energochłonnych gałęzi przemysłu. Bez wątplenia brak dużej głębokości rynku, brak możliwości budowy w krótkim czasie serii co najmniej 20 wielkoskalowych bloków energetycznych odcina energetykę jądrową od powtórzenia w Europie i w USA sukcesów z drugiej połowy ub. w.

Tym niemniej widać, w tym w Polsce, że kolejne próby wejścia wielkoskalowej energetyki na ścieżkę powrotu do sukcesów gospodarczych są podejmowane. Obecny kryzys energetyczny w połączeniu z wizją znacznej elektryfikacji gospodarki, odejściem od węgla i gazu, zrozumieniem że energia wiatrowa i słoneczna nie zawsze jest dostępna - budują zapotrzebowanie na znaczne nowe moce w energetyce jądrowej.

Użyteczność i bezpieczeństwo energetyki jądrowej można też spróbować osiągnąć podążając drogą kreśloną przez Alvina Wingergera, autora książki „*The First Nuclear Era: The Life and Times of a Technological Fixer*”¹, z której pochodzi powyżej przytoczony cytat Chestera E. Holfielda z 1972 r. W 1989 r. Alvin Weinberg w trakcie jednej z konferencji z okazji 50. rocznicy odkrycia zjawiska rozszczepienia² mówił m. in. tak:

“Can we develop nuclear reactors whose safety is deterministic, not probabilistic, and which, if developed, would meet the public's yearning for assurance of safety, not simply assurance of the probability of safety? This is the task that has engaged many nuclear engineers in a search, now ten years old, for an inherently safe reactor. Now, in some sense, a device that produces 200 megawatts of afterheat [ciepło powyłączeniowe] and is immune from meltdown under every circumstance, conceivable and inconceivable, is a contradiction in terms. But a device whose safety depends on the working of immutable laws of nature, with a minimum of interventions either mechanical, electrical, or human - a device in short whose safety is so transparent that the skeptical elite, as well as the informed public, will regard it as safe - this I regard as eminently possible and worthwhile.”

Bez wątplenia powyższa wizja jest piękna, ale nawet w części bardzo trudna do zrealizowania. Z drugiej strony widać, że modularne reaktory PWR małej mocy leżą na ścieżce nakreślonej przez Alvina Weinberga. Eliminują one wewnętrzną sprzeczność wielkoskalowej energetyki jądrowej, której użyteczność bazuje na efekcie skali, ale ten prowadzi też do dużych mocy ciepła powyłączeniowego, którego odprowadzenie jest wyzwaniem dla zapewnienia bezpieczeństwa. Modularne reaktory i modularne bloki energetyczne mogą być użyteczne na rynkach o małej głębokości oraz dla przemysłu energochłonnego. Dają one możliwość elastycznego dopasowania generowanej mocy do potrzeb, a seryjna produkcja modułów może być uruchomiona już przy zamówieniu na budowę

systemu o łącznej mocy kilku GW. Przykładowo, w projekcie NuScale wyeliminowano pompy cyrkulacyjne, a zintegrowany z wytwornicą pary rdzeń reaktora zamknięty jest we wspólnym zbiorniku ciśnieniowym, który zostaje umieszczony w ciasnej, stalowej, próżniowej obudowie bezpieczeństwa. Tak zaprojektowany zintegrowany moduł budowany jest testowany w fabryce, a następnie transportowany na plac budowy, gdzie ma być posadowiony w basenie z wodą, celem zapewnienia bezpiecznego odprowadzania ciepła powyłączeniowego. Projekt NuScale dla modułów o mocy 50 MW uzyskał w 2022 r. certyfikację amerykańskiego regulatora NRC. Certyfikacja modułów o mocy 77 MW ma rozpocząć się jeszcze w 2022 r. Projekt ten jest w przededniu pierwszych komercyjnych inwestycji, ma szansę odnieść sukces gospodarczy. Pojawienie się takiej możliwości dostrzeżono m. in. w Polsce. KGHM Polska Miedź S.A. we współpracy z firmą NuScale Power od roku prowadzi prace przygotowawcze, których celem jest zbadanie możliwości uruchomienia w Polsce przed końcem 2030 r. modularnego bloku jądrowego składającego się z 6 modułów o łącznej mocy 462 MW.

Wydaje się, że energetyka jądrowa w euroatlantycznej przestrzeni gospodarczej (zaliczając do niej również takie kraje jak Japonia i Korea Południowa) jest dobrze przygotowana do podjęcia wyzwań obecnego kryzysu energetycznego. Można mieć nadzieję, że uda jej się co najmniej powtórzyć sukces z ub. w. Co więcej cieszy, że Polska poprzez zaangażowanie w projekty wielkoskalowe i modularne odgrywa w procesach ożywienia energetyki jądrowej istotną rolę. □

1 Alvin Weinberg

The first nuclear era: The life and times of a technological fixer

<https://www.osti.gov/biblio/175787>

https://books.google.pl/books/about/The_First_Nuclear_Era.html?id=otQDyt9PeswC&redir_esc=y

Jest tu dostępny fragment z cytatem słów Chestera E. Holfield wypowiedzianych do Alvina Weinberga w 1972 r.

2 The second fifty years of nuclear fission

Weinberg, A.M. (Institute for Energy Analysis, Oak Ridge, TN (United States))

Proceedings of the 29th annual conference of the Canadian Nuclear Association and 10th annual conference of the Canadian Nuclear Society. V. 1-3 1989

<https://inis.iaea.org/Collection/NCLCollectionStore/Public/27/011/27011663.pdf?r=1>

Special Symposium: 50 Years of Nuclear Fission in Review, Ottawa, Ontario, June 5, 1989

https://cns-snc.ca/media/history/fifty_years/weinberg.html