

# KANADYJSKIE REAKTORY CIĘŻKOWODNE TYPU CANDU

DARIUSZ WITOLD KULCZYŃSKI

Kanadyjską energetykę jądrową i ewolucję reaktorów CANDU zaprezentowałem już polskiemu czytelnikowi w dwóch artykułach opublikowanych w Wiadomościach Elektrotechnicznych w 2008 i 2009 roku [1, 2]. Tym razem po krótkim przedstawieniu historii tych reaktorów chciałbym przedstawić argumenty dlaczego Polska mogłaby być nimi zainteresowana oraz ustosunkować się do zarzutów jakie stawiane są tej konstrukcji.

## HISTORIA REAKTORÓW CANDU

Kanadyjskie reaktory ciężkowodne na uran naturalny typu CANDU (*CANada-Deuterium-Uranium*) należą do klasy ciśnieniowych reaktorów moderowanych i chłodzonych ciężką wodą (*PHWR – Pressurized Heavy Water Cooled and Moderated Reactors*). Technologia ta rozwijana jest od ponad 60 lat i zrodziła się na bazie ciężkowodnych reaktorów badawczych w laboratoriach w Chalk River w prowincji Ontario (*Chalk River Nuclear Laboratories*). Już w 1946 roku zbudowano i uruchomiono tam pierwszy na świecie, poza USA, reaktor ZEEP (*Zero Energy Experimental Pile*), a następnie większe reaktory NRX (*National Reactor Experimental*) i NRU (*National Reactor Universal*). Ten ostatni pracuje do dziś, produkując izotopy medyczne dla całej Kanady, USA i wielu krajów świata (aktualnie usuwana jest nieszczelność w obiegu chłodzenia i jest wyłączony do lipca 2010 r.). W drugiej połowie lat 40. laboratoria w Chalk River były miejscem badań i szkolenia całych generacji specjalistów, także z USA. Tam powstała firma Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), która zaprojektowała i rozwija konstrukcję reaktorów CANDU.

Filozofia kanadyjskich reaktorów CANDU to tanie paliwo (uran naturalny), które wymienia się w czasie pracy reaktora oraz ciężkowodny moderator i chłodziwo, a występujące przecieki, uzdatnia się i w ten sposób minimalizuje straty kosztownej ciężkiej wody ( $D_2O$ ). Przyjęta technologia wymiany paliwa umożliwia uzyskiwanie wysokiego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej (*capacity factor*) i pod tym względem stawia te reaktory w ścisłej czołówce na świecie.

Pierwszą elektrownią z reaktorem typu CANDU była elektrownia NPD NGS (*Nuclear Power Demonstration Nuclear Generating Station*) z reaktorem o mocy 25 MWe wybudowana w Rolphton (prowincja Ontario) w 1962 roku nad rzeką Ottawą, 30 km na zachód od laboratoriów jądrowych w Chalk River. NPD stanowiła poligon doświadczalny dla kanadyjskiej energetyki jądrowej, a zdobyte doświadczenia przyczyniły się do ulepszenia kolejnych modeli reaktorów CANDU.

Niezależnie od tego, w końcu lat 80. przy rozruchu elektrowni Darlington pojawiły się problemy techniczne w reaktorach CANDU, których nikt wcześniej nie przewidywał. W latach 1989-1990 miały miejsce wybuchy transformatorów blokowych w EJ Darlington (blok nr 1 i 2) wskutek podwajania napięcia przy zwarciu do ziemi w rozdzielni głównej, co spowodowane było złym doborem impedancji elementów sieci, ale problem został rozwiązany przez równoległe podłączenie do transformatorów baterii kondensatorów. W 1990 roku uległ zniszczeniu wirnik w generatorze bloku nr 2 na skutek wady konstrukcyjnej. Producent generatora, firma BBC opracowała najpierw pewne tymczasowe rozwiązanie, a później przekonstruowała cały wirnik i problem został wyeliminowany. W listopadzie 1990 r. zaobser-

wowano pękanie elementów konstrukcyjnych podtrzymujących elementy paliwowe w wiązkach paliwowych. Przeprowadzona analiza wykazała, że na skutek pulsacji ciśnienia wynikającej z liczby obrotów pomp i liczby łopatek w wirniku wiązki paliwowe wpadały w rezonans, który prowadził do ich niszczenia. Aby ten problem usunąć wymieniono wirniki zwiększając liczbę łopatek i problem z pękającymi wiązkami paliwowymi już nigdy nie powrócił. Widać więc, że nieoczekiwane problemy konstrukcyjne zostały skutecznie rozwiązane. Ogólny wniosek brzmi, że jeśli to tylko możliwe, najlepiej unikać większych zmian konstrukcyjnych i powielać model, który się sprawdził. Taką konstrukcją jest w przypadku reaktorów kanadyjskich model CANDU-6. Jego nowa wersja oznaczona symbolem EC-6 (*Enhanced CANDU*) o mocy 740 MWe jest klasyfikowana jako Generacja III pod względem zastosowania częściowo pasywnych systemów bezpieczeństwa i prawdopodobieństwa groźnego uszkodzenia rdzenia (*severe core damage*).

Wniosek o unikaniu większych zmian konstrukcyjnych jest słuszny dla wszystkich reaktorów jądrowych, dlatego producenci lubią mówić raczej o ewolucji niż rewolucji rozwiązań technicznych, co nie zawsze odzwierciedla stan faktyczny. Swój nowy reaktor, znany pod skrótem EPR, firma Areva w Ameryce Północnej reklamuje jako *Evolutionary Power Reactor*, natomiast w Europie ten skrót przedstawiany jest jako *European Pressurized Reactor*. Zatem nie uciekniemy od „PR”, także w dziedzinie energetyki jądrowej.

## REAKTORY CANDU NA ŚWIECIE

Reaktor CANDU charakteryzuje się wysoką ekonomią neutronów, w wyniku której ilość zużytego uranu naturalnego na 1 MWh wyprodukowanej energii elektrycznej jest niższa niż w przypadku reaktorów lekkowodnych. Oczywiście, wypalenie w kW/kg jest w CANDU kilkakrotnie niższe niż w reaktorach PWR, przez co proporcjonalnie większa jest ilość odpadów. Natomiast przy wzbogacaniu uranu na potrzeby reaktorów PWR i BWR powstają ogromne ilości uranu zużytego (*depleted uranium*). Jest on wykorzystywany do produkcji panczerzy czołgów, pociągów przeciwpancernych i elementów samolotów, ale największa jego część po prostu się marnuje. Dodatkowo, ze względu na gęstość wydzielania ciepła, odpady paliwa CANDU i paliwa PWR wymagają dokładnie takiej samej kubatury budynków na jednostkę wyprodukowanej z paliwa energii. W związku z tym ilość wypalonego paliwa CANDU zajmuje tyle samo miejsca co paliwa z PWR przy podobnej mocy bloków.

Elektrownie jądrowe z reaktorami typu CANDU pracują, oprócz Kanady, w Argentynie, Chinach, Korei Płd., Indiach, Pakistanie i Rumunii. Kanada była zawsze poligonem doświadczalnym nowych rozwiązań technicznych i taki jest reaktor EC-6, który chcą kupić Chiny zainteresowane cyklem paliwowym z wykorzystaniem toru jako materiału rozszczepialnego.

Przeprowadzenie oceny reaktorów CANDU można dokonać na dwa różne sposoby. Pierwszy oparty jest na osiąganym współczynniku wykorzystania w okresie ostatnich 12 miesięcy, a drugi od początku eksploatacji danego reaktora i uszeregowaniu począwszy od najwyższych wartości. Wyniki takiej oceny na podstawie ostatnio opublikowanych materiałów [3] (listopad 2009 r.) podaje Tabela 1. W prezentowanym zestawieniu wymieniono tylko jeden raz reaktor typu PHWR (ale w podobnym zestawieniu za cały 2006 rok występują 4 takie reaktory). Informacje te odnoszą się jednak do zbyt krótkiego okresu czasu (12 miesięcy) i nie odzwierciedlają rzeczywistej oceny danego reaktora. Zatem drugie zestawienie (Tabela 2) jest bardziej wiarygodne, gdzie wymieniono 5 reaktorów typu PHWR, a w porównaniu z zestawieniem

**Tabela 1.** Ranking reaktorów według współczynnika wykorzystania w ostatnich 12 miesiącach (do czerwca 2009 roku) [3]

Poz.	Reaktor	Kraj	Typ	Moc [MW]	Wykorzystanie [%]
1	Fukushima 1 5	Japonia	BWR	784	104,5 <sup>*)</sup>
2	Susqueham 1	USA	BWR	1202	102,9
3	Seabrook 1	USA	PWR	1267	102,0
4	Cooper	USA	BWR	836	101,9
5	Limerick 1	USA	BWR	1163	101,9
6	<b>Wolsong 2</b>	<b>Korea Płd.</b>	<b>PHWR</b>	<b>730</b>	<b>101,7</b>
7	Borssele	Holandia	PWR	481	101,6
8	Takahama 1	Japonia	PWR	826	101,3
9	Summer 1	USA	PWR	1005	101,1
10	Mihama 1	Japonia	PWR	340	101,1
11	Byron 1	USA	PWR	1242	100,9
12	Clinton	USA	BWR	108	100,6
13	Chinshan 2	Taiwan	BWR	636	100,4
14	Salem 2	USA	PWR	1232	100,4
15	Kori 3	Korea Płd.	PWR	1004	100,4
16	South Texas 1	USA	PWR	1413	100,0
17	Tokai 2	Japonia	BWR	1100	100,0
18	Doel 4	Belgia	PWR	1059	100,0
19	Point Beach 2	USA	PWR	530	99,9
20	Yonggwang 2	Korea Płd.	PWR	1050	99,8
21	Braidwood 2	USA	PWR	1210	99,8
22	Manshan 2	Taiwan	PWR	951	99,7
23	Almaraz 1	Hiszpania	PWR	980	99,7
24	Genkai 3	Japonia	PWR	1180	99,7
25	Comanche Peak 2	USA	PWR	1215	99,6

<sup>\*)</sup> Podawane współczynniki powyżej 100% odzwierciedlają pracę bloków z niewielkim przekroczeniem mocy znamionowej.

**Tabela 2.** Pozycje reaktorów CANDU wśród 25 najlepszych reaktorów na świecie pod względem współczynnika wykorzystania od początku eksploatacji (do czerwca 2009 r.) [3]

Pozycja	Reaktor	Kraj	Typ	Moc [MWe]	Wykorzystanie	Uruchomienie
1	Wolsong 3	Korea Płd.	PHWR	729	93.4	03/99
2	Emsland	Niemcy	PWR	1400	93.4	04/88
3	Wolsong 2	Korea Płd.	PHWR	730	92.9	04/97
4	Wolsong 4	Korea Płd.	PHWR	730	92.6	04/99
5	Ulchin 4	Korea Płd.	PWR	1045	92.3	01/99
6	Neckar 2	Niemcy	PWR	1395	91.3	01/89
7	Yonggwang 4	Korea Płd.	PWR	1039	90.7	07/95
8	Ulchin 3	Korea Płd.	PWR	1037	90.6	01/98
9	Isar 2	Niemcy	PWR	1475	89.5	01/88
10	Olkiluoto 2	Finlandia	BWR	870	89.3	02/80
11	Limerick	USA	BWR	1163	89.1	09/89
12	Grohnde	Niemcy	PWR	1430	88.8	09/84
13	Yonggwang 3	Korea Płd.	PWR	1039	88.5	10/94
14	Brockdorf	Niemcy	PWR	1440	88.2	10/86
15	Cernavoda 2	Rumunia	PHWR	705	88.1	08/07
16	Philipsburg 2	Niemcy	PWR	1458	87.8	12/84
17	Comanche Peak 2	USA	PWR	1215	87.7	03/93
18	Asco 2	Hiszpania	PWR	1027	87.7	10/85
19	Darlington 1	Kanada	PHWR	935	87.6	12/92
20	Beznau 2	Szwajcaria	PWR	380	87.6	10/71
21	Olkiluoto 2	Finlandia	BWR	870	87.6	09/78
22	Vogtle 2	USA	PWR	1229	86.9	04/89
23	Yonggwang 6	Korea Płd.	PWR	1050	86.7	10/02
24	Kori 4	Korea Płd.	PWR	1006	86.6	11/85
25	Paks 4	Węgry	PWR	500	86.6	08/87

z 2006 roku dołączył tu reaktor Cernavoda 2. Wydaje się faktem bez precedensu, że na czterech pierwszych miejscach zarówno w publikowanej statystyce do końca 2006 r., jak i w statystyce publikowanej do połowy 2009 roku występują 3 reaktory PHWR.

Warto zauważyć, że po 17 latach pracy, jeden spośród czterech bloków elektrowni Darlington znalazł się w zestawieniu wśród 25 najlepiej pracujących reaktorów świata i podobnie, chociaż krócej są w eksploatacji, reaktory CANDU-6 w Korei Południowej plasują się na czołowych miejscach w tabeli najlepszych reaktorów świata od momentu oddania ich do eksploatacji.

Atrakcyjną cechą reaktorów CANDU jest możliwość synergii cykli paliwowych reaktorów lekkowodnych, gdy dane państwo eksploatuje sporą liczbę reaktorów PWR obok reaktorów CANDU, bo wykorzystuje się lepiej nośniki energii i zmniejsza aktywność odpadów. Przetwarzanie zużytego paliwa jest związane z poważnymi zagrożeniami radiologicznymi, ale wiele państw robi to w sposób bezpieczny i odpowiedzialny. Inaczej: zużyte paliwo z reaktorów lekkowodnych nadaje się jeszcze do reaktorów ciężkowodnych i na podstawie ekspertyzy kanadyjskiej właśnie z takiej możliwości chcą skorzystać Chiny, które posiadają reaktory lekkowodnych i ciężkowodnych.

Zaletą CANDU jest jednak bezpośrednio składowanie wypalonego paliwa, bez potrzeby odzyskiwania pierwiastków rozszczepialnych, jak to ma miejsce z wypalonym wzbogaconym uranem z reaktorów PWR.

W 2009 roku organ rządu chińskiego odpowiedzialny za energetykę jądrową zarekomendował budowę dalszych bloków typu CANDU jako idealnych do zastosowania cyklu opartego na torze, który występuje w przyrodzie dużo obficiej od uranu. Złoża uranu są obecnie oceniane na 80 lat [2]. Kanada (w 2010 roku) posiada trzecie co do wielkości zasoby uranu na świecie. AECL oferuje klientom zagranicznym pomoc w zarządzaniu cyklem paliwowym od produkcji świeżego paliwa do ostatecznego składowania odpadów.

## ZARZUTY STAWIANE REAKTOROM CANDU

Często słyszy się o zarzutach stawianych reaktorom typu CANDU, takich jak dodatni próżniowy współczynnik reaktywności i uwolnienia trytu.

Faktem jest, że ciężkowodne reaktory CANDU posiadają niewielki, dodatni próżniowy współ-

czynnik reaktywności, który maleje o połowę w ciągu pierwszych 500 dni pracy nowego reaktora od momentu załadowania świeżego paliwa, tj. gdy w rdzeniu, oprócz rozszczepialnego uranu-235, pojawia się pluton powstający z uranu-238. Warto dodać, że ten dodatni próżniowy współczynnik reaktywności sam w sobie nie czyni reaktora niebezpiecznym, na co starają się bez przerwy wskazywać Rosjanie, jak tylko Ukraina rozważa budowę reaktorów na uran naturalny, aby uniezależnić się od Rosji. Wtedy też ukazują się artykuły w rosyjskiej prasie porównujące reaktory CANDU z reaktorami RBMK, takimi jak w EJ Czarnobyl, co jest ogromnym nadużyciem i nie ma uzasadnienia. Dodatni próżniowy współczynnik reaktywności w reaktorach CANDU jest kompensowany przez odpowiednią konstrukcję i sposób eksploatacji tych reaktorów (postępowanie przy rozruchu i wyłączeniu reaktora) i spełnia bardzo surowe wymagania Kanadyjskiej Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego (*Canadian Nuclear Safety Commission*).

W reaktorze CANDU na skutek pochłaniania neutronu przez jądra deuteru (składnik ciężkiej wody) powstaje tryt. Stanowi on dodatkowe zagrożenie radiologiczne, które nie występuje w reaktorach lekkowodnych. Tryt emituje bardzo słabe energetycznie cząstki beta, które stanowią zagrożenie gdy zostaną wchłonięte przez człowieka lub mają kontakt ze skórą. Zabezpieczeniem przed wydostawaniem się trytu jest: szczelność systemów, odpowiednia wentylacja, osuszanie powietrza oraz stosowanie sprzętu ochronnego (maski gazowej i ubrania plastikowego). We współczesnych elektrowniach z reaktorami CANDU emisja trytu jest bardzo niska, a istniejące instalacje wymiany katalitycznej i destylacji kriogenicznej usuwają tryt z ciężkowodnego moderatora i chłodziwa. Usunięty tryt zostaje związany z tytanem i może być sprzedawany na rynku izotopów państwom, które podpisały Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej (NPT). EJ Darlington posiada największą na świecie instalację usuwania trytu (autor pracuje w tej dziedzinie już ponad 20 lat).

Warto jeszcze zwrócić uwagę na systemy zabezpieczeń stosowane w reaktorach CANDU. W reaktorach tych systemy awaryjnego wyłączenia (odstawiania) reaktora są całkowicie niezależne od systemów sterowania mocą. Nie ma wspólnych elementów pomiarowych ani wykonawczych. Współczesne reaktory kanadyjskie, takie jak wersja eksportowa CANDU-6 (klasy 700 MW), posiadają następujące specjalne systemy zabezpieczeń (Special Safety Systems):

1. System Awaryjnego Wyłączenia Reaktora nr 1 (*Shutdown System I*);

2. System Awaryjnego Wyłączenia Reaktora nr 2 (*Shutdown System II*);
3. System Awaryjnego Chłodzenia Rdzenia (*Emergency Core Cooling*);
4. System Lokalizacji Skażeń (Awarii) (*Containment System*).

Nie wszystkie konstrukcje reaktorów zapewniają taką niezależność systemów sterowania (regulacji mocy) i wyłączenia (odstawiania). W 2009 roku zagadnienie dostatecznego odseparowania tych systemów w reaktorze EPR wzbudziło duże kontrowersje, między innymi w Finlandii (Olkiluoto-3) i Wielkiej Brytanii. Brytyjski Urząd Dozoru Jądrowego (*Nuclear Installations Inspectorate*) stwierdził istnienie wspólnych elementów układu sterowania i wyłączenia w reaktorze EPR i wyraził życzenie otrzymania dodatkowych wyjaśnień ze strony producenta.

Wielopoziomowe bezpieczeństwo eksploatacji zapewnia budowa reaktorów CANDU oraz systemy zabezpieczeń o wysokiej niezawodności. Niezawodność ta jest analizowana ilościowo według modeli deterministycznych i probabilistycznych w odpowiednich symulacjach komputerowych. Utrzymywanie wskaźnika niezadziałania specjalnych systemów zabezpieczeń (w przypadku EJ Darlington) poniżej  $10^{-3}$  [a/a] zgodnie z zatwierdzonym raportem bezpieczeństwa (*Safety Report*) jest warunkiem koniecznym otrzymania licencji na eksploatację reaktora (*Power Reactor Operating License*) wydawanej co pięć lat przez urząd federalny jakim jest Kanadyjska Komisja Bezpieczeństwa Jądrowego (*Canadian Nuclear Safety Commission*), a poprzednio przez Radę Nadzoru Energii Jądrowej (*Atomic Energy Control Board*). Komisja ta wydaje także licencję operatorom bloku jądrowego (*Authorized Nuclear Operators*) i dyżurnym ruchu (*Nuclear Shift Supervisors*) po zdaniu szeregu egzaminów. Doskonale opracowane szkolenie tych pracowników wykorzystuje symulatory komputerowe i trwa od 3 do 4 lat.

## REAKTOR CANDU DLA POLSKI

Rozważając budowę elektrowni jądrowej w Polsce warto zastanowić się jakie zalety posiada model eksportowy reaktora CANDU-6. Jego najnowsza wersja EC-6 jest zaliczana do Generacji III reaktorów jądrowych i oferuje swoim użytkownikom następujące korzyści:

1) Sprawdzona od 48 lat technologia jest bezpieczna, przewidywalna i zweryfikowana w wielu sytuacjach (choć należy pamiętać, że nie ma technologii idealnych).



Elektrownia jądrowa Qinshan Phase III z 2 reaktorami CANDU 6

2) Tanie paliwo – uran naturalny, a nie drogi uran wzbogacony, co daje wysoki stopień niezależności energetycznej (Kanada jest jednym z trzech największych producentów uranu na świecie poza Australią i Kazachstanem). Istnieje możliwość dywersyfikacji zakupów uranu kopalnego (ok. 18 krajów produkuje uran) i niezależnienia się od producentów uranu wzbogaconego (głównie: Rosja, USA i Francja).

3) Każdy kraj – użytkownik reaktora CANDU produkuje własne paliwo (proste, nieduże wiązki paliwowe, ułatwiające transport i składowanie przed i po wypaleniu).

4) Koszty produkcji energii elektrycznej obniżone są w tych reaktorach poprzez osiąganie bardzo wysokich współczynników wykorzystania mocy zainstalowanej.

5) Eksploatacja bloku CANDU jest w pełni skomputeryzowana (obsługa i doskonalenie oprogramowania może stanowić pole do popisu dla polskich informatyków).

6) Blok CANDU może pracować przez kilka lat bez przerwy, zapewnia to wymiana paliwa bez wyłączania reaktora poprzez utrzymywanie stałej reaktywności.

7) Reaktor CANDU posiada wysoce niezawodne systemy zabezpieczeń, w tym dwa całkowicie niezależne systemy wyłączania awaryjnego: zrzut prętów bezpieczeństwa i wstrzyknięcie substancji pochłaniającej neutrony (gadolinu) do moderatora.

8) Systemy zabezpieczeń mogą być testowane w czasie pracy reaktora, a to w połączeniu z ciągłą wymianą paliwa umożliwia długie okresy pracy bloku z planowymi przestojami co dwa, a nawet co trzy lata.

9) Przewidywany czas eksploatacji reaktora CANDU-6 to dwa okresy po 25 lat, z jedną wymianą rur ciśnieniowych (przykład EJ Embalse w Argentynie). Postęp w metalurgii i rozwiązaniach konstrukcyjnych stwarza możliwość dla nowej wersji EC-6 dwa okresy pracy po 30 lat.

10) Dotychczasowe doświadczenia z budową „pod klucz” i rozruchem wskazują, że trwa to krócej niż 5 lat (przykłady: 5 bloków zbudowanych w ciągu ostatniego dziesięciolecia). Terminowy rozruch jest niezmiernie ważny dla kosztów inwestycji czyli ceny energii elektrycznej. Na przykład budowa reaktora EPR w Finlandii jest już 3 lata opóźniona. Inwestycję zaczęta w 2003 roku planowano zakończyć w 2007 r., a w marcu 2010 roku wyznaczono kolejną datę jej zakończenia na drugą połowę 2012 r., przy czym dotychczasowe koszty opóźnień szacowane są na 2,3 mld EUR.

11) Znaczny udział dostaw urządzeń z kraju budowy (tzw. lokalizacja dostaw CANDU) pozwala, by kolejne bloki mogły wykorzystywać do 70% urządzeń i usług z rynków lokalnych (przykład Korei Południowej).

12) Doskonale opracowany system szkolenia personelu licencjonowanego przez dozór jądrowy, tj. operatorów bloku i inżynierów dyżurnych ruchu. Możliwe jest szkolenie kadr w Kanadzie i w Polsce z pomocą kanadyjską. Dokumentacja reaktora CANDU zawiera materiały szkoleniowe; są one przygotowane w języku angielskim przez osoby posługujące się na co dzień tym językiem. To wielka różnica w porównaniu z sytuacją kiedy np. Francuz szkoli Polaka w języku angielskim, który dla obu z nich jest językiem obcym.

13) Przeszkolenie całego personelu potrzebnego do rozruchu elektrowni może być zrealizowane w ciągu czterech i pół roku (najpierw w Kanadzie, potem w kraju docelowym).

14) Pełny transfer technologii: klient otrzymuje narzędzia analizy, niezbędną wiedzę, oprogramowanie i system szkolenia, włącznie z kompletną makietą sterowni i symulatorem komputerowym bloku.

15) Wymiana doświadczeń technicznych i eksploatacyjnych między elektrowniami z reaktorami CANDU na całym świecie w ramach Grupy Właścicieli Reaktorów CANDU (*Candu Owners' Group*).

16) Możliwość skorzystania z doświadczeń wielu (przynajmniej 100) Polaków pracujących w kanadyjskim przemyśle atomowym oraz instytucjach związanych z bezpieczeństwem jądrowym, jak np. w Kanadyjskiej Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego.

17) Budując szybko kilka bloków EC-6, Polska odnotowałaby dodatkowy zysk wskutek zmniejszenia opłat na rzecz Unii Europejskiej za emisję CO<sub>2</sub>.

18) W sytuacji braku uranu lub gdyby cena jego znacząco wzrosła, to reaktor CANDU może używać jako paliwa także tor – jeszcze bardziej powszechnie występujący niż uran. Cykl torowy jest nieco bardziej skomplikowany niż uranowy, ale taka alternatywa tu istnieje, w przeciwieństwie do reaktorów lekkowodnych wykorzystujących uran wzbogacony.

19) Istnieje możliwość „dopalania” w reaktorach CANDU zużytego paliwa z reaktorów lekkowodnych bez żadnej przeróbki chemicznej, jedynie formując elementy paliwowe pasujące do reaktora CANDU. Oznacza to, że nie ma przeciwwskazań dla wybudowania bloków CANDU, a następnie bloków PWR gdyż mogą się one uzupełniać.

### Podsumowanie

Technologii jądrowych jest wiele i polskie firmy energetyczne nie muszą wcale ograniczać się do jednej z nich. Im więcej technologii zostanie wziętych pod uwagę przy wyborze tej optymalnej dla warunków w Polsce tym lepiej. Wyboru pierwszej technologii jądrowej inwestor i operator muszą dokonać na podstawie szczegółowej analizy. Najlepiej w formie ankiety gdzie różnym aspektom przypisuje się odpowiednią wagę, a następnie sumuje punkty. Doskonałość rozwiązań technicznych jest ważnym, ale nie wyłącznym kryterium dokonania wyboru. Takie zagadnienia jak czas budowy, terminowość rozruchu, szkolenie personelu, doświadczenia eksploatacyjne (konstrukcja sprawdzona we wcześniejszej eksploatacji) i dostęp do paliwa oraz jego cena są równie ważne jak jakość konstrukcji.

Reaktory ciężkowodne mają swoje zalety i wady, podobnie jak reaktory lekkowodne. W tych pierwszych występuje wspomniany dodatni próżniowy współczynnik reaktywności i powstaje tryt, ale nie występuje nadwyżka reaktywności w rdzeniu; kontrole: chemiczna chłodziwa i moderatora są stale prowadzone. Wyłącznie reaktora następuje przez zrzut prętów bezpieczeństwa i wtrysk gadolinu w warunkach niskiego ciśnienia. W lekkowodnych reaktorach ciśnieniowych sterowanie mocą wymaga ciągłej zmiany zawartości boru w chłodziwie i ciągłej jego kontroli chemicznej. Wyłączenie awaryjne wymaga pokonywania wysokiego ciśnienia (zrzut prętów bezpieczeństwa i wtrysk boru), a poza tym nie ma też pełnej separacji układu sterowania mocą i układów wyłączenia awaryjnego.

Aby Polska miała szanse wejścia do klubu atomowego w ciągu najbliższego dziesięciolecia potrzebny jest szereg szybkich decyzji. Przede wszystkim reorganizacja i rozbudowa urzędów odpowiedzialnych za przemysł atomowy i zapewniających dozór jądrowy. Rozmowa o bezpieczeństwie jądrowym nie może być prowadzona w oparciu o artykuły prasowe odzwierciedlające często „PR” konkurujących ze sobą dostawców reaktorów. Polska nie może bazować na decyzjach innych urzędów dozoru jądrowego w Europie, tylko musi mieć swoich własnych specjalistów. ■

*mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński,  
Elektrownia Jądrowa Darlington,  
Kanada*

### O AUTORZE

*Mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński posiada stopień licencjonowanego inżyniera (Professional Engineer) w Kanadzie, gdzie zatrudniony jest jako Senior Technical Engineer w Elektrowni Jądrowej Darlington należącej do Ontario Power Generation Inc. (OPG). Autor artykułu przez 6 lat pracował w Elektrowni Jądrowej w Rolphton, przez kolejne 22 lata w EJ Darlington, a przez rok w dziale szkolenia. Do Polski przyjeżdża prywatnie i nie reprezentuje tu OPG.*

*Podziękowania za uzupełnienia artykułu należą się dr. hab. Jerzemu Sawickiemu (Interatomics) i dr. Stefanowi Doerfferowi (AECL) oraz dr. inż. Andrzejowi Mikulskiemu za pomoc w redakcji tekstu z uwzględnieniem polskiej terminologii. Ilustracja do artykułu została udostępniona przez AECL.*

### LITERATURA

- [1] D.W. Kulczynski: Kanadyjska energetyka jądrowa, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok LXXVI, 2008 nr 3.
- [2] D.W. Kulczynski: Ewolucja reaktorów CANDU w kontekście dyskusji o polskiej energetyce jądrowej, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok LXXVII, 2009 nr 2.
- [3] Nuclear Engineering International, vol. 54, nr 664, s. 30-35, November 2009.