

NIEELEKTRYCZNE ZASTOSOWANIA ENERGII JĄDROWEJ – KOGENERACJA I WODÓR

Non-electrical applications of nuclear energy – cogeneration and hydrogen

Józef Sobolewski

Streszczenie: W artykule tym autor przedstawia zastosowania energetyki jądrowej wykraczające poza generację energii elektrycznej, będące tematem spotkania grupy roboczej IFNEC. Zastosowanie technologii reaktorów wysokotemperaturowych otwiera możliwości zastosowania w przemyśle do wytwarzania pary przemysłowej oraz w dalszej kolejności do produkcji paliwa przyszłości – wodoru.

Abstract: In this article, the author presents applications of nuclear energy beyond the generation of electricity, which were the subject of the meeting of the IFNEC working group. The use of high-temperature reactor technology opens up possibilities for industrial applications for the production of industrial steam and, subsequently, for the production of future fuel - hydrogen.

Słowa kluczowe: energia jądrowa poza elektrycznością, mały reaktor modułowy, reaktor wysokotemperaturowy, kogeneracja, ciepło procesowe, wodór.

Keywords: nuclear energy beyond electricity, small modular reactor (SMR), high temperature reactor (HTR), cogeneration, processing heat, hydrogen.

Jesienią ubiegłego roku w Warszawie odbyło się spotkanie grupy roboczej ds. rozwoju infrastruktury jądrowej IDWG (Infrastructure Development Working Group) działającej w ramach międzynarodowej organizacji współpracy państw sprzyjających rozwojowi energetyki jądrowej IFNEC (International Framework for Nuclear Energy Cooperation: www.ifnec.org). Organizacja ta poprzez różne grupy robocze zajmuje się współpracą na płaszczyźnie merytorycznej związanej z energią jądrową i co też ważne zrzesza wyłącznie państwa zainteresowane rozwojem energetyki jądrowej. Warszawskie spotkanie przeszło bez większego echa medialnego, choć tematyka spotkania była bardzo ciekawa i dotyczyła zastosowań energii jądrowej innych niż wytwarzanie energii elektrycznej, szczególnie z zastosowaniem reaktorów wysokotemperaturowych zaliczanych obecnie także do klasy reaktorów modułowych.

Technologia jądrowa jest dziś szeroko stosowana do wytwarzania energii elektrycznej bez negatywnego wpływu na środowisko. Brak szkodliwych emisji, niewielki obszar potrzebny do umiejscowienia elektrowni, bardzo niewielka ilość odpadów, to niektóre z kluczowych cech technologii jądrowej. W Unii Europejskiej 26% energii elektrycznej wytwarzane jest w elektrowniach jądrowych, stanowiąc połowę wy-

tworzonej bezemisyjnej energii elektrycznej. Energia elektryczna w skali świata stanowi tylko 18% całkowitej zużywanej energii. Reszta to głównie wytwarzanie ciepła i transport, dziś prawie w całości zdominowanych przez źródła wysokoemisyjne. Wytwarzanie ciepła przemysłowego (procesowego), ogrzewanie miejskie poprzez kogenerację energii elektrycznej i ciepła, wytwarzanie wodoru i paliw syntetycznych do transportu mogłyby i powinny być nowymi terytoriami zajmowanym przez energię jądrową, szczególnie z punktu widzenia celów związanych z obniżeniem emisyjności tych sektorów.

W trakcie spotkania IDWG omawiano szeroko tematy związane z nieelektrycznymi zastosowaniami energii jądrowej oraz kluczową rolę, jaką reaktory wysokotemperaturowe (HTR) mogłyby odgrywać w dostarczaniu ciepła procesowego oraz energii elektrycznej w kogeneracji z ciepłem grzewczym. Ostatnia sesja koncentrowała się na roli wodoru, jednego z najbardziej obiecujących źródeł bezemisyjnej energii, który można efektywnie wytwarzać dzięki energii jądrowej. Prezentacje ze spotkania dostępne są na stronie internetowej IFNEC. W niniejszym artykule chciałbym przybliżyć czytelnikom tematykę omawianą przez uczestników spotkania.

Nieelektryczne zastosowania energii jądrowej – korzyści ekonomiczne i środowiskowe

Eksperti z Polski, z Agencji Energii Jądrowej należącej do Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (NEA OECD) oraz z Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) przedstawili z bardzo różnych punktów widzenia wielowątkowe korzyści wynikające z zastosowania energii jądrowej. Podkreślono, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na wzrost zużycia energii w świecie są często w Unii Europejskiej pomijane dwa globalne aspekty: wzrost liczby ludności i urbanizacja. Te dwa wzrastające praktycznie eksponencjalnie czynniki i wynikający z nich jeszcze szybszy wzrost zapotrzebowania na energię nie jest możliwy do pokrycia wyłącznie przez źródła odnawialne. W związku z tym zużycie paliw kopalnych będzie wzrastać przez najbliższe dziesięciolecia bez względu na zwoływane, co roku, konferencje klimatyczne. Nikt nie może zabronić rosnącym populacjom w Azji czy w Afryce korzyści wynikających z dostępu do energii. Energetyka jądrowa mogłaby częściowo pomóc rozwiązać te problemy, jednakże ruchy antyjądrowe, szczególnie w zachodniej Europie, skutecznie opóźniają tego typu działania.

Mimo tych niesprzyjających działań istnieje szereg zastosowań energii jądrowej, czy promieniowania jonizującego, które nawet w zachodniej Europie nie budzą takich kontrowersji, jak energetyczne wykorzystanie energii jądrowej. Technologie jądrowe stosuje się w przemyśle, górnictwie, hydrologii, rolnictwie, ale także w takich, wydawałoby się odległych dziedzinach, jak sztuka, archeologia czy środowisko. Bez baterii radioizotopowych nie byłaby możliwa eksploracja kosmosu. Sondy Voyager, które opuściły nasz układ słoneczny, funkcjonują nadal dzięki bateriom radioizotopowym (^{238}Pu). Medycyna nuklearna jest najbardziej znanym zastosowaniem technologii jądrowych. Ocenia się, że rocznie wykonuje się około 40 mln procedur z zakresu medycyny nuklearnej, a popyt na potrzebne radioizotopy rośnie regularnie o 5% rocznie. Oprócz diagnostyki najważniejszym obszarem jest radioterapia, główny obok chemii, oręż w walce z nowotworami. Ważne jest też użycie promieniowania jonizującego do sterylizacji produktów medycznych.

Najważniejszym obecnie kierunkiem rozwoju technologii jądrowych, co szczególnie podkreślali przedstawiciele NEA OECD i IAEA jest wejście w obszary związane z bezemisyjnym wytwarzaniem ciepła i bezemisyjnym transportem. Głównym narzędziem do tego celu mają być małe modularne reaktory (SMR, nie mylić z small-medium-reactor). Pod tą nazwą ukrywa się szereg różnych technologii, których cechą wspólną jest mała wielkość ich mocy, rozmiary fizyczne umożliwiające łatwy transport lądowy i seryjna produkcja w jed-

nej fabryce. Te zasady mają znacząco obniżyć koszty inwestycyjne na pojedynczy reaktor, ale co naturalnie podwyższą koszty wytwarzania energii w porównaniu do dużych reaktorów energetycznych. Ciepło z dużych reaktorów energetycznych w całości przeznaczają się na generację energii elektrycznej, choć w wielu przypadkach, już obecnie, stosuje się je także w sieciach ciepłowniczych, co ze względu na niekiedy znaczną odległość elektrowni od odbiorców ciepła (miast) nie jest powszechne. Istotną cechą małych reaktorów jest ich wewnętrzne bezpieczeństwo, to jest niemożność stopienia rdzenia reaktora po ustaniu wymuszanego chłodzenia ze względu na ich małą moc i związaną z tym ilość ciepła powyłączeniowego, co pozwala je lokować znacznie bliżej zamieszkałych obszarów.

Najwięcej projektów reaktorów modułowych to obecnie małe wersje dużych reaktorów energetycznych typu PWR, które mogą być użyte do ogrzewania miejskiego i kogeneracji, ze względu na porównywalną z dużymi reaktorami temperaturę na wyjściu. Z tego względu małe reaktory energetyczne mają zastosowanie, tam gdzie nie ma (lub jest słaby) dostęp do sieci przesyłowej. Bardziej egzotyczne z naszego punktu widzenia jest użycie ciepła z tego typu reaktorów do odsalania wody morskiej. Wejście w wyższe temperatury, związane z poszerzeniem zastosowań reaktorów, wymaga rezygnacji z wody, jako czynnika chłodzącego i przejście na gazy lub ciekłe metale, czy sole. Tego typu reaktory określane, jako reaktory wysokotemperaturowe (HTR) mogą być zastosowane do produkcji ciepła przemysłowego (550°C), a przy jeszcze wyższych temperaturach (950°C), na przykład do produkcji wodoru w procesie termochemicznego rozszczepienia wody.

Najbardziej zaawansowane w rozwoju, ocierające się już o komercjalizację, są obecnie dwa typy małych reaktorów. Pierwsze to małe wodne reaktory, których wojskowe wersje używane są już od kilkudziesięciu lat. Reaktory wojskowe różnią się konstrukcyjnie od reaktorów cywilnych, ale najistotniejsze jest to, że pracują na bardzo wysokowzbogaconym uranie, który może posłużyć do budowy broni jądrowej. Ponieważ rozważamy tylko cywilne zastosowania, bazujące na niskowzbogaconym uranie, obecnie jedynym producentem i użytkownikiem tego typu reaktorów jest Rosja. Opisywana w prasie pływająca platforma z dwoma reaktorami typu SMR (Akademik Łomonosow) dotarła już do miejsca swego przeznaczenia i rozpoczęła wytwarzanie energii. W budowie znajduje się kolejna analogiczna pływająca elektrownia. Intensywne prace nad cywilnymi rozwiązaniami prowadzone są głównie w USA i Kanadzie, gdzie głównym obszarem dla zastosowania tego typu SMR będą północne rejony Kanady i obszary o słabo rozwiniętej sieci przesyłowej. Drugim typem bliskim zastosowania są reaktory wysokotemperaturowe

we. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zbudowano szereg reaktorów badawczo-rozwojowych i nadszedł już czas na komercjalizację. Ze względu na osiąganie kilkakrotnie wyższych temperatur na wyjściu niż reaktory wodne, reaktory te mają o wiele szersze spektrum zastosowań, od wysokosprawnej kogeneracji po produkcję wodoru.

Reaktory wysokotemperaturowe (HTR) – poza wytwarzaniem elektryczności

W tej części spotkania skupiono się na ocenie aktualnego stanu badań nad reaktorami wysokotemperaturowymi (HTR, poniżej 950°C), także w wersji bardzo wysokotemperaturowej (VHTR, powyżej 1000°C).

Przedstawiciel Gen IV International Forum (GIF) przedstawił wyniki współpracy w ramach tej organizacji międzynarodowej dotyczące badań nad materiałami, nad paliwem i cyklem paliwowym, nad metodami produkcji wodoru i nad symulacjami komputerowymi reaktora typu VHTR. W programie tym zgodnie współpracuje 9 sygnatariuszy w tym m.in. USA, Rosja, Chiny i Unia Europejska. Dzięki szerokiemu spektrum możliwości do osiągnięcia temperatur na wyjściu z reaktora oprócz standardowego już wykorzystania produkowanego ciepła do ogrzewania, odsalania, czy wysokosprawnego wytwarzania energii elektrycznej, reaktory te mogą dostarczyć parę technologiczną (>500°C) dla chemii i petrochemii, do reformingu gazu, upłynnianiu węgla, czy termochemicznej produkcji wodoru (binarna piroliza). Obecnie w świecie prowadzonych jest kilkanaście projektów reaktorów wysokotemperaturowych o różnym stopniu zaawansowania.

Przedstawiciel Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) przedstawił polski udział w projektach HTR. Najważniejsze z projektów międzynarodowych, w których Polska odgrywa zasadniczą rolę to współfinansowane przez UE projekty GEMINI+ (rozwój reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazem, HTGR) oraz NOMATEN (rozwój materiałów do użycia w ekstremalnych warunkach, np. dla HTGR). Polska posiada także swój własny program finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) dotyczący przygotowania instrumentów prawnych, organizacyjnych i technicznych do wdrożenia reaktorów wysokotemperaturowych (GOSPOSTRATEG-HTR). Projekt realizowany jest przez NCBJ i Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (ICHTJ) pod przewodnictwem Ministerstwa Energii (obecnie Ministerstwo Klimatu).

Przedstawiciel Chin przedstawił realizowany konsekwentnie od lat 70. program wdrożenia reaktorów wysokotemperaturowych. Chiny wybrały technologię HTGR-PM (rdzeń kulowy chłodzony helem, temperatu-

ra na wyjściu 750°C) i są obecnie najbardziej zaawansowane w komercjalizacji tej technologii. Pierwszym zastosowaniem będzie wysokosprawne generowanie energii elektrycznej. Budowana w Shidao Bay elektrownia jądrowa składa się z dwóch reaktorów typu HTGR-PM o mocy 250 MWth, dających parę na jedną turbinę o mocy 211 MWe. Prace instalacyjne mają być zakończone w tym roku, a rozpoczęcie normalnej eksploatacji w 2021 r. W planach jest budowa kolejnej elektrowni złożonej z 6 reaktorów HTGR-PM o mocy 655 MWe. Chiny będą doskonalić technologię HTR na rynku energii elektrycznej, prowadząc jednocześnie badania nad zastosowaniem tego typu reaktorów w produkcji ciepła procesowego i wodoru oraz nad zwiększaniem temperatury wyjściowej z reaktora.

Przedstawiciel Rosji zaprezentował prowadzone od lat 70. prace nad reaktorami HTGR, które zakończyły się konkretnymi projektami technicznymi. Podjęte w połowie lat 80. decyzje o budowie 5 reaktorów do produkcji ciepła procesowego oraz energii elektrycznej nie zostały zrealizowane. Ponownie podjęte po roku 2000 prace skoncentrowały się na reaktorach mających służyć głównie produkcji wodoru. Planuje się budowę pierwszych instalacji do wytwarzania wodoru w oparciu o reaktory HTGR w latach 2024-2030.

Przedstawiciel Japonii tradycyjnie przedstawił meandry japońskiej polityki energetycznej po Fukushima. W Japonii jest jedyny poza Chinami obecnie funkcjonujący reaktor HTGR (z rdzeniem pryzmatycznym) wyłączony po Fukushima. Japończycy zapowiadają ponowne uruchomienie reaktora w 2021 r. Japoński HTGR (HTTR) o mocy 30 MWth jest jednostką badawczą, mającą inną technologię budowy rdzenia niż reaktor chiński. Budując ten reaktor, zakładano osiągnięcie parametrów umożliwiających binarną pirolizę wodoru z wody w cyklu jodowo-siarkowym (I-S), stąd temperatura na wyjściu to 950°C. W ramach testów reaktor pracował na pełnej mocy nieprzerwanie przez dwa miesiące. Wykonano także bardzo ważny test bezpieczeństwa i na 1/3 mocy reaktora wyłączono jego chłodzenie. Reaktor w kilka dni wychłodził się pasywnie poprzez konwekcję, udowadniając eksperymentalnie swoje inherentne bezpieczeństwo i zdolność do działania z zerową strefą bezpieczeństwa.

Przyszłość wodoru i rozwój innowacyjnych systemów jądrowych

Wodór – wspólny element naszej przyszłości energetycznej. Takim zdaniem rozpoczął swoją prezentację przedstawiciel Międzynarodowej Agencji Energii (IEA), przedstawiając wodór, jako element łączący wszystkie przyszłe wyzwania stojące przed energetyką. Jednakże wyzwania stoją także przed samym wodorem, są

to koszty produkcji, wymagana infrastruktura, bezemisyjna produkcja i bariery regulacyjne. Obecnie wodór produkowany jest praktycznie wyłącznie z paliw kopalnych i średnio na każdy 1 kg wyprodukowanego wodoru emituje się 10 kg CO₂. Głównym problemem są koszty. Wyprodukowanie wodoru przy użyciu energii ze źródeł odnawialnych (niskotemperaturowa elektroliza wody) jest średnio czterokrotnie droższe, od dotychczasowych rozwiązań. Reaktory wysokotemperaturowe są idealnym rozwiązaniem dającym możliwość użycia wszystkich obecnie opracowanych metod produkcji czystego wodoru, od niskotemperaturowej elektrolizy do wysokotemperaturowej binarnej pirolizy wody, w sposób dostosowany do bieżącego zapotrzebowania.

Ten ostatni aspekt produkcji wodoru omówił przedstawiciel Japonii, przedstawiając wyniki testów przeprowadzonych na japońskim reaktorze HTTR. Badawcza instalacja do produkcji wodoru i tlenu w oparciu termochemiczne rozczepienie wody w zamkniętym cyklu I-S wymaga temperatur sięgających 950°C, ale jedyne, co emituje to wodór i tlen. Obecnie, mimo braku energii z HTTR nadal trwają prace przystosowujące instalację produkcyjną wodoru do komercjalizacji, natomiast po ponownym uruchomieniu HTTR ruszy testowa produkcja. W oparciu o reaktory wysokotemperaturowe wypracowano w Japonii propozycje realnego bezemisyjnego systemu elektroenergetycznego łączącego energetykę jądrową z odnawialną poprzez właśnie wodór. W podstawie systemu pracują klasyczne elektrownie jądrowe i hydroenergetyka, zaś w obszarze zmiennym hybrydowe systemy HTGR z H₂ plus energia wiatrowa i fotowoltaiczna. W przypadku nadmiaru produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych wykorzystuje się ją w procesie wytwarzania wodoru w cyklu I-S (ciepło z HTGR), zaś w przypadku braku energii odnawialnej do produkcji energii elektrycznej wykorzystuje się HTGR oraz zmagazynowany wodór.

Cechą charakterystyczną reaktorów wysokotemperaturowych jest użycie specjalnego typu paliwa określanego mianem TRISO. Materiał rozszczepialny zamykany jest w małych (<1mm) kuleczkach zbudowanych z kilku warstw materiału ceramicznego, który wytrzymuje temperatury do 2000°C. Przedstawiciele dwóch firm zajmujących się produkcją uranu do celów energetycznych, europejskiej i amerykańskiej przedstawili problematykę cyklu paliwowego dla reaktorów jądrowych. Obecnie standardowo używane jest paliwo uranowe wzbogacone do 5% uranu rozszczepialnego (²³⁵U) i do tego są przygotowane fabryki. Jednakże efektywność pracy reaktorów wysokotemperaturowych jest lepsza przy wyższym wzbogaceniu, zaś obowiązujące traktaty międzynarodowe umożliwiają użycie do celów cywil-

nych wyłącznie tak zwanego niskowzbogaconego uranu (LEU) do 19,75% ²³⁵U. Obie firmy przedstawiły także swoje rozwiązania w zakresie tak zwanych MMR (micro modular reactor). Są to reaktory bardzo małej mocy, 4-5 MWe. Reaktory te, typu HTGR, są projektowane do użycia, jako źródła ciepła procesowego i wytwarzania energii elektrycznej w odosobnionych geograficznie miejscach i niewykluczone, że pierwsze zastosowania HTGR poza Chinami i Japonią znajdą miejsce w północnej Kanadzie, lub ...w armii amerykańskiej.

Na zakończenie przedstawiciel NEA OECD przedstawił inicjatywę pod nazwą Nuclear Innovation 2050, która ma przyspieszyć prace badawczo-rozwojowe i rozwój rynku dla innowacyjnych technologii jądrowych wnoszących wkład do przyszłości zrównoważonej energetyki.

Poglądy niebędące poglądami autorów prezentacji przedstawione w tym artykule są prywatnymi opiniami dra Józefa Sobolewskiego i nie reprezentują stanowiska żadnej instytucji.

*dr Józef Sobolewski,
Warszawa*

Powyższy tekst jest nieco zmodyfikowaną wersją artykułu, który ukazał się na portalu BiznesAlert 11 października 2019 r. Przedruk za zgodą autora.

Notka o autorze

Absolwent Wydziału Fizyki UW ze specjalizacją w zakresie fizyki jądrowej. Praca naukowa z zakresu rozszczepienia jądrowego z wykorzystaniem reaktora EWA w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku. Stypendysta Max-Planck-Society. Pracownik Max-Planck-Institute/Otto-Hahn-Institute w Moguncji (Niemcy). Doktor Nauk Fizycznych Uniwersytetu Jana Gutenberga w Moguncji, a następnie pracownik naukowy Uniwersytetu. Kilkunastoletnia praca naukowa w obszarze fizyki jądrowej. Ponad dwudziestoletnia praca w IT, w korporacjach amerykańskich Electronics Data Systems (EDS) i HP Enterprise Systems od inżyniera wdrożeniowca poprzez menadżera projektów do menadżera regionalnego biura sprzedaży w Europie. Specjalizacja w zakresie systemów informatycznych dla energetyki; w Polsce menadżer dużych projektów wdrożeniowych w PSE i PGNiG. Licencjat w zakresie sprzedaży w Global Sales Institute w Dallas (USA) oraz MBA w Warszawskiej Wyższej Szkole Biznesu. W latach 2016-2019 dyrektor Departamentu Energii Jądrowej Ministerstwa Energii.

