

ENERGETYKA JĄDROWA NA ŚWIECIE I W POLSCE W 2019 ROKU

Nuclear Power in the World and in Poland in 2019

Andrzej Mikulski

Streszczenie: Artykuł przedstawia przegląd dokonań w energetyce jądrowej na świecie w 2019 r. z rozdziałem wskazującym na niewielki postęp w tej dziedzinie w Polsce. Liczba reaktorów na świecie zmalała do 443 bloków, przy czym włączono 6 nowych bloków i wyłączono 13 starych bloków. Ogólna ich moc zainstalowana zmalała do 391,4 GWe z 396,6 MWe w 2018 r. Prowadzone są prace przy budowie 52 bloków jądrowych w 14 krajach, a nowe inwestycje rozpoczęły się tylko w 3 krajach po jednym bloku. Według zapowiedzi w 2020 r. ma być uruchomionych na świecie 10 nowych bloków. W Japonii pracuje tylko 9 bloków ponownie uruchomionych, a dalsze 18 przygotowywanych jest do uruchomienia. Prace w Polsce koncentrowały się głównie na przedłużających się pracach nad raportami środowiskowym i lokalizacyjnym prowadzonych na zlecenie PGE EJ 1 w dwóch wybranych lokalizacjach. Poza tym rozpoczęły się prace, głównie analityczne, nad wysokotemperaturowym reaktorem chłodzonym gazem (HTGR) przez Ministerstwo Klimatu, NCBJ i IChTJ w ramach projektu Gospostrateg. Dużym zaskoczeniem było ogłoszenie chęci budowy małego reaktora przemysłowego o mocy 300 MWe przez prywatną firmę chemiczną.

Abstract: The paper presents the changes in nuclear power in the world in year 2018, with a chapter describing the situation in Poland after 10 years of starting nuclear program is described separately. Number of power reactor increased by 6 new connection to the grid and 13 permanently shutdowns and total installed power decreased to 391.4 GWe from 396.6 GWe. Construction works are in progress in total of 52 units in 14 countries and construction was started in 3 countries of one block. In Japan, still only 9 power reactors reconnected to the grid and 18 are prepared to start production. In Poland, the work is concentrated mainly on preparation of environmental and localization reports in two chosen localizations conducted on the order of PGE EJ 1 company responsible for nuclear power in the country. Besides, the work, mainly analytical was started on high temperature gas cooled reactor (HTGR) by Ministry of Climate, NCBJ and INCT in the frame of Geostrateg project. It was a real surprise announcement of intention to start the work on industrial reactor of small power of 300 MWe by private chemical company.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa na świecie, elektrownie jądrowe (EJ), reaktor HTGR

Keywords: nuclear power in the world, nuclear power plants (NPP), reactor HTGR

Wstęp

W kwartalniku Postępy Techniki Jądrowej systematycznie od kilku lat na początku roku publikowane są informacje o energetyce jądrowej na świecie i w Polsce za ubiegły rok, tym razem za 2019 r. Stanowią one autorski wybór doniesień opartych głównie na wiarygodnych internetowych portalach anglojęzycznych prowadzonych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu, Światowe Stowarzyszenie Nuklearne (WNN – World Nuclear News) i Światową Niezależną Agencję Wiadomości Jądrowych – NucNet (The Independent Global Nuclear News Agency) oraz portale krajowe jak: cire.pl, wnp.pl, biznesalert.pl i energetyka24.pl. Dodatkowym źródłem informacji są także omówienia zorganizowanych w Polsce konferencji i seminariów i uzyskane odpowiedzi na zapytania przesłane do krajowych instytucji (PAA, NCBJ, IChTJ, CLOR i PGE EJ 1 sp. z o.o.).

Sytuacja energetyki jądrowej na świecie

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej w Wiedniu opublikowała informacje statystyczne o energetyce jądrowej na świecie za 2019 rok, które przytoczono w Tabeli 1, z podziałem reaktorów na trzy kategorie:

- przyłączane do sieci energetycznej,
- wyłączane z eksploatacji,
- nowobudowane.

Z tabeli widać, że liczba reaktorów na świecie w 2019 r. zmniejszyła się o 7 bloków, gdyż wyłączono 13 starych bloków o mocy 10 251 MWe, a włączono 6 nowych bloków o mocy 5 178 MWe, zatem ogólna moc elektrowni jądrowych zmalała o 5 073 MWe i na koniec 2019 r. wynosiła 391,6 GWe w 443 blokach. Natomiast jeśli w zestawieniu wyłączonych bloków odliczymy 5 bloków w Japonii (Fukushima-Daini 1-4 i Genkai-2), które nie pracowały od 2011 r. i w 2019 r. zdecydowano formalnie, że nie będą uruchamiane, to praktycznie w 2019 r. wyłączono 8 bloków.

Liczba uruchomionych nowych bloków dużej mocy zmalała w porównaniu z 2018 r. z 9 do 4 bloków. Warto zwrócić uwagę, że stale pozostaje w eksploatacji 5 bloków o łącznej mocy 1838 MWe uruchomionych w 1969 r., czyli eksploatowane są już przez 51 lat.

W energetyce jądrowej prowadzone są cały czas prace modernizacyjne zwiększające moc eksploatowanych reaktorów. W 2019 r. ogółem zwiększona została moc o 212 MWe. Przykładowo moc EJ Embalse w Argentynie

Tabela 1. Statystyka reaktorów jądrowych w 2019 r. na podstawie danych IAEA/PRIS
Table 1. Statistics of nuclear reactors in 2019 based on IAEA/PRIS data

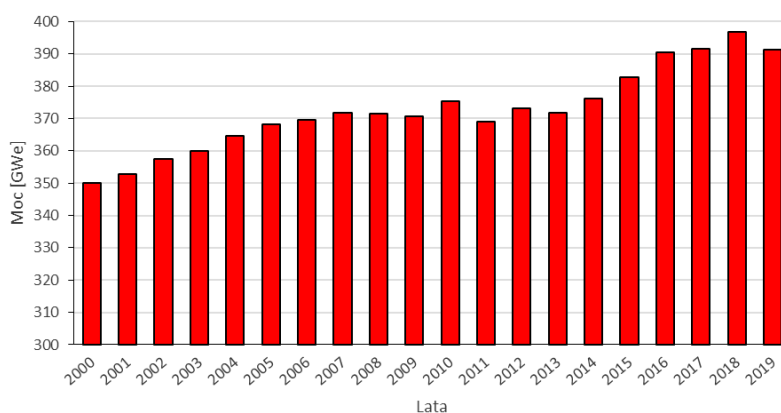
	Nazwa bloku	Kraj	Typ	Model	Moc	Data
Podłączenie do sieci energetycznej					5 178	
1	SHIN-KORI-4	Korea Płd.	PWR	APR1400	1 340	22 kwiecień
2	NOWOWORONEŻ 2-2	Rosja	WWER	WWER-1200	1 114	1 maj
3	TAISHAN-2	Chiny	PWR	EPR-1600	1 660	23 czerwiec
4	YANGJIANG-6	Chiny	PWR	ACPR-1000	1 000	29 czerwiec
5	AKADEMIK ŁOMONOSOW-1	Rosja	PWR	KLT-40S	32	19 grudzień
6	AKADEMIK ŁOMONOSOW-2	Rosja	PWR	KLT-40S	32	19 grudzień
Wyłączenie z eksploatacji					10 251	
1	BILIBINO-1	Rosja	LWGR	EGP-6	11	14 styczeń
2	GENKAI-2	Japonia	PWR	M (2 loop)	529	9 kwiecień
3	PILGRIM-1	USA	BWR	BWR-3	677	31 maj
4	CHINSHAN-2	Tajwan	BWR	BWR-4	604	16 lipiec
5	FUKUSHIMA DAINI-1	Japonia	BWR	BWR-5	1 067	30 wrzesień
6	FUKUSHIMA DAINI-2	Japonia	BWR	BWR-5	1 067	30 wrzesień
7	FUKUSHIMA DAINI-3	Japonia	BWR	BWR-5	1 067	30 wrzesień
8	FUKUSHIMA DAINI-4	Japonia	BWR	BWR-5	1 067	30 wrzesień
9	THREE MILE ISLAND-1	USA	PWR	B&W LLP	819	20 wrzesień
10	MUEHLENBERG	Szwajcaria	BWR	BWR-4	373	20 grudzień
11	WOLSONG-1	Korea Płd.	PHWR	CANDU-6	661	24 grudzień
12	PHILIPPSBURG-2	Niemcy	PWR	PWR	1 402	31 grudzień
13	RINGHALS-2	Szwecja	PWR	WH 3 LP	907	31 grudzień
Nowobudowane					3 156	
1	KURSK 2-2	Rosja	PWR	WWER TOI	1 115	15 kwiecień
2	BUSHER-2	Iran	PWR	WWER-1000	915	27 wrzesień
3	ZHANGZHOU-1	Chiny	PWR	HPR1000	1 126	16 październik

wzrosła o 35 MWe, bloku nr 2 typu BWR w EJ Browns Ferry o 155 MWe (w stosunku do mocy przy jego uruchamianiu w 1974 r., a w ubiegłym roku wzrost wyniósł 96 MWe) i bloku nr 2 w Peach Bottom o 182 MWe (też w odniesieniu do uruchomienia w 1974 r.).

Wykres zmian mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych na przestrzeni ostatnich 20 lat pokazany jest na rys. 1. Widać na nim systematyczną tendencję wzrostową od 2000 r. do czasu awarii w EJ Fukushima, załamanie się po roku 2011 i dalszy wzrost do roku 2018. W ubiegłym

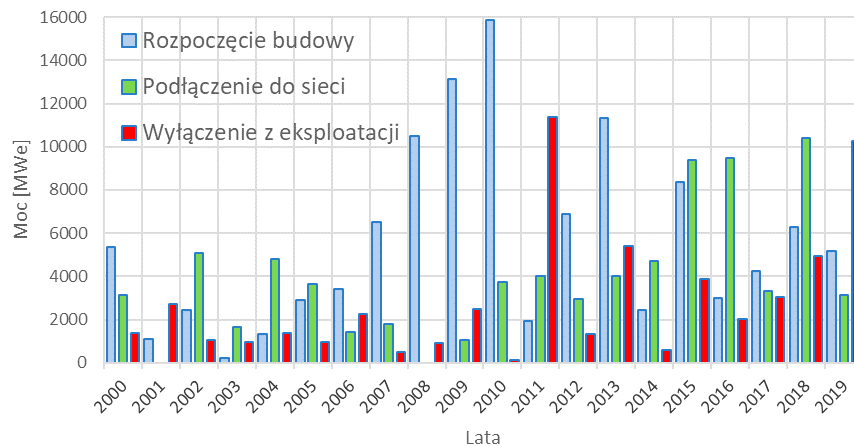
roku, jak wyżej zaznaczono, nastąpił spadek zainstalowanej mocy, a jak będzie w 2020 r. trudno przewidywać wobec wybuchu epidemii koronawirusa na świecie.

Zestawienie informacji jak w Tabeli 1. z podziałem na bloki podłączone do sieci, wyłączone z eksploatacji i rozpoczynane inwestycje przedstawia rys. 2. Tutaj podobnie jak poprzednio widać stałą tendencję wzrostową rozpoczynanych inwestycji do 2010 r., jej załamanie i pewną stabilizację od 2014 r. Podłączone moce do sieci utrzymywały się na stałym poziomie w latach 2015-2018, by



Rys. 1. Zmiana zainstalowanej mocy w elektrowniach jądrowych na świecie w latach 2000-2019
Fig. 1. Installed capacity of nuclear power plant in the world in year 2000-2019

obniżyć się ponad dwukrotnie w 2019 r. W odniesieniu do wyłączonych bloków obserwuje się znaczny ich wzrost w latach 2016-2019 wynikający z wycofywania najstarszych bloków z eksploatacji.



Rys. 2. Statystyka rozpoczętych inwestycji, podłączeń do sieci i wyłączeń z eksploatacji bloków jądrowych w latach 2000-2019
Fig 2. Statistics of construction starts, connections to the grid and permanent shutdowns of nuclear reactors in year 2000-2019

Tabela 2. Zestawienie budowanych reaktorów na koniec 2019 r. na podstawie danych IAEA/PRIS
Table 2. Summary of reactors being built at the end of 2019 on the basis of IAEA/PRIS data

Kraj	Liczba budowanych bloków	Moc [MWe]
Chiny	10	9 326
Indie	7	4 824
Rosja	4 (tylko u siebie)	4 424
Korea Płd.	4	5 360
Zjednoczone Emiraty Arabskie	4	5 380
Bangladesz, Białoruś, Japonia, Pakistan, Tajwan, Słowacja, Ukraina, USA	16 (po 2 w każdym kraju)	14 770
Argentyna, Brazylia, Finlandia, Francja, Iran, Turcja, Wielka Brytania	7 (po 1 w każdym kraju)	8 129
Razem 20 krajów	52 bloków	52 213

Uwaga: niejasna pozostaje kwestia budowy dwóch bloków w EJ Chmielnicki, które uwzględniane są w statystyce MAEA, a WNN¹ podaje, że kontrakt na budowę został zerwany, natomiast portal CIRE.PL², że dokończenie budowy uzależnione jest od możliwości eksportu energii elektrycznej do Unii Europejskiej, kiedyś zbudowanym, a obecnie niezrealizowanym połączeniem transgranicznym do Polski

Zestawienie budowanych bloków przedstawia Tabela 2. Widać z niej dominację budowanych bloków na Dalekim Wschodzie (Chiny i Indie) oraz bloków budowanych przez Rosję, zarówno u siebie, jak i w czterech innych krajach (Bangladesz, Białoruś, Chiny, Egipt, Fin-

landia, Indie, i Turcja). W zestawieniu wymieniona jest jeszcze Słowacja, ale dotyczy to dwóch bloków typu WWER-440, których budowa została przerwana w latach 90. ubiegłego wieku, a teraz uruchamianych po przekon-

struowaniu systemów sterowania i zabezpieczeń, pozostawiając rosyjskie zasadnicze elementy konstrukcyjne (zbiornik ciśnieniowy reaktora, wytwornice pary, pompy, turbina, generator) bez zmian.

Z ogólnej liczby budowanych 52 bloków warto zobaczyć jakie bloki są planowane do uruchomienia w roku 2020. Część ogólnego zestawienia, opublikowana na początku roku, dotyczącego przyszłych planowanych uruchomień pokazana jest w Tabeli 3. Widać z niej, że 80% stanowią bloki PWR o mocy przekraczającej 1000 MWe. Jest jeden blok ciężko-wodny tradycyjnie budowany w Indiach i prototypowy reaktor wysokotemperaturowy w Chinach, którego uruchomienie anonsowane było już w 2018 r., ale zostało przesunięte na bieżący rok. Obecnie (kwiecień 2020 r.) nic nie można powiedzieć, jak pandemia wpłynie na terminy uruchomienia poszczególnych bloków.

Jeśli plan ten zostanie zrealizowany, to łączna moc brutto uruchomionych bloków wyniesie 10 533 MWe i będzie porównywalna z mocą bloków uruchomionych w roku 2019.

Na podstawie dostępnych informacji publikowanych od początku 2019 r. sytuacja w poszczególnych, najbardziej zaangażowanych w energetykę jądrową, krajach kształtuje się następująco, zaczynając od krajów, które uruchomiły reaktory w roku 2019:

(1) W **Rosji** uruchomiono jeden reaktor dużej mocy typu WWER-1000 w elektrowni Nowoworoneż 2-2 (blok nr 7) oraz dwa reaktory małej mocy w ramach pływającej elektrowni przeznaczone do produkcji energii elektrycznej i ciepła grzewczego w mieście Pewek na północnej Syberii. Jest to projekt zastąpienia pracującej tam od 1974 r.

¹ <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Russia-announces-cancellation-of-Khmel'nitsky-agree>

² [cire.pl: turboatom-i-westinghouse-przedluzaja-porozumienie-o-wspolpracy](http://cire.pl/turboatom-i-westinghouse-przedluzaja-porozumienie-o-wspolpracy)
[cire.pl: rzeszowska-rdos-opublikowala-dokumenty-ws-rozbudowy-ej-chmielnicki](http://cire.pl/rzeszowska-rdos-opublikowala-dokumenty-ws-rozbudowy-ej-chmielnicki)

Tabela 3. Planowane uruchomienia reaktorów w 2020 r.

Table 3. Planned reactor launch in 2020

Reaktor	Kraj	Typ	Model	Moc brutto [MWe]
Ostrowiec 1	Białoruś	PWR	WWER-1200	1 194
Shidaowan	Chiny	HTGR	HTR-PM	210
Fuqing 5	Chiny	PWR	Hualong One	1 150
Tianwan 5	Chiny	PWR	ACPR-1000	1 118
Olkiluoto 3	Finlandia	PWR	EPR	1 720
Kakrapar 3	Indie	PHWR	PHWR-700	700
Shin Hanul 1	Korea Płd.	PWR	APR1400	1 400
Leningrad II-2	Rosja	PWR	WWER-1200	1 170
Mochovce 3	Słowacja	PWR	WWER-440	471
Barakah 1	Zjednoczone Emiraty Arabskie	PWR	APR1400	1 400
Razem	10 bloków o mocy			10 533

EJ Bilibino z czterema reaktorami o mocy 12 MWe każdy, przeznaczonymi również do produkcji ciepła grzewczego. Są to pierwsze bloki, które można zaliczyć do małych reaktorów modułowych, przeznaczonych do pracy w odległych lokalizacjach. Oparte są one konstrukcyjnie o reaktory zastosowane w lodolamaczach atomowych. Pracują na paliwie średniowzbożonym (około 14% zawartości izotopu uranu U^{235} w porównaniu do 4-5% w klasycznych elektrowniach jądrowych) co pozwala na pracę przez około 3-4 lata bez wymiany paliwa. Będzie to operacja dosyć skomplikowana, gdyż przewidywane jest przetransportowanie całej elektrowni (barki) do Murmańska i tam dokonanie wymiany paliwa. Federacja Rosyjska kontynuuje budowę 11 reaktorów za granicą w Bangladeszu, Białorusi, Chinach, Indiach i Turcji oraz przygotowuje się do rozpoczęcia budowy w Egipcie, Finlandii i na Węgrzech. Poza tym prowadzi szeroką akcję podpisywania porozumień o współpracy w dziedzinie energii jądrowej z wieloma krajami w Afryce i Ameryce Południowej.

(2) W **Chinach** w 2019 r. uruchomiono tylko dwa bloki, czyli znacznie mniej bloków niż w poprzednim roku, kiedy było ich siedem. Pierwszym z nich jest drugi w historii reaktor typu EPR, a drugim własnej konstrukcji zaawansowany reaktor generacji III+ typu ACPR-1000, którego budowa niestety trwała 9 lat i 8 miesięcy i który chcą oferować do sprzedaży za granicą. W tym roku elektrownie jądrowe wyprodukowały 348,1 TWh energii elektrycznej, co stanowi wzrost o 18% w porównaniu z poprzednim rokiem, a ich udział w ogólnej produkcji wzrósł do 4,88% w porównaniu do poprzedniego roku, kiedy wynosił 4,22%. Poza działaniami w kraju, Chiny zaangażowane są bezpośrednio w budowę dwóch reaktorów w Pakistanie typu ACP-1000. Od 2012 r. trwa budowa dwóch przemysłowych reaktorów wysokotemperaturowych pracujących na jedną turbinę, ale ich uruchomienie przesunięto w porównaniu z pierwotnymi planami o 3 lata i przewidywane jest w bieżącym roku. Jest to pierwszy taki reaktor budowany od wielu lat i należy do tzw. IV generacji. Można powiedzieć, że budowa obserwowana

jest przez wiele krajów, a jej sukces ma otworzyć drogę do szerszego zaangażowania się w tą konstrukcję. Z tego też powodu jest ona pilnie śledzona w Polsce, która według zapowiedzi prasowych też chce zaangażować się w budowę reaktorów wysokotemperaturowych.

(3) W **Korei Południowej** uruchomiony został drugi reaktor typu APR-1400, którego budowa trwała 9 lat i 8 miesięcy. Od uruchomienia reaktor pracował na pełnej mocy (100%) przez około 203 dni.

(4) W **Japonii** na ogólną liczbę 33 reaktorów w 2019 r. pracowało jedynie 9 bloków tylko typu PWR i uruchomionych w poprzednich latach. I tak EJ Sendai blok nr 1 (sierpień 2015) i nr 2 (październik 2015), EJ Takahama blok nr 3 (czerwiec 2017) i nr 4 (maj 2017), EJ Ikata blok nr 3 (listopad 2018), EJ Ohi blok nr 3 (marzec 2018) i nr 4 (maj 2018) oraz EJ Genkai blok nr 3 (marzec 2018) i nr 4 (czerwiec 2018). W 2019 r. nie uruchomiono żadnego następnego bloku wobec przedłużających się prac modernizacyjnych i oczekiwania na uzyskanie zezwolenia dozoru jądrowego i władz lokalnych dla następnych 18 bloków. Plany uruchomienia w 2020 r. dotyczą EJ Mihama blok nr 3 (połowa 2020 r.) i EJ Kashiwazaki-Kariwa bloki nr 6 i nr 7 (kwiecień 2020) i tu trzeba zauważyć, że w tej ostatniej elektrowni byłyby to pierwsze uruchomione bloki typu BWR, a konkretnie ABWR należące do III generacji. Trzeba dodać, że ogółem z eksploatacji zostało wyłączonych 27 reaktorów ze względu na kończące się zezwolenia na eksploatację lub nieopłacalność prac modernizacyjnych.

(5) W **Zjednoczonych Emiratach Arabskich** ogłoszono tryumfalnie w lutym 2019 r. zakończenie budowy pierwszego bloku w EJ Barakah, co dało czas budowy równy 6 i pół roku (od lipca 2012 do lutego 2019 r.). Niestety uruchomienie, jak oficjalnie stwierdzono z powodu opóźnienia w szkoleniu personelu, przesunięte zostało na 2020 r. Niemniej jednak sama budowa trwała 78 miesięcy, co jak na budowę pierwszego reaktora w danym kraju jest dobrym osiągnięciem.

(6) W **Finlandii** budowa pierwszego w Europie reaktora typu EPR zmierza ku końcowi i ma być uruchomiony w 2020 r. Budowa ta jest sztandarowym argumentem przeciwników energetyki jądrowej, którzy posługują się straszakiem przedłużającej się budowy, gdyż reaktor miał być pierwotnie uruchomiony w roku 2009 (tak ogłoszono przy podpisywaniu kontraktu w 2005 r.) oraz koszt jego budowy przekroczył już trzy i pół raza pierwotnie przewidywany preliminarz.

(7) We **Francji** w dalszym ciągu zapowiadane są przesunięcia terminu uruchomienia drugiego w Europie reaktora typu EPR na skutek niedociągnięć wykonawczych sygnalizowanych przez dozór jądrowy i aktualnie uruchomienie przewidziane jest w 2022 r. wobec pierwotnych planów przewidujących 2013 r. W październiku zapowiedziano wyłączenie dwóch najstarszych bloków o mocy po 880 MWe w EJ Fessenheim, które były uruchomione odpowiednio w 1977 i 1978 r., a mają być wyłączone w lutym i czerwcu 2020 r. Trzy lata temu pojawiły się wątpliwości użycia prawidłowego materiału do wykonania wytwornic pary w dziewięciu reaktorach, w tym w bloku nr 2 tej elektrowni i domagano się pilnego jego wyłączenia. Ostatecznie dozór jądrowy nie wniósł zastrzeżeń co do ich bezpieczeństwa, ale pojawiły się silne naciski, by wyłączyć te reaktory. Natomiast przeciwnicy wyłączenia wskazywali, jaki będzie wzrost emisji CO₂ po ich wyłączeniu, ale to nie przekonało rządu francuskiego i te dwa bloki zostaną wyłączone.

(8) Na **Słowacji** kontynuowane były prace wykończeniowe przy bloku nr 3 EJ Mochovce i jest nadzieja, że będzie on uruchomiony w 2020 r.

(9) W **Wielkiej Brytanii** postępują prace przy budowie dwóch bloków w EJ Hinkley Point C i utrzymywane jest stwierdzenie, że będzie ukończony w terminie, który wyznaczony został na rok 2025. Nowy premier Boris Johnson obiecał wsparcie dla energetyki jądrowej w czasie swojego pierwszego – jako premiera – wystąpienia w Izbie Gmin w lipcu 2019 r. Zgodnie z dotychczasową polityką do roku 2030 siedem z ośmiu elektrowni jądrowych funkcjonujących w tym kraju ma zostać zamkniętych, a projekty budowy nowych elektrowni jądrowych przez ostatnie dwa lata nie miały zapewnionego finansowania.

(10) Na **Białorusi** budowa EJ Ostrowiec realizowana jest z rocznym opóźnieniem, blok nr 1 przechodzi odpowiednie testy i ma być uruchomiony w połowie 2020 r. Podejmowane są wysiłki, by sprzedawać energię elektryczną sąsiadnym krajom, ale Polska, Litwa i Łotwa zdecydowanie odrzuciły taką ofertę. Białoruś będzie miała problem, co zrobić z nadwyżkami energii i pojawił się pomysł zwiększenia jej wykorzystania przez gospodarstwa domowe.

(11) W **Argentynie** budowa reaktora CAREM o małej mocy typu iPWR została wstrzymana w listopadzie ze

względu na brak finansowania ale ponownie uruchomiona w pierwszych miesiącach 2020 r.

Przechodząc do omówienia wyłączonych reaktorów w 2019 r., trzeba stwierdzić, że: **Niemcy** kontynuują wyłączanie jeszcze zupełnie sprawnych bloków, jak blok nr 2 w EJ Philippsburg (rozpoczęcie eksploatacji w kwietniu 1985 r., czyli wyłączenie po 34 latach pracy), który mógłby jeszcze pracować, w **Stanach Zjednoczonych Ameryki** wyłączono dwa reaktory (Pilgrim – 47 lat pracy i Three Mile Island 1 – 45 lat pracy) ze względów ekonomicznych tj. taniość energii elektrycznej z innych źródeł, natomiast w **Szwecji** (Ringhals 2 – 44 lat pracy), **Szwajcarii** (Mühleberg – 47 lat pracy), na **Tajwanie** (Chinshan 2 – 40 lat pracy) i w **Korei Płd.** (Wolsong – 36 lat pracy), gdyż modernizacje byłyby zbyt kosztowne i osiągnęły one prawie 40-letni okres eksploatacji.

Modułowe reaktory małej mocy

Rok 2019 był kolejnym rokiem, w którym coraz więcej działo się w zakresie modułowych reaktorów małej mocy, znanych pod skrótem SMR (small modular reactors). Raport MAEA wymienia ponad 50 różnych koncepcji takich reaktorów, ale na użytek tego sprawozdania przedstawione zostaną konstrukcje, które mogą być interesujące dla Polski w najbliższym czasie. Rysują tu się wyraźnie dwie odmienne ścieżki postępowania. Pierwsza to poszukiwanie reaktorów, które mogłyby zastąpić wycofywane bloki o mocy 200 MWe w elektrowniach konwencjonalnych ze względu na ich długi czas eksploatacji i brak możliwości jego przedłużenia ze względów ekonomicznych i wymogów ograniczenia emisji dwutlenku węgla. Druga to poszukiwanie reaktora z przeznaczeniem głównie do dostarczania ciepła przemysłowego w zakładach chemicznych, którym może być reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem (HTGR), co zostanie omówione w następnym rozdziale.

Pierwszy kierunek to oparcie się na sprawdzonych konstrukcjach reaktorów chłodzonych wodą, w najlepiej opanowanej technologii, ale o znacznie mniejszej mocy jednostkowej rzędu 200-300 MWe i możliwych do zbudowania w najbliższym czasie. Przy tak ograniczonym kryterium wyboru mamy tu tylko cztery poniższe konstrukcje reaktorów:

1. CAREM-25 budowany przez argentyńską firmę CNEA,
2. ACP-100 projektowany przez chińską firmę CNNC,
3. SMR-160 projektowany przez amerykańską firmę Holtec International,
4. BWRX-300 projektowany przez amerykańsko-japońskie konsorcjum GE-Hitachi Nuclear Energy.

Wyliczenie to nie obejmuje reaktora firmy NuScale o mocy 50 MWe, który może być budowany w zestawieniu do 12 bloków w jednym budynku obok siebie, co daje łączną moc 600 MWe. Tak mała moc i wymiary

bloku znacznie ułatwiają konstrukcję i dostarczenie na plac budowy. Usytuowanie blisko siebie tyłu reaktorów i wspólna sterowania wywołują poważne obawy o bezpieczeństwo i powinno to zostać wyjaśnione przy wydawaniu zezwolenia przez amerykański urząd dozoru jądrowego co jest planowane we wrześniu 2020 r.

Praktycznie, dla Polski można rozważać tylko dwa ostatnie reaktory, gdyż budowa prototypowego reaktora CAREM bardzo się przedłuża i byłibyśmy zainteresowani tylko zmodyfikowaną wersją o mocy 200 MWe, a reaktor ACP-100 ma zbyt małą moc 100 MWe.

Na podstawie opublikowanych danych w Internecie i materiałów dostawców w Tabeli 4 zebrano najistotniejsze parametry obu reaktorów.

Tabela 4. Charakterystyka techniczna wybranych wodnych reaktorów
Table 4. Technical characteristics of selected water reactors

Parametr	Reaktor	
	SMR-160	BWRX-300
Dostawca	Holtec International, USA	GE-Hitachi Nuclear Energy
Typ reaktora	PWR (wodny reaktor ciśnieniowy)	BWR (wodny reaktor wrzący)
Moc reaktora [MWe]	160	300
Cykl paliwowy, miesiące	18 - 24	12
Czas wychłodzenie awaryjnego	(brak informacji)	7 dni
Czas eksploatacji, lata	80	60 (?)
Koszt budowy [\$/kW]	4 100	2 250 (FOAK) 2 000 (NOAK)
Koszt produkcji [\$/MWh]		35
Wystąpienie o zezwolenie	luty 2019 (Kanada)	marzec 2019 (Kanada) grudzień 2019 (USA)
Projekt techniczny	2022	(brak informacji)
Rozpoczęcie budowy	2023 (?)	(brak informacji)
Przewidywane uruchomienie	(brak informacji)	2027

Konstrukcja obu z nich aktualnie podlega przeglądowi przez kanadyjski urząd dozoru jądrowego (CSNC), a drugiego jest w fazie dostarczania dokumentacji do amerykańskiego urzędu dozoru jądrowego (US NRC).

Reaktorem SMR-160 zainteresowane są takie kraje jak: Indie, Ukraina i Czechy, a reaktorem BWRX-300 Estonia i Polska. Wszystkie te kraje zawarły w 2019 r. odpowiednie porozumienia na dokonanie oceny przydatności konstrukcji w lokalnych warunkach, a Ukraina nawet porozumienie o współpracy przy jego budowie oferując dostawę turbozespołu.

Trzecią konstrukcją, która może być interesująca dla Polski to reaktor CAREM o mocy 25 MWe, który jest aktualnie budowany w Argentynie z planowanym uruchomieniem w roku 2021, ale w zapowiadanej wersji o zwiększonej mocy do 100 lub nawet 300 MWe.

Energetyka jądrowa w Polsce

Rok 2019 był kolejnym rokiem, w którym wbrew oczekiwaniom i obietnicom podjęcia decyzji zasadniczej (będziemy budować czy nie) tak naprawdę nie wiele się

działo w energetyce jądrowej w Polsce wbrew licznym zapowiedziom. Spójrzmy na działania czołowych graczy na polu energetyki jądrowej ułożone według subiektywnej oceny autora artykułu, głównie na podstawie doniesień internetowych.

Ministerstwo Energii ogłosiło podpisanie umowy z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju na rozpoczęcie finansowania badań w dziedzinie wsparcia wdrażania technologii reaktorów wysokotemperaturowych HTGR w Polsce³. Projekt Gospostrateg-HTR, o wartości 18 mln zł., będą realizować: Ministerstwo Energii (obecnie Ministerstwo Klimatu) oraz dwa ośrodki naukowe – Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Chemii i Techniki Jądrowej.

W ciągu trzech lat zostanie przygotowana seria analiz technicznych, prawnych i społeczno-gospodarczych, które w późniejszym etapie posłużą do sprawnego wdrażania technologii wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w polskim przemyśle.

Drugim osiągnięciem ministerstwa była aktualizacja katalogu „Polish Industry for Nuclear Energy”, który prezentuje polskie możliwości technologiczne w branży jądrowej⁴. Niestety w katalogu zawierającym 332 firmy tylko 55 (czyli 17%) podało, że ma doświadczenia w branży jądrowej i to w zakresie budowlanym i dostaw drobnych urządzeń. Stąd wniosek o możliwym poważnym udziale polskich firm przy budowie nowej elektrowni jądrowej w Polsce wydaje się sformułowany bardzo na wyrost. Chociaż w tym roku należy odnotować poważną dostawę, w ramach modernizacji, nowego stojana generatora w EJ Darlington (Kanada)⁵ oraz dostawy mniejszych

³ <https://www.cire.pl/item,175541,1,0,0,0,0,18-milionow-zl-na-wdrozenie-technologie-reaktorow-jadrowych-htgr-w-polsce.html>

⁴ <https://www.cire.pl/item,186246,1,0,0,1,0,0,me-aktualizuje-katalog-polskich-firm-z-branzy-jadrowej.html>

⁵ <https://www.cire.pl/item,177350,1,0,0,0,0,we-wroclawiu-wyprodukowano-stojan-generatora-dla-elektrowni-jadrowej-w-kanadzie.html>

urządzeń do nowych elektrowni budowanych w takich krajach jak: Indie, Japonia, Meksyk i Wielka Brytania⁶.

Ministerstwo było też organizatorem trzech otwartych spotkań poświęconych:

- prezentacji raportu przygotowanego przez Massachusetts Institute of Technology (MIT) (22 stycznia 2019 r.) na temat sposobów obniżenia wysokich kosztów budowy elektrowni jądrowych, które mają polegać na wymuszeniu, by przemysł bardziej realnie przygotowywał się do budowy elektrowni jądrowych i realizował je zgodnie z zaplanowanym harmonogramem i preliminarzem kosztów oraz by wszystkie zeroemisyjne źródła energii były traktowane jednakowo, podczas gdy obecnie widzimy dyskryminację atomu względem OZE, ale autorzy raportu stawiają pytanie, czy przestawienie się na bardziej masową (fabryczną) budowę reaktorów małej mocy może być też sposobem na obniżenie kosztów⁷,
- technologii reaktorów wysokotemperaturowych (28 stycznia 2019 r.), podczas którego podpisano umowę o wymianie akademickiej między Szkołą Inżynierii na Uniwersytecie Tokijskim a Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku⁸.
- wykorzystaniu energetyki jądrowej do produkcji ciepła przemysłowego, kogeneracji czy produkcji wodoru w ramach międzynarodowego seminarium „Nuclear Energy Beyond Electricity”⁹ (24 września 2019 r.).

W Ministerstwie Energii nastąpiła też zmiana na stanowisku dyrektora Departamentu Energii Jądrowej, odszedł dr Józef Sobolewski, a na jego miejsce z dniem 1 lutego mianowany został dr Tomasz Nowacki, który poprzednio był już wicedyrektorem tego departamentu w latach 2014-2016. Nowy dyrektor jest doktorem nauk prawnych, specjalizującym się w zagadnieniach legislacyjnych dotyczących energetyki jądrowej i m.in. był autorem artykułu w PTJ na temat organizacji wsparcia technicznego procesu inwestycyjnego elektrowni jądrowej¹⁰.

Państwowa Agencja Atomistyki zrealizowała drugi etap dwuletniego projektu ALEP (Advanced Licensing Exercise Project), który ma służyć przetestowaniu polskiego systemu oceny spełnienia wymogów bezpieczeństwa przez planowane elektrownie jądrowe. We wrześniu nastąpiła zmiana na stanowisku prezesa Agencji. Odwołany został dr Andrzej Przybycin i obowiązki

prezesa powierzone zostały dr. Łukaszowi Młynarkiewiczowi. Doktor Młynarkiewicz (lat 30) posiada wykształcenie prawnicze i w 2018 r. obronił pracę doktorską pt. „Decyzja zasadnicza jako forma działania administracji publicznej w procesie przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej”.

Spółka PGE EJ 1 w 2019 r. zajmowała się głównie przygotowaniem raportu na temat oddziaływania elektrowni jądrowej na środowisko i raportem lokalizacyjnym elektrowni, a o terminie ich przygotowania za dwa lata powiedział przedstawiciel (jeszcze wtedy) Ministerstwa Energii w połowie 2019 r., czyli raporty te poznamy w połowie 2021 r. Poza tym zleciła przeprowadzenie badania poparcia społecznego budowy elektrowni jądrowej w gminach lokalizacyjnych, które zwiększyło się o 2% w stosunku do poprzedniego roku i wynosiło 69%. Osobną działalnością była organizacja Programu Wsparcia Rozwoju Gmin Lokalizacyjnych, którego piąta edycja miała miejsce w 2019 r.

Narodowe Centrum Badań Jądrowych zaangażowane było w 2019 r. w rozpoczęcie realizacji projektu Gospostrateg-HTR, co opisane jest w dalszej części. Drugim kierunkiem działania jest prowadzenie studium doktorskiego pt. „Koncepcje nowych reaktorów i analiz bezpieczeństwa dla Programu Polskiej Energetyki Jądrowej” realizowanym w latach 2018-2023. Badania skupione są na technologii dwóch koncepcji reaktorów wysokotemperaturowych, a mianowicie reaktorów chłodzonych gazem (HTRG) i reaktora dwupłynowego (DFR). Aktualnie studium liczy 10 studentów, a w tym 3 obcokrajowców z Armenii, Egiptu i Iranu. Studenci mają do wysłuchania 16 wykładów tematycznych poświęconych nowym technologiom reaktorowym, a jednym z wyrazów ich aktywności jest udział we wspólnych cotygodniowych seminariach.

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w zakresie energetyki jądrowej koncentruje swą działalność na uczestnictwie w projekcie Gospostrateg-HTR, co dalej też jest opisane.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej jest trzecią instytucją w Polsce związaną statutowo z energetyką jądrową. W 2019 r. jego działania określone były poprzez współpracę międzynarodową nakierowaną na rozwijanie programów prognozujących dawki od rutynowych uwolnień z elektrowni jądrowych do środowiska (program MODARIA), wdrażaniu metod pomiaru HTO (tzw. wody trytowej) i OBT (trytu związanego organicznie) jak również C-14 w środowisku oraz pomiarów gazów szlachetnych Kr-85 i Xe-133 wokół obiektów jądrowych.

Nowym podmiotem w energetyce jądrowej w Polsce może okazać się koncern chemiczny **Synthos**, który zainteresowany jest zbudowaniem małego reaktora przemysłowego dostarczającego energię elektryczną na jego

⁶ <https://www.cire.pl/item,176695,1,0,0,0,0,polskie-firmy-buduja-elektrownie-jadrowe-w-wielkiej-brytanii-kanadzie-i-indiach.html>

⁷ <https://www.cire.pl/item,175122,1,0,0,0,0,raport-mit-sa-sposoby-na-obnizenie-wysokich-kosztow-budowy-atomu.html>

⁸ <https://www.cire.pl/item,175422,1,0,0,0,0,umowa-ncbj-badania-technologii-jadrowych-wspolnie-z-japonczykami.html>

⁹ <https://www.cire.pl/item,186794,1,0,0,0,0,alex-burkart-energia-jadrowa-moze-byc-wykorzystywana-do-kogeneracji-produkcji-wodoru-czy-ciepła-przemysłowego.html>

¹⁰ T. Nowacki: Niezależność organizacji wsparcia technicznego w procesie nadzoru i kontroli elektrowni jądrowych, PTJ, nr 2/2012, s. 24-40.

własne potrzeby¹¹. W tym celu zawarł on wstępne porozumienia na zbadanie możliwości zastosowania reaktora BWRX-300 firmy GE Hitachi Nuclear. Ogłoszenie o podpisaniu porozumienia odbyło się z wielką pompą w czasie forum Unia Europejska – Stany Zjednoczone na temat reaktorów SMR, które odbyło się w Brukseli w październiku 2019 r., z udziałem prezesa koncernu p. Michała Sołowowa z wiceprezesem firmy GEH i innymi oficjelami. Jest to interesująca sytuacja, gdy prywatna firma szuka możliwości inwestycji w reaktor jądrowy, co wzbudziło ogromną dyskusję w prasie, czy to jest możliwe i jak do tego podejrze polski urząd dozoru jądrowego. W każdym razie należy z ogromną uwagą śledzić dalszy rozwój tego projektu.

Opisując energetykę jądrową w Polsce, nie można pominąć czterech organizacji pozarządowych jak:

- **Polskie Towarzystwo Nukleoniczne (PTN),**
- **Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Jądrowej (SEREN),**
- **Komitet Energetyki Jądrowej SEP,**
- **Ruch Obywatelski na rzecz Energetyki Jądrowej.**

Pierwsze trzy swoją działalność popularyzatorską prowadziły w ramach comiesięcznych seminariów organizowanych na Politechnice Warszawskiej. Poza tym PTN organizuje corocznie konkursy na najlepsze prace doktorskie, magisterskie i licencjackie z szeroko pojętej dziedziny atomistyki. Czwarta organizacja, najmłodsza, podejmowała w 2019 r. dwie akcje publiczne, a mianowicie zorganizowała w dniu 14 września marsz na rzecz energetyki jądrowej na trasie od Pałacu Staszica do Urzędu Rady Ministrów zakończony wręczeniem petycji do premiera rządu oraz w dniu 20 października ustawiła stoisko edukacyjne pod pomnikiem Mikołaja Kopernika na Krakowskim Przedmieściu w Warszawie pod hasłem „Stań za atomem”¹², tak jak to zrobiły w tym dniu inne organizacje zagraniczne w 32 miastach na świecie.

Z kronikarskiego punktu widzenia należy jeszcze odnotować szereg rozmów/spotkań na szczeblu rządowym ze Stanami Zjednoczonymi Ameryki w Warszawie i Waszyngtonie, co dziennikarze łączą (ale bez oficjalnego potwierdzenia) z przygotowaniami do wykorzystania technologii amerykańskiej w budowie elektrowni jądrowej.

Reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem

Temat wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem (HTGR) pojawił się w Polsce już w 2011 r., kiedy zostało sformułowane jedno z zadań strategicznego projektu badawczego NCBR pt. „Rozwój wysokotemperaturowych reaktorów do zastosowań przemysłowych (HTR-PL)”. Następnie nad koncepcją tego reaktora

w latach 2016-2017 pracował zespół powołany przez Ministra Energii, a raport z jego pracy omówiony został już na łamach PTJ¹³. Tu należy wyjaśnić, że Chińczycy budują reaktor HTR-PM w technologii usypanych kul w zbiorniku reaktora, a Polska nakierunkowuje się na reaktor pryzmatyczny według koncepcji realizowanej w Japonii w reaktorze badawczym HTTR.

Zgodnie z zaleceniem zespołu w styczniu 2019 r. podpisana została umowa na realizację projektu Gospostrateg-HTR zatytułowanego „Przygotowanie prawnych, organizacyjnych i technicznych środków dla rozwoju reaktorów HTR” przez konsorcjum w składzie Ministerstwo Klimatu (lider), Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Zarys projektu przedstawiony został podczas wspomnianego już seminarium „Nuclear Energy Beyond Electricity”¹⁴ i podzielony został na dwie fazy:

- (A) „Prace badawcze. Przygotowanie instrumentów prawnych organizacyjnych i technicznych do wdrażania reaktorów HTR”, która obejmuje takie zadania jak:
1. Opracowanie metod diagnostyki materiałów strukturalnych w konstrukcji reaktora HTR,
 2. Opracowanie metod testowania materiałów strukturalnych w reaktorze jądrowym i wykonanie wyposażenia do testów w rdzeniu reaktora,
 3. Badanie i analiza wybranych aspektów chemicznych dla produkcji i wykorzystania paliwa TRISO w reaktorze HTR,
 4. Kompleksowa analiza koniecznych zmian środowiska prawnego oraz potencjalnych korzyści społecznych i ekonomiczno-przemysłowych dla gospodarki,
- (B) „Implementacja procedur w zaleceniach technicznych, szczególnie w warunkach polskiego Prawa atomowego”, która obejmuje:
5. Przygotowanie procesu licencjonowania (certyfikacji) reaktorów HTGR na przykładzie reaktora badawczego,
 6. Przygotowanie projektu regulacji prawnych dla realizacji inwestycji HTR; wypracowanie strategii w zakresie aspektów społecznych i ekonomiczno-przemysłowych projektu,
 7. Pilotaż procedur testów wykorzystania materiałów konstrukcyjnych na potrzeby projektu reaktora HTR, w tym testy w rdzeniu reaktora MARIA,
 8. Przygotowanie założeń techniczno-ekonomicznych dla budowy instalacji do produkcji paliwa do reaktorów wysokotemperaturowych.

Wydaje się, że przytoczone wyżej zadania badawcze nie przyczynią się do szybkiego rozwoju technologii reaktorów HTGR i przygotowania Polski do budowy

¹¹ <https://www.cire.pl/item,188099,1,0,0,0,0,0,synthos-chce-wybudowac-mala-elektrownie-jadrowa-o-mocy-300-mw.html>

¹² J. Baurki: Stań za atomem: PTJ nr 4/2019, s.57-59

¹³ A. Mikulski: Uwagi do raportu Zespołu Ministerstwa Energii ds. reaktora wysokotemperaturowego, PTJ nr 1/2018, s.21-25

¹⁴ https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2019-09/2-2._scientific_project_for_htr_in_poland.pdf

i eksportu tych reaktorów jak szumnie zapowiadano we wcześniej wzmiankowanym raporcie Zespołu Ministerstwa Energii. Po trzech latach (realizacja projektu ma się zakończyć w styczniu 2022 r.) będziemy mieli teoretyczny projekt postępowania dozoru jądrowego, bliżej nieokreślone wyniki badań materiałów do budowy reaktora oraz założenia budowy fabryki paliwa dla tego reaktora. Wiadomo, jak trudna jest budowa takiego reaktora na przykładzie trwającej od 2012 r. konstrukcji reaktora HTR-PM powstającego w Chinach i jeśli mamy doczekać się konkretnych wyników, to trzeba posuwać się znacznie szerszym frontem działań technicznych i zaangażowania różnych zakładów przemysłowych, a nie przygotowań odpowiednich przepisów prawnych. Badania materiałów konstrukcyjnych na budowę części jądrowej reaktora to proces wieloletni i w Polsce dopiero należałoby stworzyć możliwości techniczne w tym kierunku, a wyników można oczekiwać za kilka lat. W chwili obecnej, jeśli chcemy budować, to trzeba korzystać ze znanych już materiałów konstrukcyjnych i najważniejsze materiałów certyfikowanych przez urzędy dozoru jądrowego. Nie jest chyba logiczne zajęcie się produkcją wyspecjalizowanego paliwa dla tego reaktora, to są tak skomplikowane zadania, że odpowiednią gotową technologię w przeszłości w Chinach zakupiono od Niemców. Co innego jest zajęcie się wycinkowym elementem procesu fabrykacji paliwa w ścisłym porozumieniu z jego producentem, ale o takich działaniach nic nie wiadomo.

Z cząstkowych, dostępnych w internecie informacji można się dowiedzieć, że NCBJ zlecił wykonanie pracy pt. „Usługi badawcze dotyczące przygotowania różnych konfiguracji reaktora HTGR dla Narodowego Centrum Badań Jądrowych Otwock – Świerk”¹⁵ z następującym krótkim opisem przedmiotu zamówienia, którym jest „przygotowanie różnych konfiguracji reaktora HTGR na potrzeby analizy ekonomicznej”. Zamówienie obejmuje następujące etapy:

I. Przygotowanie różnych konfiguracji rdzenia pryzmatycznego reaktora HTGR obejmujących:

1. Schemat rozmieszczenia paliwa TRISO z podziałem na strefy wzbogacenia,
2. Schemat oraz strategię przeładunku paliwa,
3. Metodę kompensacji reaktywności przy pomocy prętów kontrolnych oraz trucizn wypalających,

II. Przeprowadzenie analiz numerycznych dla rozważanych konfiguracji przeprowadzonych w złożonych obliczeniach z uwzględnieniem następujących procesów oraz zjawisk występujących w reaktorach HTGR:

1. Podwójna heterogeniczność rdzenia reaktora HTGR,
2. Wpływ temperatury na przekroje czynne reakcji jądrowych,

3. Wpływ ruchomych prętów kontrolnych na zaburzenia rozkładu strumienia neutronów, rozkładu gęstości mocy oraz temperatury,
4. Wypalanie paliwa jądrowego z dążeniem do kompozycji równowagowej.

Zamówienie zostało ogłoszone 23 września 2019 r. z terminem składania ofert do 1 października i wykonania pracy do 31 stycznia 2020 r., a w rozstrzygnięciu przetargu podano, że wykonania tej pracy podjęła się Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Nawet pobieżna analiza zakresu prac wskazuje, że nie można jej wykonać w okresie czterech miesięcy. Potrzeba na to 2-3 lata, albo jeszcze więcej i dosyć dużego zespołu. Poza tym niezbędne jest posiadanie projektu konstrukcyjnego reaktora oraz korzystanie z kodów obliczeniowych certyfikowanych przez urząd dozoru jądrowego, gdyż wyniki analiz zapewne posłużą do uzyskania licencji na budowę tego reaktora badawczego w Świerku. A jeśli tak, to w projekcie Gospostrateg-HTR od początku powinno brać udział przedsiębiorstwo przemysłowe, które mogłoby się podjąć wykonania projektu technicznego tego reaktora i następnie uczestniczyć w jego budowie.

Podsumowanie

Podsumowując przedstawione informacje, można stwierdzić, że utrzymuje się na świecie tendencja budowy dużych bloków energetycznych przez najbliższe 8-10 lat, ale nie rysują się dalsze plany inwestycyjne w tym zakresie. Z drugiej strony coraz więcej krajów zainteresowanych jest reaktorami małej mocy i ukazuje się wiele publikacji wskazujących, że jest to właściwy kierunek rozwoju energetyki jądrowej. Należałoby sobie życzyć, by w roku 2020 zapadły ostateczne decyzje, czy będziemy budować elektrownie jądrowe w Polsce, w oparciu o jakich dostawców technologii i o jakie reaktory chodzi: dużej mocy czy modularne małej mocy?

Przedstawiony materiał przeglądowy oparty jest na materiałach dostarczonych przez instytucje krajowe i na powszechnie dostępnych, wiarygodnych materiałach z portali internetowych jak WNN i NucNet i mimo wielkiej staranności w zbieraniu informacji autor nie rości sobie pretensji, że materiał jest kompletny w stu procentach.

*dr inż. Andrzej Mikulski,
Polskie Towarzystwo Nukleoniczne,
Warszawa*

¹⁵ https://www.ncbj.gov.pl/sites/default/files/przetargi_i_zamowienia/%5Btitle%5D/ogloszenie_o_zamowieniu_177.pdf