

**Tadeusz Pindór**

AGH w Krakowie

e-mail: tpindor@zarz.agh.edu.pl

---

**UWARUNKOWANIA I PERSPEKTYWY ROZWOJU  
ENERGETYKI JĄDROWEJ W ŚWIECIE I W POLSCE\***

---

**DETERMINANTS AND PROSPECTS  
FOR DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER  
ENGINEERING IN THE WORLD AND IN POLAND**

---

DOI: 10.15611/pn.2018.523.28

JEL Classification: Q41, Q47

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono podstawowe uwarunkowania procesu pozyskiwania energii wtórnej, głównie elektrycznej, z uranu. Na wstępie ukazano wielkość oraz geograficzną strukturę eksploatacyjnych zasobów rud uranu w przeliczeniu na czysty pierwiastek. Analizie poddano współczynniki przestrzennej koncentracji zasobów złóż, stanowiących podstawę do oceny zagrożenia dostaw uranu na rynki międzynarodowe w wyniku monopolizacji eksportu przez zmoję niewielkiej grupy dostawców. Scharakteryzowano proces pozyskiwania rud uranu ze złóż oraz głównych producentów uranu naturalnego. Po stronie popytowej przeanalizowano udział zużycia uranu w całkowitym zużyciu energii pierwotnej w świecie a następnie przedstawiono ranking państw – głównych użytkowników uranu.

**Słowa kluczowe:** energetyka jądrowa, eksploatacyjne zasoby uranu, zużycie uranu, rozwój trwały i zrównoważony.

**Summary:** The paper presents fundamental determinants concerning the process of generating secondary energy, mainly electricity, from uranium. In the introduction, the size and the geographical structure of the uranium ore reserves has been shown, expressed as pure element. An analysis has been performed of the coefficients of spatial concentration of geological resources, which form the basis for the assessment of threats to uranium deliveries to the international markets as a result of the monopolisation of exports by an arrangement between a small group of suppliers. The paper also characterises the process of extracting uranium ores from the deposits as well as the main producers of natural uranium. On the demand side of uranium management, the paper analyses the share of uranium consumption in total primary energy consumption in the world and then presents the ranking of states being the main uranium consumers.

**Keywords:** nuclear power engineering, uranium reserves, uranium consumption, stable and sustainable development.

---

\* Artykuł opracowano w ramach badań statutowych AGH nr 11/11.200.350.

## 1. Wstęp

Energetyka jądrowa oparta jest na pozyskiwaniu na skalę przemysłową energii wtórnej, głównie elektrycznej i ciepłej, z rozszczepienia ciężkich jąder pierwiastków, szczególnie uranu. Pierwsze elektrownie jądrowe uruchomiono w połowie lat pięćdziesiątych XX wieku. Dynamiczny rozwój tego sektora generowania energii elektrycznej z izotopów uranu przypada na lata 1974-1985, co było związane głównie ze wzrostem kosztów pozyskiwania konwencjonalnych nośników energii pierwotnej: ropy naftowej i gazu ziemnego. Wykorzystanie embarga na eksportowe dostawy ropy naftowej jako substytutu środków militarnych w międzynarodowym konflikcie zbrojnym na Bliskim Wschodzie w 1973 roku spowodowało nieznaną w historii wzrost cen ropy, a później również gazu ziemnego, na rynkach międzynarodowych. Ceny nominalne w okresie 1972-1980 wzrosły z 2,48 dol./b. do 36,83 dol./b., to jest o 1385%, a ceny realne – według siły nabywczej dol. z 2010 r. – z 12,93dol./b. do 97,46 dol./b., czyli o 653% [Pindór 2016a]. Konsekwencje tego *szoku cenowego*, nazwanego błędnie kryzysem energetycznym, radykalnie podważyły zaufanie do ropy naftowej i – w mniejszym stopniu – do gazu ziemnego jako surowców energetycznych i skierowały uwagę na alternatywne źródła energii, to jest węgla i uranu.

Celem artykułu jest identyfikacja i analiza uwarunkowań funkcjonowania energetyki jądrowej w świecie i w Polsce, a także nakreślenie perspektyw rozwoju tego sektora. Artykuł ma charakter przeglądowny. Zawiera wyniki badań dotyczących wielkości i rozmieszczenia geologicznych zasobów rud uranu oraz wolumenu produkcji i zużycia uranu naturalnego. Przegląd nowych osiągnięć technologicznych stanowił podstawę prognoz udziału energetyki nuklearnej w generowaniu energii wtórnej w kontekście kryteriów rozwoju trwałego i zrównoważonego.

W analizie sektora energetyki jądrowej, obok takich zagadnień jak: dostępność zasobów rud uranu, sprawność techniczna konwersji energii jądrowej w energię elektryczną oraz bezpieczeństwo tego procesu, istotnym problemem jest specyfika ekonomicznych aspektów wykorzystania tego pierwotnego nośnika energii, jakim jest uran. Budowa systemowej elektrowni atomowej dużej mocy wiąże się z koniecznością zaangażowania znacznych nakładów na proces inwestycyjny, co manifestuje się bardzo wysoką kapitałochłonnością w porównaniu z innymi technologiami w energetyce zawodowej. W efekcie wielu potencjalnych inwestorów staje przed uwarunkowaniem o charakterze bariery kapitałowej, szczególnie trudnej do pokonania w przypadku ewentualnego zagrożenia w postaci kwalifikacji wykorzystania środków budżetowych jako niedozwolonej pomocy publicznej. Należy w tym miejscu podkreślić, że koszty bieżące generowania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych są najniższe spośród wszystkich wykorzystywanych technologii produkcji energii wtórnej [Independent 2018; UNIDO 2017].

Podjęcie programu budowy od podstaw sektora systemowej energii jądrowej – a to jest *casus* Polski – napotyka dodatkowo problem, wynikający z braku własnych kadr dysponujących doświadczeniem w zakresie: projektowania obiektów technologii nuklearnej, realizacji procesu inwestycyjnego, technicznych odbiorów poszczególnych urządzeń i całej elektrowni, uzgodnień przez inwestora warunków bezpieczeństwa pracowników elektrowni i osób trzecich oraz ochrony funkcji i komponentów środowiska z samorządem, NGO-sami, władzami państw sąsiednich, kierownictwem UE i organizacjami międzynarodowymi. W Polsce brak również doświadczeń w zakresie finansowania pilotażowych przedsięwzięć rozwojowych o wielkiej wartości kosztorysowej i bardzo długim okresie zwrotu zaangażowanego kapitału.

W artykule wykorzystano – jako źródła danych, charakteryzujących funkcjonowanie sektora energetyki jądrowej – publikacje naukowe, a także raporty i sprawozdania instytucji o najwyższym poziomie wiarygodności: Międzynarodowej Agencji Energetycznej, Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, Światowej Rady ds. Energii, Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju, Światowego Stowarzyszenia Nuklearnego oraz wyspecjalizowanych agend ONZ.

## **2. Konsekwencje katastrof technicznych dla wizerunku energetyki jądrowej**

W ostatnim czterdziestoleciu miały miejsce dwie katastrofy techniczne w elektrowniach atomowych: w Czarnobylu oraz w Fukushima, a ponadto kilka awarii w obiektach energetyki jądrowej w świecie, z których szczególnie nagłośniona została awaria w amerykańskiej elektrowni Three Mile Island.

Katastrofa w Czarnobylu w 1986 roku wywołana została przez błędne polecenia przeprowadzenia eksperymentów technicznych, podjęte w strukturach zarządzania poza elektrownią, natomiast tragiczne skutki tego zdarzenia wynikały głównie z braku podstawowych środków chroniących środowisko, poza reaktorem, przed konsekwencjami gwałtownego wzrostu ciśnienia oraz temperatury wewnątrz samego reaktora. Wypadek ten spowodował wstrzymanie na wiele lat niemal wszystkich, często zaawansowanych projektów budowy, a nawet uruchamiania nowych elektrowni jądrowych w świecie [Nuclear 1986; Strupczewski 1990; World Energy 1987].

W 2011 roku w pobliżu największej japońskiej wyspy Honsiu miały miejsce dwie katastrofy naturalne: trzęsienie ziemi o magnitudzie 9,0 oraz tsunami. Fala o wysokości 18 metrów, powstała w wyniku trzęsienia ziemi, historycznego co do wielkości wyzwolonej energii, spowodowała poważne uszkodzenie elektrowni atomowej w Fukushima. Warto podkreślić, że elektrownia jądrowa w miejscowości Onagawa, leżąca znacznie bliżej epicentrum trzęsienia ziemi niż Fukushima, chroniona jednak wyższym murem oporowym, pozostała praktycznie w stanie

nienaruszonym. Znamienną konsekwencją tej sytuacji było wykorzystanie terenu elektrowni jądrowej przez mieszkańców Onagawy do schronienia się w trakcie wstrząsów wtórnych, podczas gdy w Fukushima trwała ewakuacja pracowników elektrowni oraz mieszkańców [Nuclear Engineering 2013; World Energy 2013; International Energy Agency 2016].

Awaria w cywilnej elektrowni jądrowej Three Mile Island, położonej na sztucznej wyspie w stanie Pensylwania, w 1979 roku była konsekwencją stopienia się części rdzenia w reaktorze nr 2, zbudowanym według stanu wiedzy z pierwszej połowy lat siedemdziesiątych minionego stulecia. W efekcie niewielkie ilości produktów rozszczepienia znalazły się poza obudową bezpieczeństwa. Awaria nie spowodowała utraty życia ani zdrowia nikogo z personelu elektrowni ani też z osób trzecich. Wykorzystanie doświadczeń z analizy przebiegu i konsekwencji awarii umożliwiło trwałe podniesienie bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych, projektowanych i budowanych w latach następnych [Kemeny 1979; Strupczewski 1990; United 1995; World Energy 1987].

Konsekwencje katastrof technicznych w Czarnobylu i Fukushima oraz awarii w elektrowni Three Mile Island, mimo specyficznych przyczyn, spowodowały w wielu państwach rezygnację z inwestycji w energetykę jądrową, a także planowanie zamknięcia czynnych elektrowni, głównie w Niemczech, Belgii, Szwajcarii i Włoszech. Do konstytucji Austrii został wpisany zakaz budowy elektrowni jądrowych oraz zakaz składowania materiałów jądrowych, a także ich transportu do i przez terytorium Austrii [UNIDO 2017; World Energy 2016].

Ataki medialne przesłoniły liczne zalety energetyki jądrowej, szczególnie brak emisji polutantów gazowych i pyłowych oraz operowanie w reaktorach atomowych najbardziej skondensowanymi źródłami energii, jakie kiedykolwiek wykorzystywał człowiek [Independent 2018; International Atomic 2017; OECD 2016].

Istotnym problemem związanym z funkcjonowaniem energetyki jądrowej pozostaje transportowanie i składowanie odpadów promieniotwórczych. Innym ważnym warunkowaniem są bardzo wysokie koszty związane z fizyczną likwidacją elektrowni i utylizacją wyposażenia technicznego [OECD, World Nuclear Association 2017].

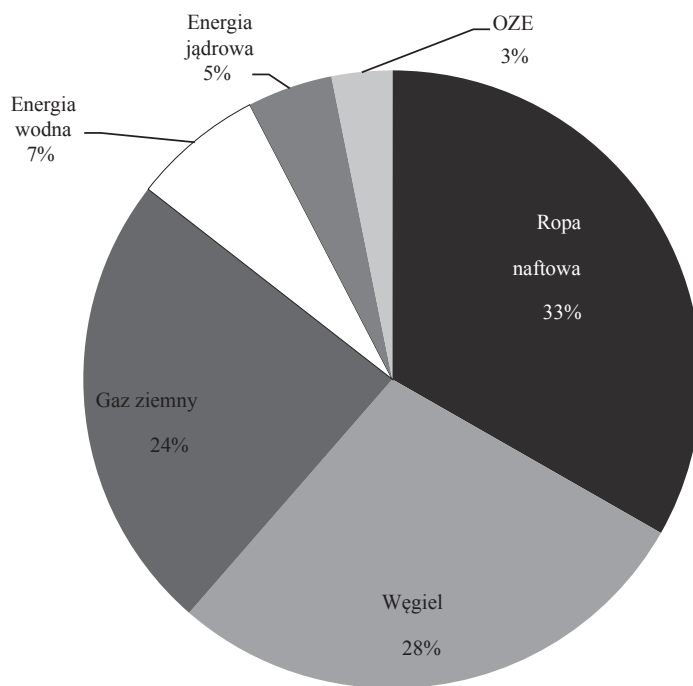
### 3. Udział energetyki jądrowej w generowaniu energii wtórnej

Energetyka jądrowa jest wykorzystywana od ponad sześćdziesięciu lat, jednak jej udział w wytwarzaniu całkowitej energii wtórnej jest nadal niewielki. W 2016 roku wskaźnik ten wynosił niespełna 4,5%, co przedstawiono w tab. 1 oraz na rys. 1. W zestawieniu tym wykorzystana została uniwersalna, techniczna miara wielkości energii, to jest tona paliwa umownego (*ton of oil equivalent* – *toe* = 41,868 GJ). Przyjęcie tej jednostki umożliwia porównywanie nośników energii pierwotnej o różnej wartości opałowej.

**Tabela 1.** Wielkość i struktura zużycia nośników energii pierwotnej w świecie w 2016 roku

Lp.	Źródło energii	Zużycie	
		[mln toe]*	[%]
1	Ropa naftowa	4 418,2	33,28
2	Węgiel	3 732,0	28,12
3	Gaz ziemny	3 204,1	24,13
4	Energia wodna	910,3	6,85
5	Energia jądrowa	592,1	4,46
6	OZE	419,6	3,16
	Świat	13 276,3	100,00

Źródło: [British 2017].

**Rys. 1.** Struktura zużycia nośników energii pierwotnej w świecie w 2016 roku [%]

Źródło: jak w tab. 1.

Źródłem danych zamieszczonych w tab. 1 jest coroczny raport koncernu British Petroleum, opracowywany od wielu lat we współpracy z Europejską Komisją Gospodarczą ONZ, grupującą pięćdziesiąt sześć państw z trzech kontynentów.

#### 4. Wielkość i struktura eksploatacyjnych zasobów uranu w świecie

Dla oceny wolumenu zasobów złóż konwencjonalnych nośników energii pierwotnej, to jest węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego oraz rudy uranu, z reguły wykorzystuje się dwa pojęcia geologiczne: *reserves* oraz *resources*. *Reserves* to zasoby wydobywalne w sposób ekonomicznie uzasadniony; kategoria ta odpowiada polskiemu pojęciu „zasoby eksploatacyjne”. Kategoria *resources* oznacza zasoby geologiczne. W praktyce gospodarczej w wielu państwach zdecydowanie częściej operuje się pojęciem *reserves*. W Polsce, po wyczerpaniu złóż rud uranu w Sudetach w 1973 roku, nie udokumentowano zasobów rud uranu w kategorii *reserves*. Od 2015 roku prowadzone są prace badawcze, zmierzające do oceny wolumenu, struktury oraz parametrów jakościowych złóż rud uranu na terenie Podlasia [Annual 2017; Nuclear 2017; Pindór 2016a; Federal 2016; UNIDO 2017].

W tabeli 2 oraz na rysunku 2 przedstawiono wielkość oraz geograficzną strukturę eksploatacyjnych zasobów uranu w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku.

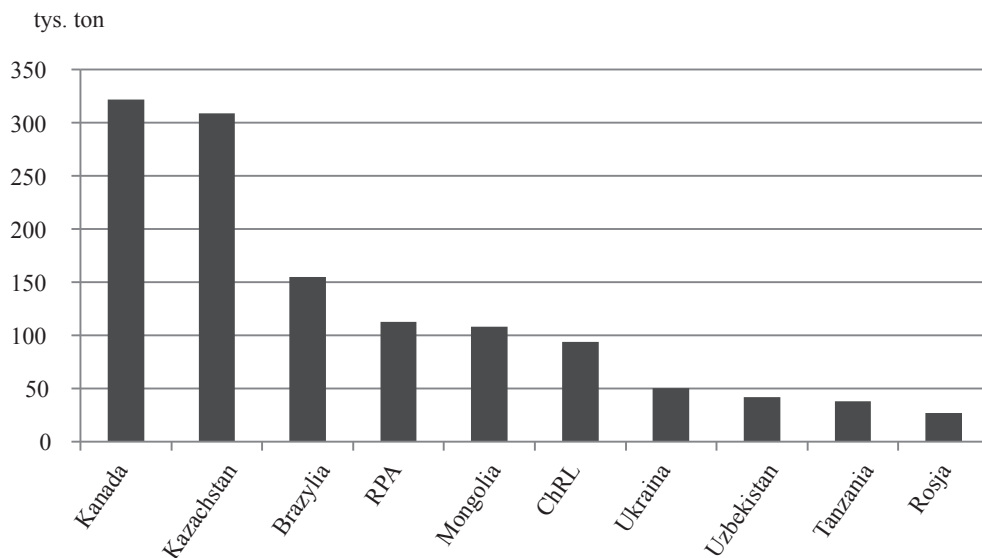
**Tabela 2.** Wielkość i struktura eksploatacyjnych zasobów uranu w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku

Lp.	Państwo	Tys. ton	Udział [%]	
			państwa	skumulowany
1	Kanada	322	24,3	24,3
2	Kazachstan	309	23,3	47,6
3	Brazylia	155	11,7	59,3
4	Republika Południowej Afryki	113	8,5	67,8
5	Mongolia	108	8,1	75,9
6	Chińska Republika Ludowa	94	7,1	83,0
7	Ukraina	50	3,8	86,8
8	Uzbekistan	42	3,2	90,0
9	Tanzania	38	2,9	92,8
10	Rosja	27	2,0	94,9
	Świat	1326	100,0	

Źródło: [Federal... 2016].

Analiza współczynników koncentracji zasobów złóż, stanowiących podstawę do oceny zagrożenia dostaw uranu na rynki międzynarodowe, w porównaniu z analogicznymi wskaźnikami dla pozostałych konwencjonalnych źródeł energii, wykazuje, że skumulowane współczynniki przestrzennej koncentracji złóż rud uranu w skali światowej są wyższe od analogicznych wskaźników dla ropy naftowej oraz gazu ziemnego, a porównywalne ze wskaźnikami dla węgla [Pindór 2016b].

Innym, istotnym czynnikiem zagrożenia dostaw surowców na rynki międzynarodowe jest potencjalne objęcie obszaru występowania zasobów analizowanych złóż działaniami militarnymi. W odniesieniu do geopolitycznej lokalizacji zasobów uranu można stwierdzić, że żadne z sześciu państw, w których udokumentowano łącznie 76% całkowitych światowych zasobów eksploatacyjnych, nie znajduje się aktualnie w strefie zagrożenia działaniami wojennymi.



**Rys. 2.** Wielkość eksploatacyjnych zasobów uranu w wybranych państwach w 2015 roku

Źródło: jak w tab. 2.

## 5. Wielkość i struktura produkcji uranu

Uran metaliczny pozyskiwany jest z dwóch źródeł: pierwsze stanowią złoża rud, a drugie – odpady, głównie z głowic nuklearnych. W 2015 roku dominowała produkcja z zasobów naturalnych, z udziałem przekraczającym 90% całego pozyskanego w tym roku uranu [World Nuclear 2016]. W artykule skoncentrowano uwagę na produkcji uranu metodami górniczymi, gdyż wolumen produkcji górniczej objęty jest wiarygodną statystyką na poziomie międzynarodowym.

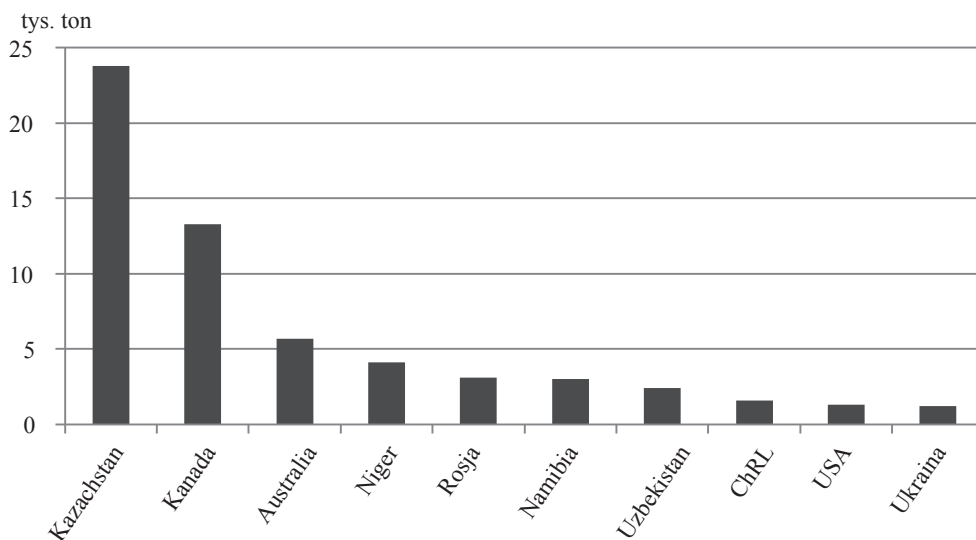
W tabeli 3 oraz na rys. 3 ukazano wielkość i strukturę produkcji uranu w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku.

**Tabela 3.** Wielkość i struktura produkcji uranu w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku

Lp.	Państwo	tys. ton	Udział [%]	
			państwa	Skumulowany
1	Kazachstan	23,8	39,3	39,3
2	Kanada	13,3	22,0	61,4
3	Australia	5,7	9,4	70,7
4	Niger	4,1	6,8	77,5
5	Rosja	3,1	5,1	82,6
6	Namibia	3	5,0	87,5
7	Uzbekistan	2,4	4,0	91,5
8	Chińska Republika Ludowa	1,6	2,6	94,1
9	Stany Zjednoczone	1,3	2,1	96,2
10	Ukraina	1,2	2,0	98,2
	Świat	60,5	100,0	

Źródło: [Federal... 2016].

Zdecydowanym liderem pozyskiwania uranu pierwotnego jest Kazachstan, wykorzystujący bardzo korzystne geologiczne warunki zalegania złóż oraz górniczo-techniczne warunki eksploatacji. Również w Kanadzie możliwe jest wydobywanie rudy uranu metodą zarówno podziemną, jak i odkrywkową. Z tych dwóch państw pochodzi obecnie ponad 60% uranu pierwotnego. Znaczne ilości uranu pozyskiwane są ponadto w kopalniach w Australii, Nigerze, Rosji, Namibii oraz Uzbekistanie [Federal 2016; World Nuclear 2016].

**Rys. 3.** Wielkość produkcji uranu w wybranych państwach w 2015 roku [tys. ton]

Źródło: jak w tab. 3.



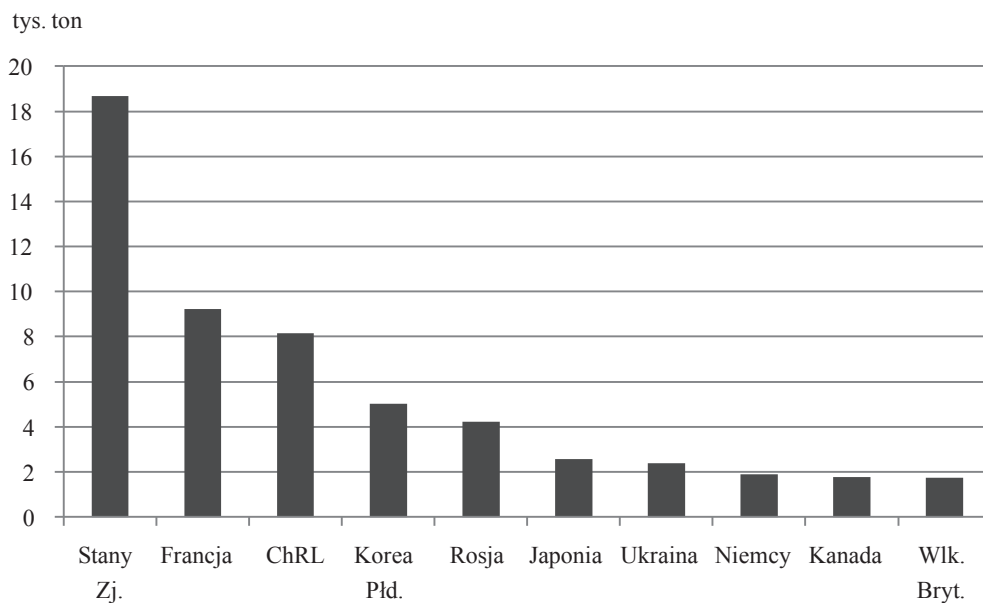
## 6. Wielkość i struktura zużycia uranu

Dane dotyczące wielkości i struktury gospodarczego wykorzystania uranu do generowania energii wtórnej w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku zawarto w tab. 4 oraz przedstawiono na rys. 4.

**Tabela 4.** Wielkość i struktura zużycia uranu w świecie i w wybranych państwach w 2015 roku

Lp.	Państwo	tys. ton	Udział [%]	
			państwa	skumulowany
1	Stany Zjednoczone	18,69	27,9	27,9
2	Francja	9,23	13,8	41,7
3	Chińska Republika Ludowa	8,16	12,2	53,9
4	Korea Południowa	5,02	7,5	61,5
5	Rosja	4,21	6,3	67,7
6	Japonia	2,55	3,8	71,6
7	Ukraina	2,37	3,5	75,1
8	Niemcy	1,89	2,8	77,9
9	Kanada	1,78	2,7	80,6
10	Wielka Brytania	1,74	2,6	83,2
	Świat	66,88	100,0	

Źródło: [Federal... 2016].



**Rys. 4.** Wielkość zużycia uranu w wybranych państwach w 2015 roku [tys. ton]

Źródło: jak w tab. 4.

Od początku przemysłowego wykorzystania uranu w energetyce głównym użytkownikiem tego nośnika energii pierwotnej były Stany Zjednoczone. W latach sześćdziesiątych minionego stulecia znaczne nakłady inwestycyjne na budowę elektrowni jądrowych przeznaczyła Francja, rozwijająca w tym czasie nuklearny potencjał dla celów militarnych.

Od przełomu wieków najwyższą dynamikę rozwoju energetyki jądrowej wykazuje ChRL. Gospodarka tego państwa była do niedawna głównym importerm technologii jądrowych, ale w ostatnich latach również w Chinach kontynentalnych podjęto produkcję oraz instalację reaktorów, w tym o dużej mocy. W Polsce radioaktywne źródła energii nie są jeszcze wykorzystywane do generowania energii wtórnej w skali przemysłowej [Annual... 2017; China... 2016; International Energy... 2017; World Energy... 2016].

Według stanu w dniu 1 stycznia 2018 roku na świecie było czynnych 450 reaktorów, w tym w Stanach Zjednoczonych 99, we Francji – 58, w Japonii – 42, w ChRL – 39 oraz w Rosji – 37 [Independent... 2018, International Atomic... 2017].

Łączna moc czynnych reaktorów wynosi 393 758 MW, a ranking państw odpowiada klasyfikacji według liczby reaktorów [Independent... 2018].

## 7. Perspektywy rozwoju energetyki jądrowej

Znaczenie wykorzystania energii jądrowej dla realizacji zasad rozwoju trwałego i zrównoważonego uzasadnia analizę możliwości zwiększenia udziału uranu w całkowitym zużyciu energii pierwotnej w skali światowej i regionalnej.

Analiza literatury przedmiotu wskazuje, że uwaga projektantów, szczególnie w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Japonii oraz Korei Południowej [Kulczyński 2017], skoncentrowana jest na poszukiwaniu nowych kierunków rozwoju elektrowni jądrowych, umożliwiających równoczesne osiągnięcie dwóch głównych celów, pozornie rozbieżnych:

- pierwszy kierunek polega na badaniu możliwości obniżenia jednostkowych kosztów wykorzystania technologii jądrowych dla generowania energii wtórnej dzięki wykorzystaniu reaktorów małej mocy, gdyż – w odróżnieniu od zdecydowanej większości sektorów przemysłu – wielka skala produkcji energii w energetyce jądrowej związana jest ze znacznym zwiększeniem nakładów kapitałowych na zakup i montaż bloków dużej mocy oraz podwyższeniem kosztów bieżących ubezpieczenia radykalnie zwiększonego poziomu ryzyka, wynikającego z konsekwencji ewentualnej awarii obiektu, zawierającego dużą ilość skoncentrowanego paliwa atomowego;
- kierunek alternatywny, a być może w przyszłości komplementarny do opcji reaktorów małej mocy, zbudowany jest na koncepcji podniesienia bezpieczeństwa użytkowania technologii jądrowych dzięki wykorzystaniu pasywnych systemów chłodzenia reaktorów mieszkanką stopionej soli zamiast wody, a opartych na paliwie w postaci nisko wzbogaconego uranu – jest to rozwiązanie bliskie poszu-

kiwanemu od dawna reaktorowi bezpiecznemu inherentnie (naturalnie, wewnętrznie).

Ważnym ogniwem w procedurze wprowadzania nowego obiektu technologicznego do praktyki gospodarczej jest uzyskanie zezwoleń odpowiedniego urzędu dozoru technicznego. Innowacyjne reaktory przechodzą pomyślnie badania wymaganego poziomu bezpieczeństwa w trakcie projektowanych awarii [Doerffer 2010]. Warto w tym miejscu podkreślić, że decyzja o budowie w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej będzie podjęta do końca 2018 roku i z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że w procedurze wyboru technologii i skali działalności kluczowym uwarunkowaniem będzie bezpieczeństwo użytkowania reaktorów nuklearnych, a funkcją celu – efektywność ekonomiczna generowania energii wtórnej.

Niezależnie od programu inwestycji w energetyce systemowej prowadzone są badania naukowe oraz analizy efektywności implementowania w Polsce wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych jako źródła ciepła przemysłowego, szczególnie w branży chemicznej. Reaktory te są zaliczane do najnowszej IV generacji technologii nuklearnych, umożliwiających istotne zmniejszenie zużycia gazu ziemnego w przemyśle chemicznym i obniżenie emisji gazów cieplarnianych, co zasadniczo podnosi poziom zarówno trwałości, jak i zrównowżenia rozwoju. W reaktorach tego typu wraz ze wzrostem temperatury reakcja łańcuchowa zrywa się samoistnie i – ze względu na konstrukcję oraz specyficzny sposób przygotowania paliwa nuklearnego – nie ma technicznej możliwości stopienia się rdzenia reaktora [Kulczyński 2017].

Należy podkreślić, że w strategii rozwoju Polski [Ministerstwo Rozwoju 2017] problematyce reindustrializacji, opartej na technologiach innowacyjnych, nadano kluczowe znaczenie.

## 8. Zakończenie

Kluczowy wniosek z przeprowadzonych analiz dotyczy realnej perspektywy wdrożenia w energetyce jądrowej rozwiązania opartego na wykorzystaniu technologii przełomowych. Seryjna produkcja – w państwach o najwyższym poziomie zaawansowania cywilizacyjnego oraz o wysokim udziale wykorzystania uranu w całkowitym zużyciu nośników energii pierwotnej innowacyjnych reaktorów małej mocy z wykorzystaniem pasywnych systemów chłodzenia mieszankami soli, umożliwi w najbliższych latach zasadnicze przekształcenie struktury segmentu generowania energii wtórnej ze źródeł promieniotwórczych. Funkcją celu tego scenariusza restrukturyzacji jest równoczesne podniesienie efektywności technologii jądrowych oraz istotne obniżenie bariery kapitałowej, wynikającej z konieczności zgromadzenia znacznych środków na cele inwestycyjne, przy relatywnie bardzo długim okresie zwrotu poniesionych nakładów. Systematycznie narasta również presja stosowania kosztownych procedur ochronnych w przypadku wystąpienia awarii w bloku jądrowym, zawierającym dużą ilość promieniotwórczego paliwa. Hybrydowy projekt umożliwi oparcie bezpieczeństwa generowania energii wtórnej w reaktorze

nuklearnym na podstawach wynikających wprost z praw fizyki, co znacznie obniża poziom konsekwencji błędu ludzkiego lub celowego destrukcyjnego działania człowieka.

Innowacyjne reaktory małej mocy z wykorzystaniem pasywnych systemów chłodzenia można zaliczyć do technologii przełomowych. Wykorzystanie reaktorów wysokotemperaturowych w Polsce umożliwiłoby, z jednej strony, zmniejszenie importu gazu ziemnego, a z drugiej, zwiększenie dostępnej emisji ekwiwalentu dwutlenku węgla dla innych źródeł wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej – dzięki wprowadzeniu do krajowego systemu energetyki zawodowej technologii reaktorów wysokotemperaturowych, praktycznie niewywołującej emisji gazów cieplarnianych.

Dywersyfikacja wykorzystania nośników energii pierwotnej oraz technologii pozyskiwania energii wtórnej znacznie podniosłaby stopień zrównoważenia sektora generowania energii oraz poziom bezpieczeństwa energetycznego gospodarki w Polsce.

Istotną barierą podjęcia programu budowy od podstaw sektora systemowej energetyki jądrowej w Polsce jest brak kadry dysponującej doświadczeniem w zakresie finansowania pilotażowych przedsięwzięć rozwojowych o wielkiej wartości kosztorysowej i bardzo długim okresie zwrotu zaangażowanego kapitału, to znaczy o wysokim stopniu ryzyka inwestycyjnego.

## Literatura

- Annual Energy Outlook, 2017, U. S. Energy Information Administration.  
British Petroleum Statistical Review of World Energy, 2017.  
China Energy Report, 2016.  
Doerffer S., 2010, *Wybrane projektowe awarie reaktywnościowe w reaktorach LWR i CANDU*, Postępy Techniki Jądrowej, vol. 53, z. 4.  
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reserves, Resources and Availability of Energy Resources. Annual Report, 2016, Hannover.  
Independent Assessment of Nuclear Developments in the World, January 2018, World Nuclear Industry Status as of 1 January 2018.  
International Atomic Energy Agency, 2017, Power Plants around the World.  
International Energy Agency, 2016, World Energy Outlook.  
International Energy Agency, 2017, Key World Energy Statistics.  
Kemeny J.G. Chairman, 1979, *Report of the President's Commission on the Accident at the Three Mile Island*, Washington DC.  
Kulczyński D.W., 2017, *W poszukiwaniu seryjnie produkowanego reaktora XXI wieku*, Postępy Techniki Jądrowej, vol. 60, z. 4.  
Ministerstwo Rozwoju, 2017, Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020, z perspektywą do 2030 r.  
Nuclear Engineering International, 1986, 2000, 2010-2017.

- OECD, 2016, Uranium, 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency.
- OECD, World Nuclear Association, 2017, World Nuclear Power Reactions Database.
- Pindór T., 2016a, Długookresowe tendencje zmian zużycia energii pierwotnej w świecie, *Przegląd Górniczy*, t. 72, nr 8.
- Pindór T., 2016b, *Zasoby nieodnawialnej energii pierwotnej kluczowym czynnikiem bezpieczeństwa energetycznego na poziomie globalnym i regionalnym*, *Przegląd Naukowo-Metodyczny Edukacja dla Bezpieczeństwa*, Wyższa Szkoła Bezpieczeństwa w Poznaniu, r. 9, nr 3.
- Strupczewski A., 1990, *Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- UNIDO, 2016, Industrial Development Report.
- United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Public Affairs, 1995, *The Accident at the Three Mile Island Fact Sheet*, Washington DC.
- World Energy Council Report, 1987, 2000, 2013, 2016.
- World Nuclear Association, 2016, Nuclear Power Reactions.
- World Nuclear Association, 2016, World Uranium Mining Review.