

## REAKTORY JĄDROWE MAŁEJ I ŚREDNIEJ MOCY

dr inż. Marcin Jaskólski / Politechnika Gdańska

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach na świecie, w szczególności w państwach członkowskich Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA, ang. IAEA – *International Atomic Energy Agency*), obserwuje się wznowienie zainteresowania rozwojem i zastosowaniem reaktorów jądrowych małej i średniej mocy [1]. Jest to kierunek odwrotny do obieranego dotychczas przez dostawców skomercjalizowanych reaktorów energetycznych, których moce znacząco przekroczyły barierę 1000 MW. Przykładowo reaktor EPR (ang. *Evolutionary Power Reactor, European Pressurized Reactor*), oferowany przez francuską firmę Areva, osiąga moc elektryczną 1650 MW.

MAEA definiuje reaktory małej mocy (ang. *small reactors*) jako te o mocy elektrycznej zainstalowanej do 300 MW, a reaktory średniej mocy (*medium reactors*) jako te o mocy zainstalowanej elektrycznej od 300 MW do 700 MW [2]. Autor zwraca uwagę na to, że w języku angielskim słowo „reactor” oznacza zarówno blok energetyczny z reaktorem jądrowym, jak i sam reaktor jądrowy. W dosłownym tłumaczeniu *Small and Medium Reactors* (SMR) oznacza małe i średnie reaktory, co nie jest przypadkowe, gdyż z reguły mają one, oprócz mniejszej mocy zainstalowanej, mniejsze gabaryty.

### 2. CECHY MAŁYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH

Stosując definicję MAEA, 139 z 442 reaktorów energetycznych (stan na rok 2008) jest uznawanych za małe i średnie (SMR) [2]. Wynika to z faktu, że na początku ery technologii nuklearnej energetyki uzyskiwano mniejsze moce reaktorów. Przykładowo pierwszy reaktor w USA – Shippingport miał moc 60 MW. Stanowiły one etap rozwoju w kierunku dużych reaktorów energetycznych, których moc obecnie przekracza 1000 MW. W ostatnich latach wzrosło na świecie zainteresowanie reaktorami jądrowymi małej mocy, dla których ta mała moc jest uzyskiwana (projektowana) intencjonalnie. W języku angielskim znaleźć można dla nich określenie *Deliberately Small Reactors* (DSR).

Zwykle do tej kategorii zalicza się następujące rodzaje reaktorów:

- a) badawcze (*research*)
- b) testowe (*test*)
- c) prototypowe i demonstracyjne (*prototype & demonstration*)
- d) napędowe (*propulsion*) [2].

Nie one są przedmiotem zainteresowania elektroenergetyki, a te, które oddają ciepło do czynnika chłodzącego w celu wytwarzania energii elektrycznej i/lub ciepła sieciowego/procesowego. Wiele krajów zajmuje

#### Streszczenie

Ostatnie lata przyniosły wzrost zainteresowania reaktorami jądrowymi małej i średniej mocy (SMR – ang. *Small and Medium Reactors*), których moce nie przekraczają 700 MW, jako rozwiązania alternatywnego dla dużych skomercjalizowanych bloków jądrowych. Obecnie rozwijane reaktory małych i średnich mocy mogą konkurować z dużymi reaktorami z uwagi na zalety w postaci:

- 1) mniejszej konstrukcji pozwalającej na produkcję elementów reaktora w nadzorowanych fabrykach;
- 2) mniejszej ilości ciepła do wyprowadzenia z obiegu wtórnego, ułatwiającej wybór lokalizacji;
- 3) mniejszego ryzyka inwestycyjnego i finansowego;

4) poprawy stabilności systemu elektroenergetycznego.

Najbardziej zaawansowanymi projektami małych reaktorów jądrowych wydają się lekkowodne reaktory o zintegrowanej budowie obiegu pierwotnego, do których należą projekty Westinghouse IRIS i NuScale oraz reaktor Toshiba 4S na neutrony prędkie, chłodzony sodem. Ten ostatni jest przewidywany do instalacji w Galenie na Alasce. Podstawowymi barierami rozwoju technologii małych reaktorów są: zbyt duża liczba konkurujących ze sobą projektów, obawa przed nowymi technologiami reaktorów oraz postępowanie małych jednostek przez pryzmat ekonomii skali.

się aktualnie badaniami i rozwojem DSR. Należą do nich m.in.: Rosja, Japonia, Stany Zjednoczone, Indie, Chiny, Argentyna, Korea Południowa.

Istnieje wiele aspektów, na które należy zwrócić uwagę, porównując małe reaktory jądrowe z dużymi reaktorami (ang. LR – *Large Reactors*). Te aspekty omawiano w pracach [1, 2–6], a poniżej dokonano ich syntezy:

- **Wytwarzanie elementów konstrukcji reaktora**

Komponenty reaktora o fizycznie mniejszych rozmiarach stwarzają większe możliwości odnośnie ich produkcji, gdyż dla nowoczesnych reaktorów dużej mocy jedynie kilku producentów na świecie jest w stanie wykonać stalowe elementy dużych rozmiarów. Sytuacja ta może się zmienić i liczba dostawców się zwiększy, ale będzie to wymagało dużych nakładów finansowych i zajmie dużo czasu. Ponadto dostawcami elementów kutych reaktora małej mocy mogą być firmy krajowe.

- **Transport elementów konstrukcji reaktora**

Zastosowanie ogromnych zbiorników w reaktorach lekkowodnych (LWR – *Light Water Reactors*) ogranicza wybór lokalizacji głównie do terenów przy brzegu morza lub wzdłuż dużych rzek. Małe reaktory stwarzają możliwość transportu kolejowego, drogowego, rzeczno (barki), gdyż ich komponenty są znacznie lżejsze.

- **Proces budowy reaktora**

Znacząca ilość prac związanych z budową bloku z reaktorem jądrowym wykonywana jest na miejscu jego późniejszej eksploatacji. Możliwość wytwarzania wielu elementów małych reaktorów w fabrykach, które podlegają ścisłej kontroli, oraz montowanie (a nie wytwarzanie) ich na placu budowy nie tylko zmniejsza niepewność związaną z kosztem budowy i jej harmonogramem, ale także zwiększa niezawodność i bezpieczeństwo pracy reaktora.

- **Ilość radionuklidów wytwarzanych w reakcji rozszczepienia w reaktorze**

Ilość radionuklidów jest proporcjonalna do mocy reaktora, stąd mniejsze ich ilości w reaktorach małych niż w reaktorach dużej mocy. Przejawia się to możliwością zmniejszenia osłon, wielkości zajmowanego terenu oraz wielkości strefy planowania awaryjnego (w USA: EPZ – *Emergency Planning Zone* – strefa o promieniu 10 mil wokół elektrowni).

- **Podatność na wypadki**

Eliminacja układów wtryskujących wodę do reaktora w stanach awaryjnych (np. przerwanie rurociągu łączącego zbiornik reaktora z wytwornicą pary) spowoduje zmniejszenie kosztu, ale wymaga zintegrowanej konstrukcji zbiornika reaktora, zawierającej wytwornicę pary i stabilizator ciśnienia. Takie podejście stosowane jest w intencjonalnie małych reaktorach jądrowych. Ma ono zaletę w postaci eliminacji rurociągów o dużych średnicach, przez które przepływa woda chłodząca obiegu pierwotnego.

- **Usuwanie ciepła powyłączeniowego (ang. *decay heat*)**

Małe reaktory, w porównaniu z dużymi, są w stanie w bardziej efektywny sposób odprowadzać ciepło w przypadku wyłączenia reaktora. Dzieje się tak z następujących powodów:

- a) mniejsza moc reaktora powoduje mniejszą moc cieplną powyłączeniową (ang. *decay power*)
- b) mniejsza objętość rdzenia reaktora umożliwia bardziej efektywne przewodzenie ciepła
- c) usuwanie ciepła z zewnętrznej powierzchni zbiornika jest bardziej efektywne (mimo że powierzchnia oddawania ciepła jest mniejsza) – objętość rdzenia reaktora ma większy wpływ na ilość oddawanego ciepła.

- **Wybór lokalizacji reaktora**

Zmniejszona ilość radionuklidów w małych i średnich reaktorach przejawia się ograniczeniem wielkości zajmowanego terenu i obszaru tzw. strefy planowania awaryjnego. To stwarza możliwości w postaci zastosowania technologii małych reaktorów do produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu z ciepłem, redukując straty przesyłu ciepła na duże odległości, a ograniczenie strefy planowania awaryjnego pozwala na umiejscowienie reaktora bliżej skupisk ludności. Lżejsza i mniejsza wyspa nuklearna w przypadku małych reaktorów umożliwia posadowienie jej na izolatorach sejsmicznych (ang. *seismic isolators*), czego rezultatem jest większa standaryzacja projektu reaktora oraz zmniejszona podatność na skutki trzęsienia ziemi.

- **Charakterystyka zapotrzebowania na moc cieplną**

Mniejsze reaktory mają większą elastyczność względem wymagań odbiorców, w szczególności jeśli weźmiemy pod uwagę wykorzystanie ciepła procesowego z reaktorów. Nadmiar mocy cieplnej produkowanej przez reaktor musi znaleźć odbiorcę, aby instalacja była ekonomicznie efektywna.



- **Użycie wody do chłodzenia obiegu wtórnego**

W związku z koniecznością oddawania dużej ilości ciepła do otoczenia przez elektrownie, w tym w obiegu otwartym do zbiorników wodnych, powstaje problem lokalizacji takiej elektrowni. W przypadku elektrowni jądrowych problem ten narasta, gdyż z uwagi na niższą sprawność obiegu cieplnego, elektrownia ta oddaje większą ilość ciepła do otoczenia (woda, powietrze) niż elektrownia klasyczna węglowa, przy założeniu jednakowego efektu energetycznego. W przypadku ograniczonych możliwości lokalizacyjnych (zbyt mała powierzchnia zbiornika wodnego lub zbyt niski przepływ wody), związanych z chłodzeniem elektrowni wodą, alternatywą mogą być reaktory małych mocy, które tej wody do chłodzenia potrzebują w znacznie mniejszych ilościach w przeliczeniu na blok energetyczny.

- **Wzrost zapotrzebowania na moc w lokalnych sieciach elektroenergetycznych**

Mniejsze elektrownie jądrowe pozwolą na łatwiejsze dopasowanie się do stopniowych wzrostów zapotrzebowania mocy charakteryzujących się niską dynamiką, co w pewien sposób przekłada się na ekonomikę i elastyczną charakterystykę pracy reaktorów.

- **Całkowite nakłady na budowę elektrowni**

Zwykle głównym wskaźnikiem ekonomicznym jest jednostkowy nakład inwestycyjny, odniesiony do mocy elektrycznej zainstalowanej elektrowni. Nie mniej ważnym kryterium, jeśli nie ważniejszym, jest jednak suma całkowitych nakładów inwestycyjnych. Jest to w szczególności istotne dla klientów o ograniczonych zdolnościach finansowania bloków jądrowych, kosztujących już dziś nawet ok. 5 mlrd euro. Małe bloki łatwiej sfinansować mniejszym klientom, np. biedniejszym państwom lub mniejszym zakładom energetycznym.

- **Ekonomia skali**

Przeważa przekonanie, że większe bloki jądrowe są tańsze w przeliczeniu na jednostkę mocy z uwagi na efekt ekonomii skali. Znaczenie ekonomii skali może być jednak zmniejszone poprzez: modularność budowy, produkcję ustandaryzowanych elementów w fabrykach, uczenie się poprzez wykonywanie (ang. *process learning, learning by doing*), uproszczenie struktury reaktora, kompaktową budowę, itp. Ponadto ekonomia skali mogłaby mieć zastosowanie do porównania reaktorów o takiej samej strukturze, a wszystko wskazuje na to, że reaktory dużej mocy i reaktory małej i średniej mocy będą znacząco różnić się budową.

- **Ryzyko inwestycyjne**

W przypadku projektów inwestycyjnych, oprócz wskaźników ekonomicznych, bardzo ważne są przepływy gotówkowe. Z tego punktu widzenia korzystniejsze może okazać się budowanie czterech mniejszych bloków jądrowych niż jednego dużego (o tej samej mocy zainstalowanej, jaką mają cztery małe bloki), zachowując taki porządek, że kolejny blok powstaje po ukończeniu budowy poprzedniego. Wówczas budowa kolejnego bloku jest częściowo finansowana przez przychody wynikające z oddania do użytku poprzedniego bloku. Takie podejście może znacząco zmniejszyć ryzyko finansowe inwestycji. Poza tym budowa mniejszych bloków jest mniej podatna na opóźnienia w realizacji, obarczające ryzykiem inwestycję. Przewiduje się, że budowa bloku z małym reaktorem trwać będzie trzy lata, zaś z dużym reaktorem pięć lat [5]. Inną ważną cechą takiego podejścia jest zwiększone przystosowanie się małych reaktorów do zmieniających się uwarunkowań rynkowych.

- **Ograniczenia systemu elektroenergetycznego**

Reaktory małej i średniej mocy mogą być zastosowane w sieciach elektroenergetycznych o ograniczonej mocy zainstalowanej źródeł wytwórczych, w których odchylenia bilansu mocy czynnej, przekraczające 10% mocy zainstalowanej źródeł przyłączonych do sieci, mogą zagrozić pracy i stabilności systemu elektroenergetycznego. Mogą także znaleźć zastosowanie w lokalizacjach znajdujących się z dala od cywilizacji, w celu uniknięcia budowy długich elektroenergetycznych linii przesyłowych. Wiele systemów elektroenergetycznych nie jest przystosowanych do przyłączenia bloków energetycznych o mocy przekraczającej 1000 MW. Mniejsze reaktory jądrowe mogą być korzystniejsze w systemach z dużą generacją opartą na odnawialnych zasobach energii, w szczególności elektrowniach wiatrowych, w których konieczne będzie nadążanie za zmianami obciążenia w systemie elektroenergetycznym. Większą elastyczność w tym zakresie dają małe reaktory, również w perspektywie rozwoju elektroenergetyki w kierunku sieci inteligentnych (ang. *smart grids*).



Powyższa charakterystyka pokazuje, że w pewnych warunkach budowa małych reaktorów jądrowych będzie korzystniejsza niż budowa reaktorów dużej mocy. Pozostaje jednak do przezwyciężenia wiele barier natury technologicznej, społecznej, ekonomicznej itp. Przezwyciężenie barier technicznych jest przedmiotem badań prowadzonych w ramach licznych projektów rozwojowo-demonstracyjnych.

### 3. WYBRANE PROJEKTY JĄDROWYCH REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH MAŁEJ I ŚREDNIEJ MOCY

Jak wynika z raportu MAEA, istnieje ponad 60 projektów reaktorów jądrowych małej i średniej mocy, których zestawienie zawarto w [1]. To stwarza pewne przeszkody i zagrożenia dla rozwoju technologii z uwagi na rozproszenie używanych zasobów oraz brak standaryzacji. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane projekty małych i średnich reaktorów, głównie te, dla których moment komercjalizacji wydaje się być najbliższy. Zestawienie tych projektów zaprezentowano w tab. 1. Poniżej omówiono bardziej szczegółowo wybrane projekty reaktorów.

Tab. 1. Zestawienie wybranych projektów małych i średnich reaktorów jądrowych. Opracowano na podstawie [2, 3]

| Lp. | Wyszczególnienie                       | IRIS            | NuScale         | 4S         |
|-----|--|-----------------|-----------------|------------|
| 1   | Projektant                             | Westinghouse    | NuScale         | Toshiba    |
| 2   | Chłodziwo w obiegu pierwotnym          | lekka woda      | lekka woda      | sód        |
| 3   | Cyrkulacja chłodziwa                   | wymuszona       | naturalna       | wymuszona  |
| 4   | Konfiguracja obiegu pierwotnego        | zintegrowana    | zintegrowana    | basen      |
| 5   | Moc elektryczna [MW]                   | 335             | 45              | 10 (do 50) |
| 6   | Temperatura na wylocie z reaktora [°C] | 330             | 300             | 485        |
| 7   | Konfiguracja obiegu wtórnego           | pośredni        | pośredni        | pośredni   |
| 8   | Obieg ciepły                           | Rankine'a       | Rankine'a       | Rankine'a  |
| 9   | Średnica zbiornika reaktora [m]        | 6,2             | 2,7             | 3,5        |
| 10  | Wysokość zbiornika reaktora [m]        | 22,2            | 14,0            | 24,0       |
| 11  | Typ paliwa                             | UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub> | U-Zr       |
| 12  | Stożenie wzbogacenia paliwa [%]        | <5              | <5              | 18         |
| 13  | Długość kampanii paliwowej [a]         | 3,5             | 2,5             | 10-30      |
| 14  | Planowane uruchomienie                 | 2015            | 2015            | 2013       |

International Reactor Innovative and Secure (IRIS) i NuScale należą do grupy intencjonalnie małych reaktorów o zintegrowanym obiegu pierwotnym (ang. *Integral Primary System Reactor – IPSR*). Projekt IRIS jest rozwijany przez Westinghouse i opiera się na znanej technologii reaktorów lekkowodnych, co pozwoli w krótkim czasie doprowadzić do powstania pierwszej jednostki tego typu (ang. FOAK – *first-of-a-kind*). Główne cechy tego układu to [2]:

- Możliwość uzyskania mocy zainstalowanej w zakresie od 100 do 350 MW. Moc typowej jednostki to 335 MW (moc cieplna reaktora 1000 MJ/s). Reaktor charakteryzuje się modułarną budową
- Wszystkie komponenty obiegu pierwotnego (rdzeń, pręty sterujące, mechanizmy napędzające, wytwornice pary, pompy chłodziwa pierwotnego, stabilizator ciśnienia) są zintegrowane w pojedynczym zbiorniku reaktora
- Rdzeń reaktora składa się z 89 kaset (każda po 289 prętów) znanych z reaktorów wodnych ciśnieniowych (PWR), zawierających paliwo w postaci tlenku uranu UO<sub>2</sub> o stopniu wzbogacenia ok. 5%. Przewidywany okres kampanii paliwowej wynosi 3,5 roku, a stopień wypalenia paliwa 50 000 MWd/t
- Sterowanie reaktywnością realizowane jest za pomocą absorberów neutronów (ang. *solid burnable absorbers*) i prętów sterujących oraz przy użyciu rozpuszczalnego boru.

Z kolei NuScale znajduje się na przeciwnym biegunie, jeżeli chodzi o zakres mocy reaktorów z grupy IPSR. Jego moc zainstalowana jest zaprojektowana na 45 MW. Ideą producenta technologii jest zabudowywanie instalacji o dużej liczbie bloków, np. 10, których łączna moc wyniesie 450 MW. Posiada on podobne cechy do IRIS. Zamiast 89 kaset (IRIS) w NuScale zastosowano 24 kasety, choć tu rozważa się wydłużenie kampanii paliwowej z 30 do 60 miesięcy, przy użyciu paliwa o stopniu wzbogacenia równym 8%. Istotną różnicą jest zastosowanie naturalnej cyrkulacji chłodziwa w zbiorniku reaktora [2].



Stosunkowo ciekawym projektem, również ze względu na przewidywany niedługi czas jego zakończenia, wydaje się reaktor 4S (ang. *Super Safe Small and Simple*), rozwijany przez Toshiba Corp. i Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) w Japonii. Reaktor 4S jest reaktorem jądrowym małej mocy na neutrony prędkie (ang. *fast neutron reactor*), chłodzonym sodem. Zastosowano w nim pasywne układy bezpieczeństwa, które pozwalają na poprawę ich ekonomiki [3]. Pierwszym planowanym miejscem instalacji jest Galena na Alasce. Reaktor planowany do instalacji na Alasce ma mieć moc elektryczną zainstalowaną równą 10 MW (moc cieplna reaktora 30 MJ/s). Rozważa się jednakże możliwość zwiększenia mocy reaktora w kolejnych instalacjach do 50 MW. Paliwem ma być stop cyrkonu i uranu (U-Zr). Pośredni układ, w którym zastosowano sód jako czynnik chłodzący, odbiera ciepło z reaktora i dostarcza je do wytwornicy pary w obiegu wtórnym – obiegu cieplnym parowym Rankine’a [2].

Podstawowe założenia projektowe reaktora 4S to [3]:

- Brak konieczności uzupełniania paliwa przez ponad dziesięć lat (docelowo przez cały okres eksploatacji równy trzydzieści lat, o ile będzie to możliwe)
- Proste sterowanie wypalaniem paliwa bez prętów sterujących i mechanizmów napędowych tych prętów (ang. *control rod driving mechanism – CRDM*)
- Minimalizacja urządzeń sterujących z układu reaktora
- Praca w trybie nadążania za obciążeniem w systemie elektroenergetycznym (ang. *load follow*) bez potrzeby działania układu sterowania reaktorem
- Minimalizacja remontów i inspekcji komponentów reaktora
- Ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności
- System bezpieczeństwa niezależny od układów awaryjnego zasilania i układu usuwania ciepła powyłączeniowego (układ ten jest pasywny i nie potrzebuje zasilania z układu potrzeb własnych elektrowni).

Bardzo interesującą cechą, a zarazem kluczową nowinką technologiczną reaktora 4S jest jego rdzeń, w którym paliwo jest wykonane z metalu, a jego wypalanie jest sterowane za pomocą reflektora neutronów, pozwalającego na oszczędną gospodarkę neutronami w paliwie.

#### 4. PODSUMOWANIE

Małe i średnie reaktory (SMR) będą konkurencyjne względem dużych reaktorów, jeżeli osiągną odpowiednią dojrzałość technologiczną. Nowoczesna flota dużych reaktorów charakteryzuje się wysokimi standardami bezpieczeństwa i zdefiniuje w ten sposób rynek ofert technologii. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że problemem może być ekonomia skali. Małe reaktory, za sprawą ich zintegrowanej modularnej budowy, będą musiały potwierdzić swoją konkurencyjność. Konieczne również będzie opracowanie wyposażenia towarzyszącego, układów automatyki i układów pomiarowych (przykładowo wewnątrz zbiornika zawierającego zintegrowany obieg pierwotny reaktora) dla układów reaktorów małej i średniej mocy [2].

Do pozatechnicznych wyzwań należeć będą [2]:

- Zbyt duża liczba konkurujących ze sobą projektów SMR
- Rozpowszechnione postrzeganie dużych, scentralizowanych elektrowni jądrowych jako lepszego rozwiązania w związku z tym, że uważane są za obiekty wysokiego ryzyka i ich centralizacja w oddalonych od dużych miast lokalizacjach jest pożądana
- Wysokie nakłady inwestycyjne i obawy związane z katastrofami w elektrowniach jądrowych oraz obawy powstałe na początku ery technologii nuklearnej stworzyły swoisty strach przed projektami określanymi jako pierwsze w swoim rodzaju (ang. *First Of A Kind – FOAK*)
- Wydłużona długość kampanii paliwowej wymagać będzie bieżącego monitoringu, diagnostyki i prognoz stanu technicznego reaktora
- Zastosowanie reaktorów do kogenreacji lub poligeneracji wymagać będzie opracowania układów automatyki przystosowanych do bilansowania zapotrzebowania na dwa lub więcej produktów oferowanych przez blok z reaktorem.

Osobną kwestią pozostaje gospodarka odpadami powstającymi podczas bieżącej produkcji lub pozostającymi po upływie okresu użytkowania reaktora, jak dla reaktora 4S, w którym nie uzupełnia się paliwa w całym okresie jego technologicznego życia. Obecnie oferowane reaktory komercyjne dużej mocy są zaprojektowane na sześćdziesięcioletni okres użytkowania, choć z pewnością operatorzy reaktorów dążyć będą do wydłużenia ich



życia. Małe i średnie reaktory w tej chwili projektowane są na trzydzieści lat użytkowania. Po okresie użytkowania elektrowni z reaktorem jądrowym należy ją zamknąć i zlikwidować, ponosząc znaczące nakłady inwestycyjne.

W świetle dużego zapotrzebowania na nowe moce wytwórcze oraz możliwości, a wręcz konieczności budowy rozproszonych źródeł generacji, opartych na odnawialnych zasobach energii lub gazie ziemnym, wydaje się mało prawdopodobne, aby ta technologia, pomimo jej zalet, została zaadaptowana do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego w najbliższych dwóch dekadach. Z pewnością może ona znaleźć zastosowanie w miejscach takich, jak Galena na Alasce, które są oddalone od cywilizacji. Czas pokaże, czy możliwe będzie znaczące uproszczenie budowy reaktorów w taki sposób, aby nie zagrażały bezpieczeństwu ludności i czy społeczeństwo zaakceptuje rozproszone reaktory jądrowe, mając alternatywę w postaci mniejszej liczby tego typu źródeł, ale o większej zainstalowanej mocy. Przewyciężenie bariery ekonomii skali dałoby powód do alternatywnego spojrzenia na budowę elektrowni z blokami dużej mocy – budowa elektrowni o tej samej mocy, ale o liczbie bloków odpowiednio większej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kuznetsov V., IAEA activities for innovative Small and Medium sized Reactors (SMRs), *Progress in Nuclear Energy*, 47, no. 1–4, 2005, pp. 61–73.
2. Ingersoll D.T., Deliberately small reactors and the second nuclear era, *Progress in Nuclear Energy*, 51, 2009, pp. 589–603.
3. Ueda N., Kinoshita I., Minato A., Shigeo K., Yokoyama T., Maruyama S., Sodium Cooled Small Fast Long-Life Reactor “4S”, *Progress in Nuclear Energy*, 47, no. 1–4, 2005, pp. 222–230.
4. Carelli M., Garrone P., Locatelli G., Mancini M., Mycoff C., Trucco P., Ricotta M.E., Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors, *Progress in Nuclear Energy*, 52, 2010, pp. 403–414.
5. Shropshire D., Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets, *Progress in Nuclear Energy*, 53, 2011, pp. 299–307.
6. Locatelli G., Mancini M., The role of the reactor size for an investment in the nuclear sector: An evaluation of not-financial parameters, *Progress in Nuclear Energy*, 53, 2011, pp. 212–222.