

Wskaźniki poziomu gotowości technologicznej (TRL) a oferowane obecnie technologie jądrowe

Technology Readiness Level (TRL) indicators, and the nuclear technologies currently being offered

Andrzej G. Chmielewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Streszczenie: W pracy prezentowany jest proces oceny stopnia rozwoju technologii lub produktu oparty na skali poziomu gotowości technologicznej (TRL) w rozumieniu zarówno instytucji działających w kraju, w którym ta skala powstała, jak również w Unii Europejskiej i Polsce. Przedstawiono też przykład praktyczny działania polegający na wdrażaniu w energetyce skomplikowanej technologii radiacyjnej, co jest dowodem na to, że jest on analogiczny do stosowanych procedur powiększania skali w realizacji projektów inżynierskich. W końcowej części artykułu przedstawiono rezultaty oceny z wykorzystaniem TRL postępów prac w zakresie rozwoju nowych technologii jądrowych, jakimi są reaktory SMR.

Słowa kluczowe: Poziom gotowości technologicznej, technologie radiacyjne, SMR.

Abstract: The paper presents the process of assessing the degree of development of a technology or product based on the Technology Readiness Level (TRL) scale in the understanding of both institutions operating in the country where this scale was created, as well as in the European Union and Poland. A practical example of the implementation of complex radiation technology in the energy sector is also presented, which proves that it is analogous to the procedures used to scale up in the implementation of engineering projects. In the final part of the paper, the results of the assessment of the progress in the development of new nuclear technologies, such as SMR reactors, were presented with the use of TRL.

Keywords: Technology Readiness Level, radiation technologies, SMRs.

1. Wprowadzenie

Proces oparty na skali TRL (*Technology Readiness Level*) służy do ilościowej i jakościowej oceny dojrzałości danej technologii. Proces TRL został opracowany i z powodzeniem jest wykorzystywany przez amerykański Departament Obrony DoD (*Department of Defence*) do opracowywania i wdrażania nowych technologii oraz systemów do zastosowań obronnych. W latach 80. ubiegłego wieku NASA z powodzeniem wykorzystwała proces TRL do opracowania i wdrożenia nowych systemów do zastosowań w kosmosie. TRL, czyli poziomy gotowości technologicznej, służą do definiowania stopnia zaawansowania technologii oraz umożliwiają dokonanie porównania stanu zaawansowania prac nad technologiami. Wprowadzenie nowych technologii z laboratorium na rynek wymaga prze-

ścia przez kontinuum badań, rozwoju, demonstracji i wdrażania RDDD (*Research, Development, Demonstration & Deployment*). Wykorzystuje to z powodzeniem Biuro ds. Transformacji Technologicznych Departamentu Energii (DoE), które ma za zadanie nadzorować działania komercjalizacyjne w całym departamencie i poza nim. Aby wdrożyć nowe rozwiązania na skalę komercyjną, należy pokonać przeszkody zarówno techniczne, jak i związane z ich zaadaptowaniem przez ekosystem. Zarządzanie nowoczesnymi portfelami technologii można usprawnić, uzupełniając szeroko stosowane ramy poziomu gotowości technologicznej. Jednak wykonalność techniczna to tylko połowa sukcesu, jeśli chodzi o wdrożenie produktu na skalę komercyjną. Inne kwestie związane z przyjęciem – takie jak dopasowanie produktu do rynku, popyt, łańcuch dostaw, ryzyko regulacyjne i dostępność siły roboczej –

odgrywają rolę w prawdopodobieństwie pomyślnego wdrożenia technologii.

Konieczność stworzenia takiej skali wynika z faktu, że obecnie o decyzjach dotyczących finansowania projektów i komercjalizacji technologii decydują przemysłowcy, ekonomiści, prawnicy, a w przypadku projektów obronnych czy dużych będących skomplikowanymi działaniami natury technicznej i mających dużą wagę społeczną, np. takich jak budowa elektrowni jądrowych, także politycy. Sekwencyjność działań podobnych do TRL wynika z wiedzy przekazywanej studentom, przyszłym inżynierom w trakcie wykładów w uczelniach technicznych. Kierunek ten został stworzony z myślą o osobach, które pragną stanowić pomost między naukowcami, twórcami nowych rozwiązań i inżynierami z innych dziedzin, łącząc, przy wdrażaniu projektu, ich umiejętności oraz interdyscyplinarne spojrzenie na procesy przemysłowe.

Wpajany studentom schemat działań obejmuje wszelkie etapy wypunktowane w skali TRL: Badania laboratoryjne i opracowywanie wybranych elementów technologii; Optymalizacja technologii; Miniaturowa instalacja modelowa; Instalacja półtechniczna – powiększanie skali; Instalacja przemysłowa – produkcja [1].

2. Definicje poziomów gotowości technologicznej (TRL) w świecie, EU i Polsce

Skala TRL została zaprojektowana w celu usprawnienia procesów decyzyjnych i rozwoju technologii od pomysłu do realizacji. Po pierwsze, podstawową zaletą skali TRL jest to, że ustanawia ona uniwersalne ramy oceny poziomu dojrzałości technologii. W związku z tym promuje wspólne zrozumienie wśród różnych interesariuszy w zakresie sposobu oceny dojrzałości technologicznej, służąc im jako wspólny język w ocenie projektu i podejmowaniu odpowiednich decyzji.

Wykorzystanie poziomów TRL służy obecnie jako kryterium kwalifikowalności do niektórych programów UE, zapewniając jasne wskazanie poziomu dojrzałości technologicznej wymaganego do zakwalifikowania projektu do finansowania. Programy finansowania UE mają różne cele, które wymagają różnych poziomów TRL, a dogłębne zrozumienie TRL może pomóc w zapewnieniu niezbędnego finansowania projektu. Wnioskodawcy mogą wykorzystać te informacje, aby upewnić się, że ich projekt spełnia niezbędne wymagania, a ewaluatorzy stosują je do oceny projektu.

TRL pozwala również kierownikom projektów identyfikować i przewidywać potencjalne zagrożenia w początkowych fazach projektu, poprzez wstępne etapy testowania proponowanych rozwiązań, procesów. Niższe poziomy TRL są zazwyczaj związane z wyższym ryzykiem. Różne procesy i kamienie milowe zintegrowane ze skalą TRL pozwalają menedżerom na wczesne zajęcie się potencjal-

nymi zagrożeniami, zmniejszając możliwość napotkania istotnych problemów na późniejszych etapach projektu. W ten sposób wskaźniki TRL pomagają upewnić się, że technologia zostanie odpowiednio przetestowana i zweryfikowana, zanim zostanie wdrożona na dużą skalę.

TRL służy nie tylko jako narzędzie do zarządzania i ograniczania ryzyka, ale także jako cenne narzędzie planowania w podejmowaniu decyzji w ogóle. Określa mapę drogową, umożliwiając kierownikom projektów wyznaczanie realistycznych celów i identyfikację kluczowych kamieni milowych, które należy osiągnąć, zanim technologia będzie gotowa do komercjalizacji. Chociaż projekty o niższym TRL zwykle doświadczają większej liczby niedotrzymanych terminów niż projekty o wyższym TRL, skala TRL nadal okazuje się przydatna w wyznaczaniu osiągalnych celów.

Definicję i opis poszczególnych wskaźników gotowości technologicznej (TRL) opracowane i przyjęte przez wspomniane Biuro ds. Transformacji Technologicznych DOE przedstawiono w tabeli 1.

W tym dokumencie podano etapy rozwoju przedsięwzięcia do TRL 8, w TRL 9 następuje komercjalizacja. Zwykle w USA, EU i Polsce stosuje się skalę od TRL 1 do TRL 9.

W programie „Horyzont Europa” poziomy gotowości technologicznej są wykorzystywane jako wskaźnik służący lepszej klasyfikacji zgłaszanych projektów [3]. Poziomy gotowości technologicznej umożliwiają wnioskodawcom i oceniającym dostosowanie wniosków projektowych do oczekiwań Komisji Europejskiej poprzez zapewnienie wspólnej jednostki miary ich zaawansowania oraz wartości. Na przykład w wytycznych różnych programów finansowania wyższy poziom gotowości technologicznej oznacza, że poszukuje się projektów w obszarze składania wniosków. Z drugiej strony, niski poziom gotowości technologicznej może wskazywać na to, że zaproszenie koncentruje się na projektach badawczo-rozwojowych. W odniesieniu do swoich instrumentów finansowania Komisja Europejska dostosowała definicję TRL. TRL opisują różne etapy rozwoju technologii, produktu lub usługi w skali od 1 do 9. Poziomy gotowości technologicznej to sposób opisu dojrzałości technologii oraz narzędzie służące porównaniu stanu zaawansowania prac nad różnymi technologiami. Według tej skali dojrzałość technologii opisuje się od fazy conceptualizacji konkretnego rozwiązania (TRL 1) aż do etapu dojrzałości (TRL 9), kiedy ten concept (w wyniku prowadzonych badań naukowych i prac rozwojowych) przybiera postać rozwiązania technologicznego, które można zastosować w praktyce – np. w postaci uruchomienia rynkowej produkcji. Skala ta ułatwia zewnętrznym inwestorom śledzenie postępu rozwoju produktów oraz jest pomocnym narzędziem i wskaźnikiem rozwoju KPI (*Key Performance Indicator*). Z punktu widzenia inwestora, czym wyższy TRL, tym większa szansa na sukces i mniejsze ryzyko inwestycyjne.

Tabela 1. Poziomy gotowości technologicznej (według US Department of Energy – DOE Technology Readiness Levels-(TRLs).**Table 1.** Technology Readiness Levels (TRL).

EERE R 540.112 – 02 [2]: Poziomy gotowości technologii (TRL): Należy określić poziom gotowości technologii związanej z projektem, a także planowany postęp w trakcie realizacji projektu. Należy podać szczegółowe wyjaśnienie uzasadnienia szacowanego poziomu gotowości technologii. Należy określić szczegółowe kryteria wejścia na kolejny wyższy poziom gotowości technologii. Zastosowanie mają następujące definicje:

TRL-1. Zaobserwowane i ogłoszone podstawowe zasady procesu: Zidentyfikowany problem naukowy lub zjawisko. Zasadnicze cechy i zachowania systemów oraz ich struktur są identyfikowane z użyciem formuł matematycznych lub algorytmów. Obserwacja podstawowych zasad lub zjawisk naukowych została potwierdzona w recenzowanych badaniach. Technologia jest gotowa do przejścia od badań naukowych do badań stosowanych.

TRL-2. Sformułowana koncepcja i/lub zastosowanie technologii: Badania stosowane. Teoria i zasady naukowe koncentrują się na konkretnych obszarach zastosowań w celu zdefiniowania koncepcji. Opisywana jest charakterystyka aplikacji. Opracowywane są narzędzia analityczne do symulacji lub analizy aplikacji.

TRL-3. Analityczna i eksperymentalna weryfikacja krytycznej funkcji i/lub charakterystyki koncepcji: Na tym poziomie osiągnięto potwierdzenie słuszności koncepcji. Eksperymentalne badania i rozwój rozpoczynają się od badań analitycznych oraz laboratoryjnych. Wymagania dotyczące systemu/zintegrowanego procesu dla ogólnego zastosowania systemu są dobrze znane. Demonstracja wykonalności technicznej z użyciem niedojrzałych wdrożeń prototypowych jest wykonywana z reprezentatywnymi danymi wejściowymi interfejsu, w tym elementami elektrycznymi, mechanicznymi lub sterującymi w celu walidacji prognoz.

TRL-4. Walidacja komponentu i/lub procesu w środowisku laboratoryjnym – prototyp alfa (komponent): Samodzielna implementacja prototypu i testowanie w środowisku laboratoryjnym demonstruje koncepcję. Integracja i testowanie elementów technologii komponentów są wystarczające do potwierdzenia wykonalności.

TRL-5. Walidacja komponentu i/lub procesu w odpowiednim środowisku – prototyp beta (komponent): Przeprowadzane są dokładne testy prototypu komponentu/procesu w środowisku odpowiednim dla użytkownika końcowego. Podstawowe elementy technologiczne są zintegrowane z rozsądnie realistycznymi elementami wspierającymi, opartymi na dostępnych technologiach. Implementacje prototypów są zgodne z docelowym środowiskiem i interfejsami.

TRL-6. Demonstracja modelu systemu/procesu lub prototypu w odpowiednim środowisku: Implementacja prototypu jest częściowo zintegrowana z istniejącymi systemami. Wykonalność inżynierska zademonstrowana w pełni w rzeczywistym środowisku lub wysoce wiernie odtworzonym środowisku odpowiednim dla użytkownika końcowego.

TRL-7. Demonstracja zintegrowanego prototypu zakwalifikowanego poprzez testy. Demonstracja przedkomercyjna: System jest w pełni zintegrowany ze środowiskiem operacyjnym, wyposażony w pełni działające systemy sprzętowe i programy sterujące. Wszystkie funkcje są testowane w symulowanych i operacyjnych scenariuszach z wykazaniem osiągnięciem specyfikacji podanej przez końcowego użytkownika systemu. Technologia jest gotowa do przejścia do etapu rozwoju prowadzącego do pełnej komercjalizacji rozwiązania.

TRL-8. Rzeczywisty system/proces ukończony i zakwalifikowany poprzez testy i demonstrację. Gotowość technologiczna: Koniec rozwoju systemu. Pełnowymiarowy system jest w pełni zintegrowany ze środowiskiem operacyjnym, wyposażony w pełni działające systemy sprzętowe i programy sterujące. Wszystkie funkcje zostały przetestowane w symulowanych i operacyjnych scenariuszach z wykazaniem osiągnięciem specyfikacji podanej przez końcowego użytkownika systemu. Technologia jest gotowa do produkcji i sprzedaży na skalę przemysłową.

Polskie Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) dofinansowuje projekty według logiki TRL – celem większości programów jest takie dopracowanie technologii, aby można było ją zastosować w warunkach rzeczywistych (tzn. aby osiągnęły poziom gotowości technologicznej 9). Oczywiście należy pamiętać także o własnym IT Due Diligence, nie zawsze bowiem firmy oferujące produkt lub technologię dobrze oceniają TRL, a wręcz podwyższają skalę dojrzałości produktu. NCBR wykorzystuje dziewięciopozomowy system klasyfikacji gotowości technologicznej do oceny projektów badawczo-rozwojowych i innowacyjnych, określając ich stopień zaawansowania i gotowość do praktycznego zastosowania. Ta klasyfikacja poziomów pomaga w identyfikacji obszarów, w których technologie wymagają dalszego rozwoju i wsparcia, a także ułatwia podejmowanie decyzji dotyczących finansowania i inwestowania w projekty o różnym stopniu zaawansowania technologicznego [4].

Trzeba wspomnieć, że rozporządzenie o projektach obronnych wspomina o konieczności stosowania oceny proponowanych projektów według skali TRL [5], bez wątpienia skala ta powinna być wykorzystywana w projektach dotyczących technologii radiacyjnych i jądrowych.

3. Przykład stosowania TRL przy powiększaniu skali w przypadku wdrażania technologii radiacyjnej w energetyce

Dobrym przykładem postępowania zgodnego z zaleceniami skali TRL był proces wdrażania technologii jądrowych i radiacyjnych w energetyce, dotyczył on zastosowania radiacyjnej metody oczyszczania gazów odlotowych z kotłów opalanych węglem [6]. W realizację projektu, autorstwa pracowników Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej były zaangażowane biura projektowe Energo-

Tabela 2. Poziomy gotowości technologicznej (według Narodowego Centrum Badań i Rozwoju).
Table 2. Technology Readiness Levels (according to National Centre for Research and Developments).

Skalę TRL można podzielić na trzy grupy:

TRL I: Prace koncepcyjne, analiza pomysłu, produktu, realności jego stworzenia

TRL II-VI: Badania przemysłowe nad produktem

TRL VII-IX: Prace rozwojowe nad produktem

Poziom I – podstawowe zasady technologii. Obserwacja i opis podstawowych zasad związanych z funkcjonowaniem danej technologii: Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie mogą obejmować opracowania dotyczące podstawowych właściwości technologii. Poziom ten wskazuje na faktyczny początek rozwoju technologii rozumianej jako sformułowana wiedza teoretyczna, która może zostać zweryfikowana mierzalnie.

Poziom II – określenie koncepcji technologii. Oznacza to rozpoczęcie działań związanych z przyszłym zastosowaniem technologii:

Zidentyfikowane teoretyczne podstawy nowej technologii pozwalają na sformułowanie założeń jej praktycznego zastosowania. Planowane przyszłe zastosowania są oparte na przewidywaniach. Może nie istnieć jeszcze żaden dowód ani szczegółowa analiza potwierdzająca przyjęte założenia praktycznego zastosowania technologii. Działania ograniczone są do opracowań analitycznych. Opracowania te mogą obejmować publikacje lub inne materiały, które przedstawiają rozważane możliwości zastosowania technologii, dostarczając jednocześnie analiz potwierdzających koncepcję technologii. Istotne jest jednak, aby nowa technologia była opisana spójnie i szczegółowo.

Poziom III – weryfikacja koncepcji potwierdzająca analitycznie i eksperymentalnie krytyczne funkcje lub charakterystyki technologii: Zostają zainicjowane aktywne działania obejmujące opracowania analityczne i przeprowadzenie badań laboratoryjnych, mających na celu fizyczne potwierdzenie analitycznych przewidywań dotyczących odrębnych elementów technologii. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują komponenty, które nie są jeszcze zintegrowane w całość lub nie są reprezentatywne dla całej technologii.

Poziom IV – weryfikacja komponentów technologii w warunkach laboratoryjnych: Podstawowe komponenty technologii zostają zintegrowane w celu potwierdzenia, że będą one współpracować. Uzyskuje się ogólne (o niskiej wierności w porównaniu do docelowego systemu) odwzorowanie technologii w warunkach laboratoryjnych. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują sprzęt zintegrowany *ad hoc* w laboratorium.

Poziom V – weryfikacja komponentów technologii w środowisku zbliżonym do rzeczywistego: Wierność odwzorowania technologii wzrasta znacząco. Podstawowe komponenty technologii są zintegrowane z elementami wspomagającymi, imitującymi elementy rzeczywiste. Technologia może być przetestowana w symulowanych warunkach operacyjnych. Weryfikacja nowej technologii powinna zostać przeprowadzona w kontekście jej specyficznego zastosowania w przyszłym systemie lub sprzęcie oraz wykorzystywać w testach elementy odzwierciedlające konkretne, przewidywane zastosowanie.

Poziom VI – demonstracja technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych: Osiągnięty zostaje znaczący postęp w zakresie gotowości technologicznej. Reprezentatywna technologia, która jest znacznie bardziej zaawansowana od występującej na poziomie V, jest poddawana badaniom i testom. Do badań na tym poziomie zalicza się badania modelu albo demonstratora technologii w warunkach laboratoryjnych odwzorowujących z dużą wiernością warunki rzeczywiste lub w symulowanych warunkach operacyjnych. Stosowanie elementów komercyjnie dostępnych o obniżonej odporności jest nadal możliwe, jeżeli nie jest sprzeczne z rodzajem warunków środowiskowych, w których model albo demonstrator technologii będzie poddawany testowaniu.

Poziom VII – demonstracja prototypu technologii w warunkach operacyjnych: Prototyp jest prawie na poziomie systemu operacyjnego albo osiągnął ten poziom. Ten poziom gotowości technologicznej reprezentuje znaczący postęp w stosunku do poziomu VI i wymaga demonstracji rozwijanego prototypu technologii w warunkach operacyjnych, np. na statku powietrznym, w pojeździe, w informatycznym środowisku operacyjnym albo w przestrzeni kosmicznej. Osiągnięcie tego poziomu powinno być uwiarygodnione przeprowadzonymi działaniami w zakresie inżynierii systemowej i zarządzania procesem rozwojowym.

Poziom VIII – skompletowanie i sprawdzenie rozwijanej technologii w wyniku testów i demonstracji: Potwierdzono, że technologia może być zastosowana w jej finalnej postaci i w przewidywanych dla niej warunkach. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują badania, walidację i ocenę technologii w warunkach przeznaczonych do jej wykorzystania, np. w ramach systemu uzbrojenia, w celu potwierdzenia założeń projektowych. Praktycznie (w prawie wszystkich przypadkach) poziom ten reprezentuje koniec rzeczywistego rozwoju technologii.

Poziom IX – sprawdzenie rozwijanej technologii w środowisku operacyjnym: Następuje zastosowanie technologii w jej końcowej formie i w przewidywanych warunkach funkcjonowania, np. w warunkach operacyjnych misji lub w rzeczywistym środowisku operacyjnym.

projekt Warszawa i Katowice, Proatom BP, a firmami wykonawczymi Energobudowa, ELWO Pszczyna i inne.

Projekty prowadziły działy inwestycji EC Kawęczyn i ZE Dolna Odra. Instalacje przemysłowe, pilotowa i pełnoskalowa, wymagały wydania zezwoleń przez Państwową Agencję Atomistyki (PAA), Ministerstwo Środowiska, Ministerstwo Zdrowia i władze wojewódzkie. Była to największa instalacja radiacyjna kiedykolwiek zbudowana w świecie, moc zainstalowanych akceleratorów wynosiła 1,2 MW.

TRL 1–2 (i) zaobserwowano i ogłoszono podstawowe zasady procesu, **(ii)** określono podstawy technologii; etap ten był oparty na zaobserwowanych zjawiskach tworzenia plazmy niskotemperaturowej w gazie napromieniowanej wiązką elektronów, a podstawy technologii wynikały z wiedzy o możliwości utleniania niereaktywnego oraz słabo rozpuszczalnego w wodzie NO i SO₂ tworzącego szkodliwe siarczyny, do bezwodników kwasów azotowego (NO₂) i siarkowego (SO₃). Dalsze potwierdzenie efektywności

i stworzenie założeń technicznych realizacji procesu wymagało przeprowadzenia badań laboratoryjnych [7].

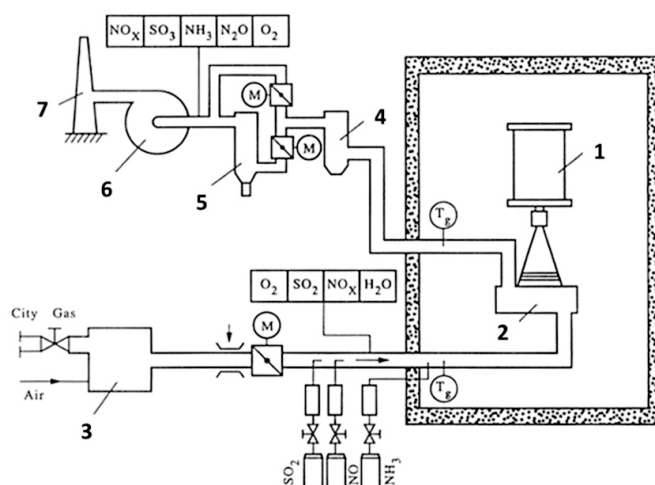
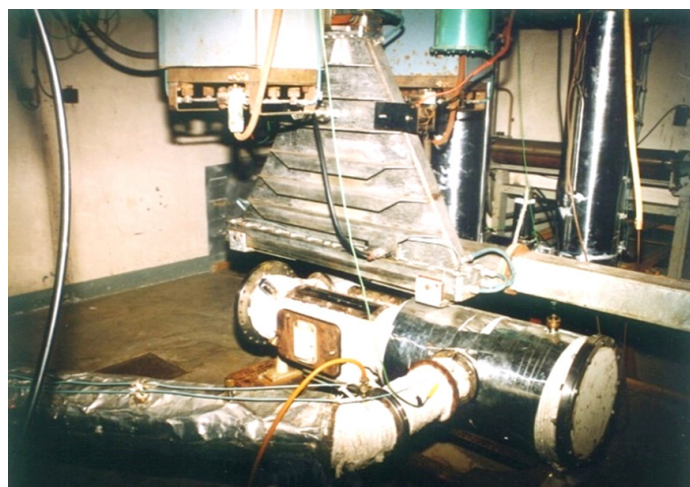
TRL 3–4 (i) weryfikacja koncepcji potwierdzająca analitycznie i eksperymentalnie krytyczne funkcje lub charakterystyki technologii, (ii) weryfikacja komponentów technologii w warunkach laboratoryjnych; etap ten wymagał budowy instalacji laboratoryjnej w IChTJ i przeprowadzenia odpowiednich eksperymentów. Instalacje takie powstały też w Japonii i Niemczech, a później w innych krajach świata: Korei Płd., Chinach, Malezji, Turcji. Instalacja w IChTJ wykorzystywała akcelerator elektronów ILU – 6 o mocy wiązki 20 kW i regulowanej energii elektronów do 2 MeV. Gazy spalinowe były wytwarzane w palniku olejowym, a stężenie zanieczyszczeń gazowych było regulowane przez dodatkowe dozowanie gazów (tlenku azotu i ditlenku siarki), objęściowy przepływ gazów sięgał 400 Nm³/h. Schemat i zdjęcie instalacji laboratoryjnej przedstawiono na rysunku 1 [8]. Określono wpływ dawki na efektywność procesu usuwania kwaśnych zanieczyszczeń gazowych. W trakcie eksperymentów własnych i prowadzonych na innych instalacjach stwierdzono, że mieszanina powstałych kwasów (związana z obecnością pary wodnej w gazie) tworzy mgłę, której usunięcie z gazu nie jest możliwe z użyciem znanych urządzeń (demisterów). Dlatego też powstała idea dodatku amoniaku gazowego i wytwarzania cząstek ciała stałego w postaci mieszaniny siarczanu i azotanu amonowego. Dodatkową zaletą tego rozwiązania było wytwarzanie wartościowego nawozu sztucznego.

TRL 5–6–7 (i) weryfikacja komponentów technologii w środowisku zbliżonym do rzeczywistego, (ii) demonstracja technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, (iii) demonstracja prototypu technologii w warunkach operacyjnych; etap ten wymagał budowy instalacji pilotowej w elektrowni na bloku opalanym węglem. Instalację tę zbudowano w EC Kawęczyn, przepływ gazów spalinowych wynosił 20 000 Nm³/h, zastosowano dwa akceleratory

ELV – 6 o mocy 50 kW każdy i energii wiązki 600 keV. Zdjęcie elektrowni i budynku bloku wodnego, przy którym zbudowany był budynek mieszczący akceleratory i inne elementy oczyszczania spalin, przedstawiono na rysunku 2 [9]. W trakcie testów wymaganych do przeprowadzenia w ramach TRL7 wypróbowano trzy rodzaje urządzeń do usuwania zawiesiny cząstek stałych produktu: workowy filtr tkaninowy, mokry filtr złożowy i elektrofiltr (EF). Stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem jest EF, jednak, mimo, że jest to produkt handlowy, wymagał on wprowadzenia wielu ulepszeń, aby uzyskać właściwe warunki eksploatacji tego urządzenia.

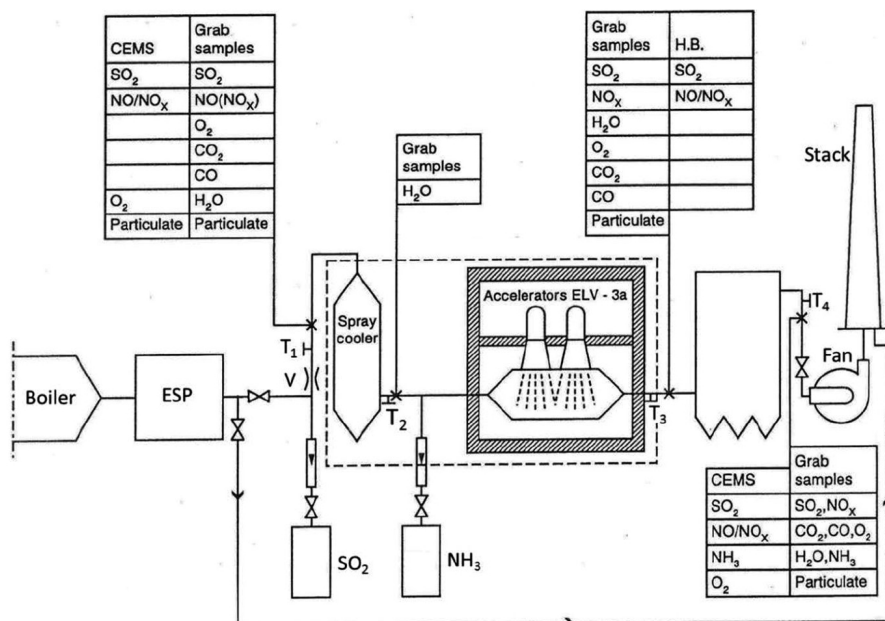
Po osiągnięciu TRL 7, potwierdzeniu wszelkich założeń technologicznych i inżynierskich, przystąpiono do realizacji następnych etapów projektu. Niezbędne było przygotowanie dokumentu opisującego wpływ obiektu na środowisko, projektu z uwzględnieniem raportu bezpieczeństwa pod względem ochrony radiologicznej, stosowania niebezpiecznych związków chemicznych i wybuchowości (amoniak). Uzgodnienia i zgody dotyczyły Ministerstwa Środowiska, Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Państwowej Agencji Atomistyki, Ministerstwa Zdrowia oraz odpowiednich władz wojewódzkich. Po zatwierdzeniu projektów technicznych i przeprowadzeniu przetargów, wyborze producenta akceleratorów przystąpiono do realizacji następnych etapów prowadzących do wdrożenia technologii w energetyce w pełnej skali technicznej.

TRL 8–9 (i) skompletowanie i sprawdzenie rozwijanej technologii w wyniku testów i demonstracji, (ii) sprawdzenie rozwijanej technologii w środowisku operacyjnym, etap ten wymagał budowy w pełnej skali przemysłowej o przepływie gazów przynajmniej 10-krotnie większym od uzyskiwanego w instalacji pilotowej. Instalację taką zbudowano w EC Pomorzany należącej do Zespołu Elektrowni Dolna Odra [10]. Oczyszczano spaliny z kotła WP-100 opalanego węglem kamiennym, przepływ spalin wynosił 270 000 Nm³/h, zastosowano cztery akceleratory



Rys. 1. Fotografia i schemat instalacji laboratoryjnej do radiacyjnego oczyszczania gazów spalinowych. 1 – akcelerator ILU – 6; 2 – komora reakcyjna; 3 – mieszacz gazów; 4 – komora retencyjna; 5 – filtr tkaninowy; 6 – wentylator; 7 – komin (opracowanie własne autora).

Fig. 1. Photo and scheme of laboratory installation for flue gas treatment. 1 – accelerator ILU – 6; 2 – process vessel; 3 – gas mixer; 4 – retention vessel; 5 – bag filter; 6 – ID fan; 7 – stack (author's own work).



Rys. 2. Zdjęcie kompleksu elektrowni EC Kawęczyn i schemat ideowy instalacji oczyszczania spalin wiązką elektronów w skali pilotowej (opracowanie własne autora).

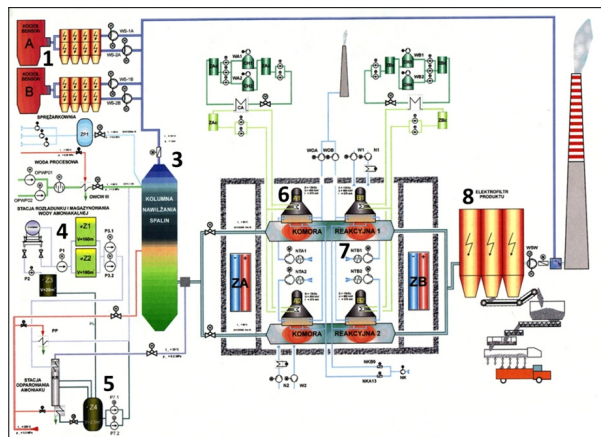
Fig. 2. Photo of EPS Kawęczyn complex and layout of pilot plant for electron beam flue gas treatment (author's own work).

(600 keV) o mocy 300 kW każdy, zasilane z dwu zasilaczy o mocy 600 kW każdy. Zdjęcie elektrowni z kolumną nawilżania spalin należącą do instalacji ich oczyszczania widoczną na froncie fotografii oraz schemat instalacji przedstawiono na rysunku 3.

Opracowana w powyższych działaniach technologia usuwa jednocześnie obydwa zanieczyszczenia kwaśne, co nie jest możliwe w przypadku innych technologii konwencjonalnych. W trakcie realizacji projektu opracowano szereg nowych rozwiązań, które zostały opatentowane i mają wartość szerszą, dotyczącą ich stosowania w innych rozwiązaniach. Należy podkreślić, że promieniowanie jonizujące emitowane przez jeden akcelerator 15 kW ma

moc dawki równą mocy dawki źródła Co-60 o aktywności 1 MCi. A zatem w tym przypadku było to źródło promieniowania równoważne 80 MCi Co-60. W praktyce aktywność większości źródeł stosowanych w obróbce radiacyjnej nie przekracza 1 MCi, w rzadkich przypadkach sięga ona 4 MCi.

Realizacja poszczególnych etapów tego projektu wskazała na to, jak ważne jest stosowanie zaleceń wynikających z realizacji działań według skali TRL. Typ akceleratorów zastosowanych w instalacji pilotowej (EC Kawęczyn) był inny od dostarczonych przez dostawcę wybranego do realizacji instalacji przemysłowej (EC Pomorzany). Okazało się, że nie przebadano wcześniej zasilaczy o mocy 600 kW



Rys. 3. Fotografia EC Pomorzany – na planie frontowym kolumna nawilżania, na środku zdjęcia EF należące do instalacji oczyszczania spalin. Obok schemat instalacji radiacyjnego oczyszczania spalin (opracowanie własne autora).

Fig. 3. Photo of EPS Pomorzany, gas humidification tower in front and EPS belonging to EB flue gas treatment plant in a photo centre. A scheme of installation for radiation flue gas purification at right (author's own work).

(transformator z izolacją olejową). Nastąpiło przebicie izolacji w jednym z dwu dostarczonych urządzeń. Został on odesłany do naprawy. Błąd ten był dziwny, bo konstrukcja transformatorów olejowych jest klasyką techniki stosowanej w tej dziedzinie. To jedyne urządzenie, które nie zostało przygotowane z wykorzystaniem wymogów skali TRL i jest to ostrzeżenie, aby w jakiegokolwiek nowej technologii nie stosować skrótów, nawet jeśli nie chodzi o typ stosowanego rozwiązania, lecz tylko o zmianę skali rozwiązania.

Dodatkową obserwacją, ważną przy wdrażaniu nowych technologii, było stwierdzenie, że takie działania („nowalijki”) przyciągają dostawców, oferujących nieistniejące jeszcze w skali technicznej rozwiązania. Zasada działania oferowanego przez trzeciego z możliwych dostawców akceleratora była fascynująca, ale niestety nie został on zbudowany do dnia dzisiejszego. Pismo z biura handlowego o rozpatrywaniu możliwości zastosowania tego urządzenia w naszym projekcie posłużyło jedynie do jego prezentacji na zebraniu akcjonariuszy firmy.

4. Poziomy gotowości technologicznej (TRL) w odniesieniu do SMR

Małe reaktory modułowe mają moc wyjściową poniżej 300 MW [11]. Termin „modułowy” w kontekście małych reaktorów modułowych odnosi się do ich skalowalności i możliwości wytwarzania głównych elementów reaktora jądrowego w środowisku fabrycznym, a następnie transportowania ich na miejsce. Termin „modułowy” w małych reaktorach modułowych (SMR) odnosi się do koncepcji projektowej, w której reaktor jest zbudowany jako seria małych, samodzielnych jednostek. Można je łączyć w celu utworzenia większej elektrowni. Modułowa konstrukcja reaktorów SMR pozwala na większą elastyczność w budowie i eksploatacji reaktora. Podejście modułowe pozwala na standaryzowane projekty, które mogą być powielane

w wielu jednostkach, zmniejszając koszty i czas wymagany do uzyskania licencji, budowy i eksploatacji. Dodatkowo, modułowa konstrukcja reaktorów SMR pozwala na skalowalność, w ramach której można dodawać dodatkowe moduły w celu zwiększenia wydajności elektrowni. Ta elastyczność i skalowalność sprawiają, że reaktory SMR dobrze nadają się do zaspokajania potrzeb energetycznych małych społeczności lub do użytku w odległych bądź odizolowanych obszarach.

Jedną z bardzo ważnych barier rozwoju SMR jest licencjonowanie nowych projektów reaktorów. Na przykład, regulując projektowanie, lokalizację, budowę i eksploatację nowych komercyjnych elektrowni jądrowych, NRC stosuje obecnie połączenie wymogów regulacyjnych, licencjonowania i nadzoru. Historycznie proces licencjonowania został opracowany dla dużych reaktorów komercyjnych. Proces licencjonowania nowych projektów reaktorów jest długotrwały i kosztowny.

Bardzo dobrą i aktualną ocenę sytuacji przedstawiło Pacific Northwest Laboratory w raporcie „Emerging Technologies Review: Small Modular Reactors” [12] wykonanym dla Air Force Civil Engineer Center under a Work-For-Others Agreement with the U.S. Department of Energy. Waga tego dokumentu wynika między innymi z tego, że od samego początku jej powstania idea budowy SMR-ów dotyczyła możliwości ich stosowania w trudno dostępnych regionach naszego globu (np. arktyczne rejony Kanady) i do dobrego zabezpieczenia źródła zasilania w energię elektryczną baz wojskowych.

Projektanci i dostawcy oferują SMR-y, które osiągnęły różne poziomy dojrzałości projektowej. Lekkowodne (LWR) SMR są najbardziej dojrzałe pod względem technologicznym i produkcyjnym. Projekty wywodzą się z istniejących dużych konstrukcji LWR. SMR-y inne niż LWR są dalej uważane za będące w rozwoju, daleko od etapów wdrożenia i komercjalizacji, ponieważ opierają się one na projektach reaktorów, dla których istnieje niewiele faktycznych wdrożeń, a jeszcze mniej z nich jest eksplo-

Tabela 3. Główne typy reaktorów jądrowych [12].**Table 3.** Most common nuclear reactors [12].

Typ reaktora	Chłodziwo	Moderator	Spektrum neutronów
Reaktory – ciśnieniowe (PWR)	Woda lekka (H ₂ O)	Woda lekka (H ₂ O)	Termiczne
Reaktory – wrzące (BWR)	Woda lekka (H ₂ O)	Woda lekka (H ₂ O)	Termiczne
Reaktory – stopione metale	Płynny sód, ołów lub ołów-bismut	Grafit	Termiczne
		Brak	Prędkie
Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HGTR)	Hel (wodór, ditlenek węgla)	Grafit	Termiczne
		Brak	Prędkie
Reaktory – stopione sole	Mieszanina soli – chlorków lub fluorków	Brak	Prędkie

atowanych tak długo, jak są eksploatowane duże LWR elektrownie jądrowe. Według raportu istnieje wiele czynników ograniczających związanych z wdrażaniem technologii SMR. A ograniczona liczba specjalistów oraz ograniczona podaż komponentów produkcyjnych i dedykowanego SMR-om paliwa jądrowego wpływają na stopień zaawansowania technologii. Żaden z nich nie został wdrożony w sposób komercyjny w Stanach Zjednoczonych.

NRC przywiązuje dużą wagę do oceny proponowanej lokalizacji budowy SMR-ów: „Przy wyborze lokalizacji należy wziąć pod uwagę środowisko ludzkie, zdrowie i bezpieczeństwo publiczne, inżynierię i projekt, ekonomię, wymogi instytucjonalne, wpływ na środowisko i inne czynniki. Potencjalny wpływ budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych na środowisko ludzkie oraz cechy społeczne, kulturowe i ekonomiczne (w tym sprawiedliwość środowiskową) jest zwykle podobny do potencjalnego wpływu każdego dużego obiektu przemysłowego, ale elektrownie jądrowe są wyjątkowe pod względem stopnia, w jakim należy wziąć pod uwagę potencjalny wpływ środowiska na ich bezpieczeństwo. Wymogi bezpieczeństwa są głównymi wyznacznikami przydatności lokalizacji dla elektrowni jądrowych, ale wpływ na środowisko jest również ważny i musi zostać oceniony.”

W ostatnim siedemdziesięcioleciu wiele rodzajów technologii reaktorów jądrowych zostało sprawdzonych i charakteryzuje się wysokim poziomem gotowości technologicznej. W Stanach Zjednoczonych i na całym świecie zbudowano, licencjonowano i eksploatowano reaktory lekkowodne, reaktory z wykorzystaniem ciekłego metalu, wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem (HTGR) i reaktory ze stopioną solą (MSR). Tabela 3 zawiera przegląd różnych głównych typów reaktorów. Wartości ciśnień i temperatur roboczych w opisach są przybliżone i reprezentatywne dla różnych typów, a konkretne wartości mogą się różnić w zależności od projektu, w ramach każdego typu. Na przykład, jeśli chodzi o ciśnienie robocze reaktory PWR działają zwykle przy około 150 atmosferach (150-krotność normalnego ciśnienia

atmosferycznego), podczas gdy reaktory wykorzystujące płynne metale działają nieco powyżej ciśnienia atmosferycznego. Są to prekursorzy głównych rodzin oferowanych obecnie SMR-ów, warto zatem je przypomnieć.

Sytuacja dotycząca licencjonowania SMR-ów będących klonami powyższych rozwiązań jest przedstawiona poniżej.

a) Reaktory – ciśnieniowe (PWR)

Prawie dwie trzecie reaktorów eksploatowanych komercyjnie to reaktory tego typu. Wszystkie reaktory Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych to reaktory PWR. Program energetyki jądrowej armii amerykańskiej obsługiwały reaktory PWR eksploatowane od 1954 do 1974 roku.

Konstrukcja NuScale PWR (ponieważ wytwornica pary i reaktor dzielą ten sam zbiornik reaktora, ta szczególna cecha konstrukcyjna jest powszechnie określana jako zintegrowany reaktor PWR (iPWR) jest jedyną amerykańską konstrukcją SMR, która posiada certyfikat projektu wydany przez amerykańską Komisję Dozoru Jądrowego (NRC) oraz standardowe zatwierdzenie projektu.

b) Reaktory – wrzące (BWR)

Reaktory BWR pracują pod wysokim ciśnieniem, zazwyczaj około 68 atmosfer i w temperaturze około 285°C. Wykorzystują one jednopętlowy system zasilania parą, w którym para opuszcza reaktor i przepływa do turbiny generatora.

Według raportu obecnie w NRC nie ma żadnych wniosków projektowych dotyczących reaktorów BWR SMR.

c) Reaktory na neutrony prędkie (SFR) – stopione metale

Ponieważ reaktory SFR są zaprojektowane tak, aby wykorzystywać szybkie neutrony do rozszczepienia uranu/plutonu, nie używają one moderatora. SFR działają przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego, nadciśnienie wynosi około 0,1 atmosfery. W innych podtypach reaktorów wykorzystujących ciekłe metale może być stosowany ołów lub ołów-bismut jako chłodziwo.

Obecnie działają japońskie testowe reaktory SFR Joyo (1977–1997 i 2004–2007), dwa rosyjskie komercyjne reaktory SFR BN-600 (1980–obecnie) i BN-800 (2014–obecnie) oraz chiński eksperymentalny reaktor „prędkie” (2011–obecnie). BN-600 i BN-800 to jedyne dwa działające komercyjne reaktory SFR na świecie.

Do NRC nie złożono żadnych wniosków projektowych dotyczących SFR SMR.

d) Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HGTR)

Reaktory HTGR to reaktory jądrowe wykorzystujące gazy, takie jak hel, jako chłodziwo. Ponieważ większą część reaktorów HTGR zaprojektowano z myślą o wykorzystaniu neutronów termicznych do rozszczepienia uranu, większość z nich wykorzystuje grafit jako moderator. Moderator nie jest stosowany w reaktorach HTGR wykorzystujących neutrony prędkie. Reaktory HTGR pracują przy niższych ciśnieniach niż ciśnienia projektowe reaktorów PWR i BWR, wynoszą one około 60 atmosfer. Istnieją dwa główne projekty HTGR oparte na konfiguracji moderatora: (1) blok pryzmatyczny, w którym rdzeń reaktora jest skonfigurowany w grafitowych blokach pryzmatycznych oraz (2) HTGR ze złożem nasypowym, w którym moderator i paliwo są uformowane w struktury kuliste.

W 1958 roku Philadelphia Electric Company zamówiła reaktor Peach Bottom 1, eksperymentalny, chłodzony helem, moderowany grafitem prototyp jądrowy HTGR o mocy 40 MWe. Budowa Peach Bottom 1 rozpoczęła się w 1962 roku. Został on oddany do użytku w 1967 roku i działał do 1974 roku, został zamknięty po pomyślnym zademonstrowaniu opłacalności HTGR.

Firma General Atomics zaprojektowała również reaktor Fort St. Vrain jako sprawdzony, chłodzony helem, moderowany grafitem, komercyjny reaktor HTGR o mocy 330 MWe. Budowa rozpoczęła się w 1968 roku, a wstępne testy rozpoczęły się w 1972 roku. Elektrownia zaczęła dostarczać energię elektryczną do sieci w 1979 roku. Chociaż projekt z powodzeniem udowodnił charakterystykę operacyjną HTGR i innych technologii, do jego utrzymania wymagana była konserwacja i rozległe modyfikacje instalacji. Ze względu na niekorzystne w ocenie kwestie ekonomiczne i techniczne elektrownia została wycofana z eksploatacji w 1989 roku.

Na całym świecie zaprojektowano i eksploatowano inne eksperymentalne reaktory HTGR. Brytyjski Urząd Energii Atomowej eksploatował reaktor Dragon. Reaktor Dragon testował paliwo i materiały dla europejskiego programu reaktorów wysokotemperaturowych Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju/Agencji Energii Jądrowej NEA/OECD w latach 1965–1976. Konstrukcja reaktora wykorzystywała wczesną formę trójstrukturalnego paliwa izotropowego (TRISO) o różnych kształtach. Reaktor nie jest już użytkowany i jest obecnie wycofywany z eksploatacji.

Niemcy zaprojektowały reaktor Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) oraz wysokotemperaturowy reaktor THTR-300. AVR był reaktorem testowym o mocy 15 MWe, który działał w latach 1967–1988. Reaktor THTR-300 był elektrownią o mocy 300 MWe, która działała w latach 1985–1989. Nie jest on już eksploatowany.

Japońska Agencja Energii Atomowej eksploatuje wysokotemperaturowy inżynierski reaktor testowy. Chłodzony gazem, moderowany grafitem reaktor został zaprojektowany do dostarczania 30 MWe. Jego działanie zostało zawieszono w 2011 i wznowiono w 2021 roku.

Pierwszy w Chinach wysokotemperaturowy, chłodzony gazem reaktor testowy HTR-10 ze złożem nasypowym działa na Uniwersytecie Tsinghua. Został on zaprojektowany do testowania koncepcji i ma moc 10 megawatów termicznych (MWt). Ponadto w 2021 roku w Chinach rozpoczęły pracę dwa wysokotemperaturowe, chłodzone gazem reaktory HTR-PM o mocy 100 MWe.

NRC nie udzieliła licencji na reaktory HTGR i żadne z nich nie działają obecnie w Stanach Zjednoczonych.

e) Reaktory – stopione sole

Reaktory MSR to reaktory, które jako chłodziwo wykorzystują ciekłe mieszaniny chlorków lub soli fluorkowych. Reaktory MSR mogą wykorzystywać paliwo ciekłe, w którym uran-235 jest domieszką w mieszaninie soli i krąży w reaktorze, lub stosowane jest paliwo stałe. Reaktory MSR mogą być również reaktorami termicznymi, wykorzystującymi grafit jako moderator lub reaktorami prędkimi, w których moderator nie jest potrzebny.

Ponadto reaktory MSR pracują przy niższych ciśnieniach niż ciśnienia projektowe reaktorów PWR i BWR; wynosi ono około 2 atmosfery.

W Stanach Zjednoczonych AEC przeprowadziła dwa eksperymenty z wykorzystaniem MSR: jeden dla Sił Powietrznych Armii Stanów Zjednoczonych (które stały się Siłami Powietrznymi Stanów Zjednoczonych w 1947 roku), a drugi wewnętrzny, aby ustalić, czy MSR mogą być komercyjnie obsługiwane bezpiecznie i są niezawodne oraz ich utrzymanie w ruchu jest możliwe bez nadmiernych trudności.

Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) był reaktorem testowym obsługiwany przez ORNL w celu zademonstrowania, że reaktory zasilane stopioną solą wykorzystywane głównie do wytwarzania energii elektrycznej mogą być obsługiwane bezpiecznie i niezawodnie. Reaktor powielający o mocy 7,4 MWt, chłodzony stopioną solą i moderowany grafitem, został zbudowany w 1964 roku i działał do 1969 roku. Wykorzystywał on mieszaninę izotopów uranu, toru i soli fluorkowych plutonu.

Obecnie przedłożono przed NRC dwa projekty reaktorów MSR. We wrześniu 2021 roku firma Kairos Power, LLC złożyła do NRC wniosek o pozwolenie na budowę reaktora testowego HERMES. W sierpniu 2022 roku Abilene Christian University złożył do NRC wniosek

o pozwolenie na budowę reaktora badawczego ze stopioną solą. NRC analizuje oba wnioski i nie podjęła jeszcze decyzji w sprawie żadnego z nich.

Opierając się na definicjach poziomu gotowości technologicznej (TRL) przyjętych przez Department of Defence (DoD), a opublikowanych przez Government Accountability Office (GAO) [13], TRL SMR może wynosić 5 lub 6. TRL na poziomie 5 oznacza, że podstawowe komponenty technologiczne są zintegrowane z dość realistycznymi elementami wspierającymi, dzięki czemu można je testować w symulowanym środowisku. TRL na poziomie 6 oznacza, że systemy lub podsystemy zostały zademonstrowane w odpowiednim środowisku.

NRC ustaliła ogólne kamienie milowe dotyczące ukończenia przeglądów wniosków dla różnych działań regulacyjnych. Pełna lista działań licencyjnych i regulacyjnych oraz odpowiadających im ogólnych kamieni milowych została opublikowana na publicznej stronie internetowej NRC [14]. Okres przeglądu rozpoczyna się po zakończeniu przez NRC przeglądu akceptacyjnego i przyjęciu wniosku do przeglądu, a kończy się, gdy personel sporządzi raport z oceny bezpieczeństwa. Przeglądy wcześniejszych zezwoleń na budowę trwają 24 miesiące; przeglądy licencji łączonych trwają od 30 do 42 miesięcy.

W 1989 roku NRC ustanowiła alternatywny proces licencjonowania, który łączy pozwolenie na budowę i licencję operacyjną, z pewnymi warunkami, w jedną licencję. Licencja ta nazywana jest połączonym pozwoleniem na budowę i licencją operacyjną (licencja łączona) lub Combined License Application (COL).¹ Przepis zapisany w 10 Code of Federal Regulations (CFR) część 52 pozwala również właścicielowi/operatorowi na złożenie wniosku o wczesne zezwolenie na lokalizację Early Site Permit (ESP)², w którym NRC określi, czy teren jest odpowiedni dla elektrowni jądrowej. Jeśli właściciel/operator chce ubiegać się o ESP, wniosek będzie dotyczył kwestii bezpieczeństwa terenu, ochrony środowiska i planów reagowania na sytuacje awaryjne bez konieczności przeglądu konkretnego projektu elektrowni jądrowej. W ramach wniosku właściciel/operator może również wystąpić o wydanie Limited Work Authorizations (LWA). ESP nie jest wymagana przed złożeniem przez właściciela/operatora wniosku o COL, ale może być korzystna, ponieważ pozwoli rozstrzygnąć wszelkie szczególne kwestie związane z bezpieczeństwem obiektu przed złożeniem wniosku o COL. W obecnej chwili NRC wydała 6 opinii ESP, a jeden będący w ocenie został wycofany przez wnioskodawcę. Spośród sześciu opinii ESP ostatnia została wydana w grudniu 2019 roku, a jej podjęcie było żmudnym działaniem trwającym 3,5 roku; w przypadku przedostatniej było to 6 lat (2016); czwartej 3 lata (2009), trzeciej, podobnie jak drugiej oraz pierwszej raportowanej w tym wieku – 3,5 roku (wszystkie wydane w roku 2007). Proces podjęcia

decyzji składa się z trzech faz: ocena bezpieczeństwa jądrowego, ocena środowiskowa, obowiązkowe przesłuchania przed komisją.

W przypadku COL złożony w 2020 roku wniosek dotyczący mikroreaktora, który miał być budowany na terenie Idaho National Laboratory (firma Oklo Power LLC), został odrzucony w roku 2022 ze względu na to, że Oklo nie dostarczyło NRC niezbędnych informacji na temat reaktora, co nie pozwoliło personelowi NRC na ustalenie harmonogramu działań i przeprowadzenie pełnego przeglądu niestandardowej aplikacji licencji łączonej reaktora Aurora.

Najbardziej interesujący jest przypadek wniosku, który złożyła firma Southern Nuclear Operating Company (SNC) 28 marca 2008 roku o licencje łączone na dwa zaawansowane pasywne reaktory wodne AP1000 dla bloków 3 i 4 elektrowni Vogtle Electric Generating Plant (VEGP). W dniu 22 października 2009 roku SNC uzupełniła swój wniosek o COL, składając wniosek o udzielenie ograniczonego zezwolenia na prowadzenie działań w celu uzyskania zgody na wykonanie wybranych prac budowlanych. COL i LWA wydano dla elektrowni Vogtle Electric Generating Plant (VEGP) – bloki 3 i 4, w dniu 10 lutego 2012 roku. Vogtle Unit 3 rozpoczął komercyjną eksploatację w lipcu 2023, a Unit 4 w marcu 2024 roku.

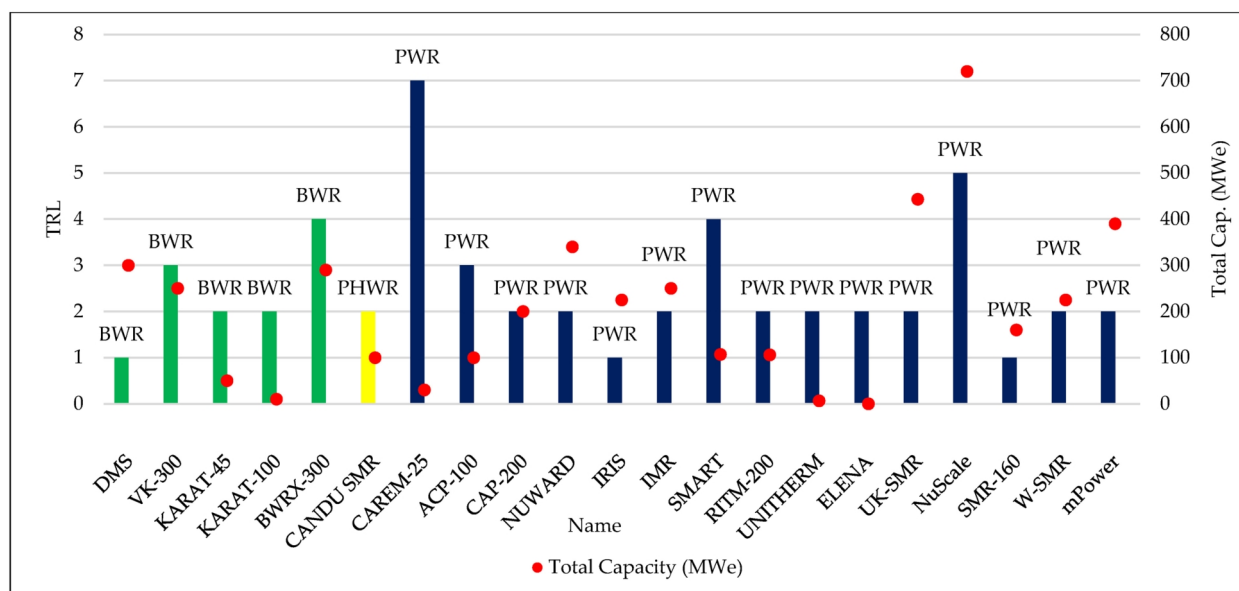
Ciekawym uzupełnieniem wcześniej omówionego raportu NW Pacific NL jest publikacja [15] szeregująca proponowane rozwiązania SMR według ich statusu w skali TRL i mocy (rys. 4, 5, 6). Ponieważ jest ich zbyt wiele, aby je opisywać w niniejszym artykule, odsyłamy czytelnika do publikacji IAEA katalogującej te rozwiązania [16].

HGTR-PM o mocy 210 MWe, który pracuje w Shidao Bay, ma najwyższą wartość TRL wynoszącą 8. Ten demonstracyjny moduł reaktora chłodzonego gazem ze złożem nasypowym został podłączony do sieci.

Rosyjski reaktor BREST-OD-300 jest w fazie rozwoju TRL 3. Jest to reaktor na prędkich neutronach chłodzony ołowiem, który jest obecnie budowany w Siewiersku w Federacji Rosyjskiej i ma być uruchomiony w roku 2026. Jest to próba demonstracji prototypu architektury przyszłego reaktora o dużej mocy, która pozwoli na zastosowanie zamkniętego jądrowego cyklu paliwowego. W reaktorze na stopionych solach typu SMR jest stosowana sól otrzymana na bazie fluorku lub chlorku. Paliwo może być paliwem w formie struktury stałej lub płynnej, gdy paliwo jest rozpuszczone w soli nośnej. Naturalne bezpieczeństwo stosowania soli, dla stworzenia niskociśnieniowego, jednofazowego układu chłodzenia, który nie wymaga pełnej hermetyzacji tego wysokotemperaturowego systemu, zapewniającego wysoką wydajność procesu, oraz zamknięty cykl paliwowy to tylko kilka z korzyści, jakie wykazują tego typu SMR-y. W Kanadzie, Wielkiej Brytanii i w Stanach Zjednoczonych kilka projektów takich SMR-ów jest

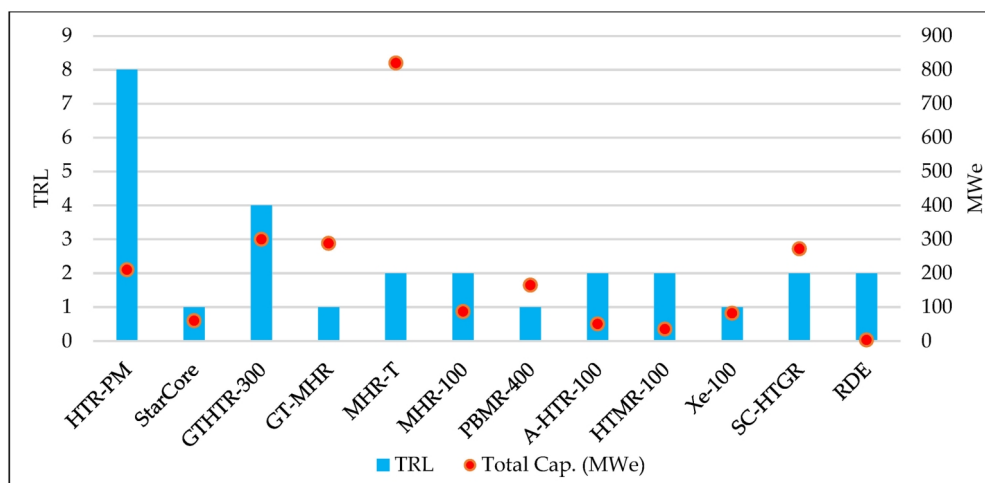
¹ <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/col.html>

² <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/esp.html>



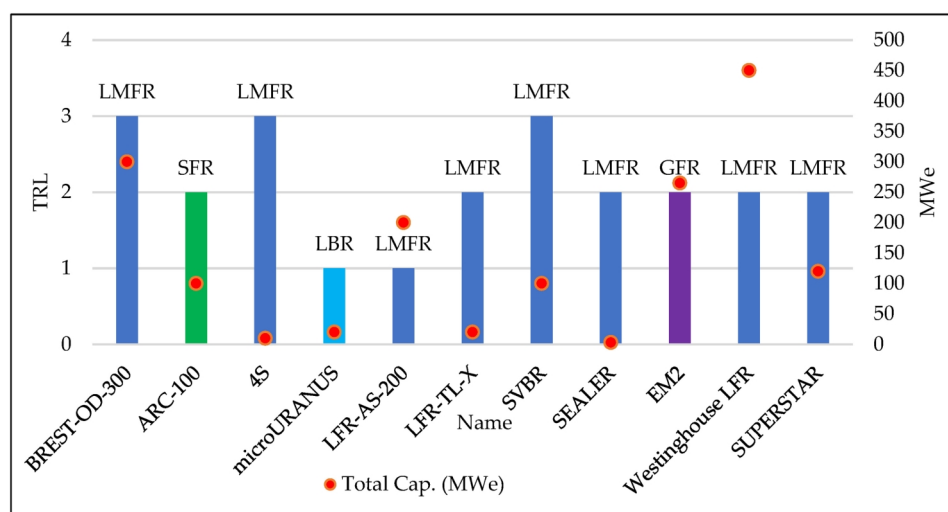
Rys. 4. Ocena poziomu TRL dla wybranych SMR [15].

Fig. 4. Evaluation of TRL for selected SMRs [15].



Rys. 5. Ocena poziomu TRL dla HTGR SMR [15].

Fig. 5. Evaluation of TRL for HTGR SMR [15].



Rys. 6. Poziom TRL dla reaktorów wykorzystujących neutrony prędkie [15].

Fig. 6. TRL for fast neutrons reactors [15].

we wstępnej fazie analiz licencyjnych. Większość SMR-ów tej technologii jest nadal w fazie projektowania koncepcyjnego (TRL 2). Tylko jeden reaktor, Fuji, zaprojektowany przez Międzynarodowe Forum Stopionej Soli Toru (ITMSF), ma wskaźnik TRL 3.

Podsumowując ten przegląd, można stwierdzić, że jest kilka SMR-ów, które znajdują się w facy rozwoju TRL 5 (tab. 4).

Oczywiście w tym przypadku najlepsza dostępna wiedza dotyczy pierwszego z SMR-ów na tej liście.

Warto też wspomnieć o raporcie NEA (I tom), który ta Agencja nazywa pulpitem nawigacyjnym po małych reaktorach modułowych. Pierwszy z nich zawiera analizę 21 projektów SMR oraz opis postępów na drodze do ich wdrożenia i komercjalizacji [17]. Zestawienie tablicy wskaźników NEA SMR wykracza poza poziom gotowości technologicznej i ocenia postępy w zakresie sześciu dodatkowych warunków podstawowych: gotowości do licencjonowania, lokalizacji, finansowania, łańcucha dostaw, zaangażowania i paliwa. W połączeniu z ocenami gotowości technicznej ujawnia on, które technologie i projekty SMR szybko przechodzą od koncepcji do komercjalizacji, na różnych rynkach na całym świecie. Drugi tom [18] jest kolejnym kamieniem milowym w bieżących wysiłkach Agencji Energii Jądrowej OECD (NEA) na rzecz kompleksowej oceny osiągniętego postępu na drodze do komercjalizacji i wdrożenia technologii SMR. Drugi tom nie stanowi aktualizacji zestawu reaktorów ocenianych w tomie pierwszym, zawarte w nim informacje rozszerzają tę samą metodologię na kolejne 21 projektów SMR z całego świata, według stanu wiedzy uzyskanej na 21 kwietnia 2023 roku. Oceny w żaden sposób nie odzwierciedlają opinii OECD lub NEA, lecz są oparte na ocenach przygotowanych wspólnie z projektantami poszczególnych rozwiązań. Publikacje te nie podają wartości TRL dla poszczególnych rozwiązań, ale wzbogacają taką ocenę w dodatkowe, wyżej wymienione informacje. Łącznie zatem z wcześniej przytoczonymi wartościami TRL stanowią wartościowy materiał porównawczy pomocny w działaniach analityków i instytucji zainteresowanych przyszłościowym wdrożeniem SMR-ów w różnych dziedzinach gospodarki.

5. Podsumowanie

Autor tej pracy miał okazję wysłuchać wykładu pana Davida A. Wrighta, komisarza Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (*Nuclear Regulatory Commission* – NRC). Pięciu komisarzy jest wyznaczanych przez prezydenta USA i ich kandydatury są zatwierdzane przez Kongres, podobne systemy kontroli społecznej i politycznej istnieją we Francji, Japonii i innych krajach. Komisja ta zajmuje się jedynie pokojowymi zastosowaniami technologii jądrowych, zatrudnia około 3000 pracowników i jej budżet roczny sięga miliarda dolarów. W każdej elektrowni jądrowej utrzymuje dwu rezydentów – inspektorów dozoru jądrowego. Proces licencjonowania elektrowni jądrowej z reaktorami nowego rodzaju (FOAK – *first of a kind*) trwa długo i jest kosztowny (*too long* według D.A. Wrighta, który nie zaprzeczył też, że licencjonowanie takiego pojedynczego obiektu (obejmujące związane z tym konieczne badania i prace rozwojowe) kosztuje wnioskodawcę około 15 milionów dolarów). NRC współpracuje blisko z National Laboratories, a projekty jądrowe są finansowane przez Department of Energy.

Trudno sobie wyobrazić wprowadzenie takiego systemu działania w Polsce, ale powinien on być analogiczny do stosowanego w państwach ościennych, takich jak Słowacja, Czechy czy Węgry. Tam odpowiedniki NRC są wspierane przez instytuty badawcze i uczelnie. Regulatorzy w tych krajach nie są w stanie zgromadzić takich środków ekonomicznych i ludzkich jak NRC, a sami nie mogą we właściwy sposób sprostać stawianym przed nimi zadaniom, nawet w mniejszej skali, ale o takiej samej wadze i odpowiedzialności w zakresie podejmowanych decyzji.

Wskazane w opracowaniu fakty wskazują na to, że działania dotyczące budowy elektrowni jądrowych muszą być dobrze przygotowane, a główny aspekt tych działań ma charakter techniczno-ekonomiczny (w nomenklaturze inżynierskiej muszą być opracowane założenia techniczno-ekonomiczne – ZTE). Dokument ten w dużej mierze obejmuje też oceny ekologiczno-społeczne. Jeśli chodzi o rozwój SMR, kluczowy dla wdrożenia jest poziom ich rozwoju określany w skali TRL. Przedstawiony w rozdziale 3 przykład ma naturę dydaktyczną, ilustruje etapy wdra-

Tabela 4. Wybrane SMR-y o TRL 5 [15].

Table 4. Selected SMRs at TRL 5 [15].

Nazwa	Typ	Moc (MWe)	Producent	Kraj	TRL
NuScale	PWR	12×60	GE-Hitachi Nuclear Energy	USA i Japonia	5
VBER-300	PWR (FNPP)	325	JSC "Afrikantov OKBM"	Rosja	6
CAREM-25	PWR	30	IRIS Consorsium	Argentyna	7
KLT-40S	PWR (FNPP)	2×35	JSC "Afrikantov OKBM"	Rosja	8
HTR-PM HTGR		210	INET, Tsinghua University	Chiny	8

zania trudnej technologii radiacyjnej według kolejnych punktów skali TRL, z wykorzystaniem zasad realizacji projektów inżynierskich, analogicznych do tych, które są stosowane w budowie elektrowni jądrowych.

Dowodem na ważność i konieczność wykonania technicznej oceny SMR są działania podjęte przez Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), która wdraża projekt „*Small Modular Reactor Readiness project overview*”. Wystartował on w 2023 roku i potrwa pięć lat. Fundusz projektu wynosi 50,7 milionów dolarów kanadyjskich. W ocenie wziętych zostanie pod uwagę wiele różnych parametrów i procedur [19].³ CNSC chce się przygotować do skutecznego i wydajnego regulowania SMR bez jakiegokolwiek uszczerbku dla wypracowanych zasad bezpieczeństwa, będzie też sponsorowało prowadzenie niezależnych badań przez jednostki zewnętrzne, uzyskanie wewnętrznej wiedzy specjalistycznej i przygotowania udokumentowanych zasad regulacyjnych, w obszarach wymienionych w dokumencie pod podanym powyżej linkiem tak, aby wspierać prowadzone przez tę instytucję działania licencjonowania. Podobne działania powinny być prowadzone i w Polsce, a działania zewnętrznych instytucji TSO finansowane np. z ustanowionych w tym celu programów NCBiR.

W raporcie Komisji Prezydenckiej w sprawie wypadku w Three Mile Island, Wydawnictwo Rządu USA, stwierdzono [20]: „Energetyka jądrowa wymaga szerokiego, zorganizowanego wsparcia naukowców i inżynierów”. Podkreślono, że należy zwrócić szczególną uwagę na

opracowanie, przegląd i nadzór nad procedurami stosowanymi w elektrowni tak, aby opierały się one zarówno na myśleniu inżynierskim, jak i na doświadczeniu eksploatacyjnym”. Ponadto, po awarii w Czarnobylu przeprowadzone przez doradców IAEA dochodzenie ustaliło, że procedury operacyjne nie zostały w zadowalający sposób oparte na analizach technicznych. Stwierdzono, że wymiana ważnych informacji dotyczących bezpieczeństwa między operatorami a organizacją wsparcia technicznego (TSO) była niewystarczająca i nie prowadziła do ich pełnego wykorzystania.

Podziękowanie. Dziękuję Panu Maciejowi Jurkowskemu, emerytowanemu Wiceprezesowi PAA, byłemu Głównemu Inspektorowi Dozoru Jądrowego, za wskazanie tego ważnego i ciekawego tematu. Był On dyrektorem Państwowego Inspektoratu Bezpieczeństwa Jądrowego i Radiacyjnego w latach, kiedy w Polsce były realizowane radiacyjne obiekty przemysłowe opisane w rozdziale trzecim.

Notka o autorze

Prof. dr hab. inż. Andrzej G. Chmielewski jest dyrektorem Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, będącego Collaborating Centre IAEA oraz wiceprzewodniczącym Rady Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej przy Prezesie PAA. Przez wiele lat pracował w Politechnice Warszawskiej, University of Tennessee, USA oraz Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, Wiedeń, Austria. W latach 1990–2011 był wiceprzewodniczącym i przewodniczącym Rady ds. Atomistyki przy Prezesie PAA. Pełnił funkcje prezesa PTN i SEREN, a także przez szereg lat był członkiem SAGNA, organu doradczego DDG NA IAEA.

Literatura

1. Projektowanie procesów technologicznych: od laboratorium do instalacji przemysłowej: praca zbiorowa pod redakcją Ludwika Synoradzkiego i Jerzego Wisiańskiego. Wydanie I – Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2019.
2. EERE R 540.112 -02: Technology Readiness Levels (TRLs), https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/EERE_R_540.11202_Technology_Readiness_Levels_%28TRLs%29.pdf
3. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Strazza C., Olivieri N., De Rose A., Stevens T. et al., Technology readiness level – Guidance principles for renewable energy technologies – Final report, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/577767>
4. Poziomy gotowości technologicznej we wnioskach NCBR. Rozporządzenie 1 grudnia 2023 <https://osf.opi.org.pl/baza-wiedzy/poziomy-gotowosci-technologicznej-wnioski-ncbr/>
5. Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 28 sierpnia 2020 r. w sprawie zadań Narodowego Centrum Badań i Rozwoju związanych z realizacją badań naukowych lub prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20200001495/O/D20201495.pdf>
6. Chmielewski A. G. & Zimek Z. (2019). Electron Accelerators for Research, Industry and Environment – the INCT Perspective. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237554>
7. Chmielewski A.G. (1995) Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process. *Radiat Phys Chem* 46:1057–1062.
8. Chmielewski A.G. Electron Beam Gaseous Pollutants Treatment Raporty IChTJ. Seria B nr 1/99; Warszawa. 1999. https://www.researchgate.net/publication/274125203_ELECTRON_BEAM_GASEOUS_POLLUTANTS_TREATMENT#fullTextFileContent
9. Chmielewski A.G., Tyminski B., Licki J., Iller E., Zimek Z., Radzio B. (1995). Pilot plant for flue gas treatment-continuous operation tests. *Radiat Phys Chem* 46:1067–1070.
10. Chmielewski A.G., Licki J., Pawelec A., Tyminski B., Zimek Z. (2004). Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment. *Radiat Phys Chem* 71:441–444.
11. Chmielewska D., Miskiewicz A., Smoliński T. Dynamiczny rozwój małych reaktorów modułowych (SMR) – sytuacja na świecie i w Polsce. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 3/2023: 7–10.
12. Thomas K., Gunzel Ch., Lahaye N. Emerging Technologies Review: Small Modular Reactors, Northwest Pacific Laboratory, Richland, Washington April 2023.

³ <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/smr/four-pillars/#sec3>

13. GAO (Government Accountability Office). 2020. Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects. Accessed online on 4 February 2023 at <https://www.gao.gov/assets/gao-20-48g.pdf>.
14. NRC (Nuclear Regulatory Commission). 2021. Generic Schedules. Accessed online on 25 March 2023 at <https://www.nrc.gov/about-nrc/generic-schedules.html>.
15. Rahmanta M.A., Harto A.W., Agung A., Ridwan M.K. Nuclear Power Plant to Support Indonesia's Net Zero Emissions: A Case Study of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level and Levelized Cost of Electricity Comparing Method. *Energies* 2023,16, 3752. <https://doi.org/10.3390/en16093752>
16. SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY CATALOGUE 2024 Edition A Supplement to the non-serial publication: Small Modular Reactors: Advances in Developments 2024, https://aris.iaea.org/publications/SMR_catalogue_2024.pdf
17. The NEA Small Modular Reactor Dashboard. OECD 2023, NEA No. 7650, NUCLEAR ENERGY AGENCY ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_78743/the-nea-small-modular-reactor-dashboard?details=true
18. The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume II. OECD 2023 NEA No. 7657, NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2023-07/nea_7657_smr_dashboard_vol.2.pdf
19. Small Modular Reactor Readiness – 4 pillars, Canadian Nuclear Safety Commission, Date modified: 2024-12-19, <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/smr/four-pillars/#sec3>
20. Technical Support to Nuclear Power Plants and Programmes. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.28. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. VIENNA, 2018. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1824_web.pdf