

W POSZUKIWANIU SERYJNIE PRODUKOWANEGO REAKTORA XXI WIEKU

In the search for mass produced reactor of the twenty first century

Dariusz Witold Kulczyński

Streszczenie: Artykuł omawia propozycję budowy (modularnego) reaktora typu IMSR chłodzonego stopioną solą przez kanadyjską firmę Terrestrial Energy Inc. TEI przewiduje wprowadzenie reaktorów IMSR do seryjnej produkcji od połowy lat 20. XXI wieku.

Abstract: The article discusses Integral Molten Salt Reactor (IMSR®) proposed by Canadian company Terrestrial Energy Inc. TEI envisages mass production of IMSR reactors after 2025.

Słowa kluczowe: IMSR, Terrestrial Energy, Eksperyment MSRE, reaktor na stopioną sól, grafitowy moderator, stopiona sól, FLiBe (Fluor-Lit-Beryl), płynne substancje pochłaniające neutrony, niskowzbożony uran (LEU), Oak Ridge Nuclear Laboratories, Canadian Nuclear Laboratories, urząd regulacyjny energetyki jądrowej CNSC

Key words: IMSR, Terrestrial Energy, MSRE experiment, graphite moderator, molten salt reactor, molten salt, FLiBe (Fluor-Lithium-Beryllium), liquid neutron absorbing materials, Low Enriched Uranium (LEU), Oak Ridge Nuclear Laboratories, Canadian Nuclear Laboratories, Canadian Nuclear Safety Commission CNSC

Małe reaktory na stopionych solach

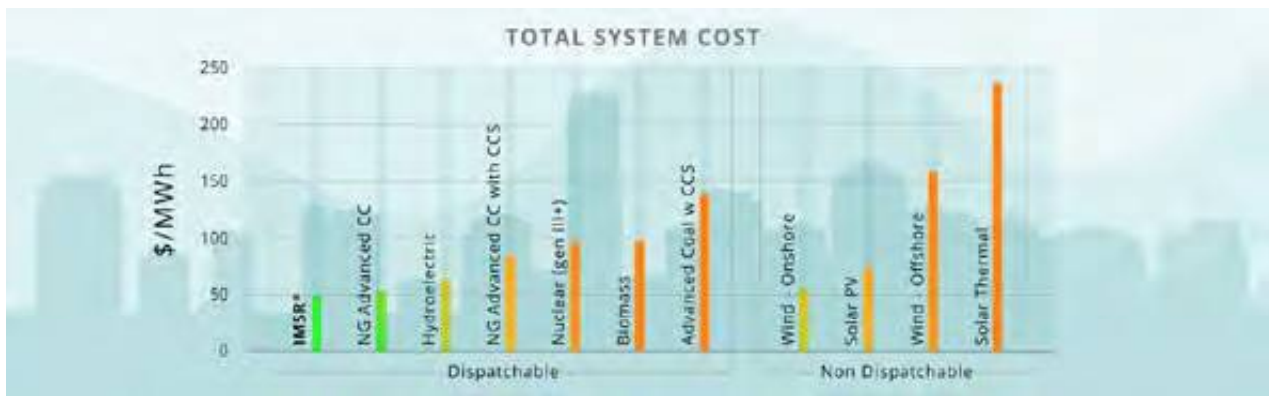
Energetyka tak konwencjonalna, jak jądrowa zawsze dążyła do budowy coraz większych bloków w celu obniżenia kosztów jednostkowych energii. W ostatnich latach okazuje się jednak, że małe reaktory jądrowe mogą cieszyć się w XXI dużą popularnością i to właśnie ze względu na ich niższe koszty kapitałowe.

Od kilku lat kanadyjska firma Terrestrial Energy Inc. (TEI) propaguje reaktory typu Integral Molten Salt Reactor (IMSR) – chłodzone mieszkanką stopionej soli – zazwyczaj fluorków litu, sodu czy berylu – zamiast wody i wykorzystujących paliwo w postaci nisko-wzbożonego uranu (stopionego fluorku uranu UF_4 o zawartości U-235 poniżej 5%).

Reaktor składa się z umieszczonego w kadzi ciepłego rdzenia, którym jest niskociśnieniowa mieszanina stopionej soli i nisko-wzbożonego uranu (LEU). Pompy cyrkulacyjne zintegrowane z kadzią rdzenia zapewniają przepływ mieszkanki paliwowo-solnej przez wymienniki ciepła. W kadzi znajduje się także grafitowy moderator. Wyłączenie pomp (utrata cyrkulacji) powoduje odstawienie (wyłączenie) reaktora. Odprowadzanie ciepła odbywa się w trzech obiegach przez różne rodzaje stopionych soli. Trzeci obieg przepływa przez wytwornice pary wodnej napędzającej turbozespół. Istnieje też możliwość wykorzystania ciepła z trzeciego obiegu solnego do celów przemysłowych lub ogrzewczych.

Jako bezpieczne cechy takiego reaktora wymieniane są: ujemny współczynnik temperaturowy, niskie ciśnienie mieszkanki paliwowo-chłodzącej, możliwość odprowadzania ciepła powyłączeniowego za pomocą konwekcji naturalnej, stosunkowo niska gęstość mocy w rdzeniu, nadmiarowe („redundantne”) pręty bezpieczeństwa i pasywne pręty kontrolne aktywowane przez przepływ stopionej soli. Przy utracie wymuszonej cyrkulacji (np. w wyniku wyłączenia pomp) pręty kontrolne szybko odstawiają (wyłączają) reaktor. Dodatkowe zabezpieczenie stanowią umieszczone w rdzeniu puszkki zawierające płynne substancje pochłaniające neutrony. W przypadku wzrostu temperatury rdzenia puszkki się topią, a wprowadzone do obiegu pochłaniacze neutronów zatrzymują reakcję łańcuchową. Awaria systemów sterowania lub podwyższenie reaktywności powoduje stabilizację reaktora przy nieco wyższej temperaturze, a mieszanina paliwowo solna odprowadza przejściowy wzrost ciepła i ciepło rozpadu promieniotwórczego. Stopiona sól dobrze wiąże produkty reakcji łańcuchowej.

Według firmy TEI zaprojektowane przez nią reaktory IMSR mają się charakteryzować najniższymi ze wszystkich technologii kosztami wyprodukowania jednej megawatogodziny (\$50/MWh). Na razie są to przewidywania, ponieważ wspomniana firma złożyła dopiero projekt koncepcyjny bloku o mocy elektrycznej około 200 MW do wstępnej oceny przez regulatora kanadyjskiego CNSC. Faza I tego przeglądu została pomyślnie zakończona w listopadzie 2017.



Rys. 1. Porównanie kosztu 1 MWh dla różnych technologii według danych szacunkowych firmy TEI

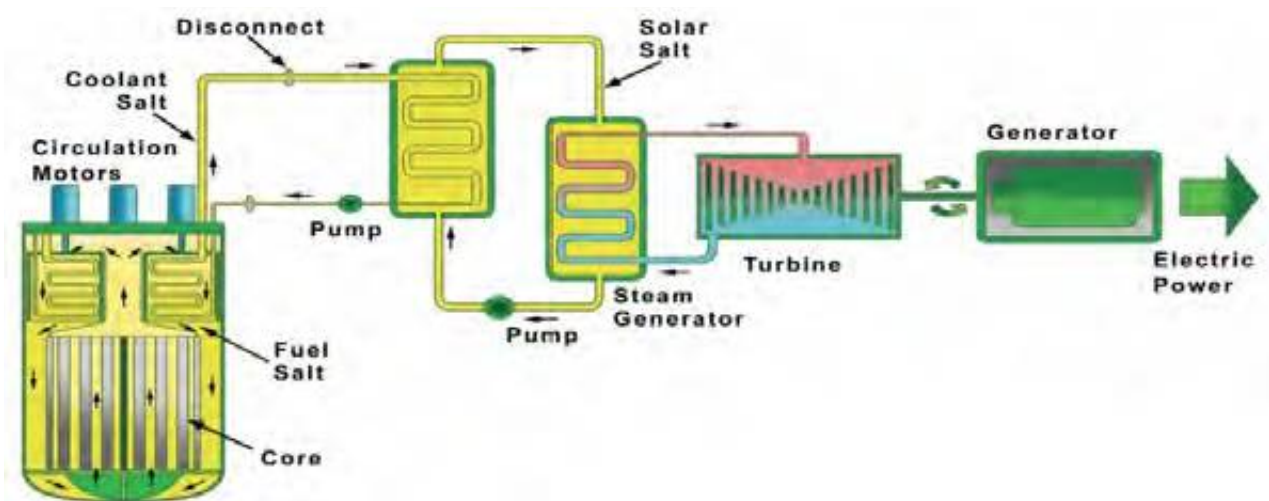
Fig. 1. Comparison of unit energy costs for various technologies (source: Terrestrial Energy Inc.)

Paliwo i chłodziwa reaktora IMSR

Koncepcja IMSR oparta jest na eksperymencie MSRE (Molten Salt Reactor) przeprowadzonym w latach 60. XX wieku w amerykańskim laboratorium Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [3]. W latach 80. powstał bardziej zaawansowany projekt reaktora chłodzonego stopioną solą (DMSR — Denatured Molten Salt Reactor), ale nie został zrealizowany.

Ze względu na tajemnicę przemysłową TEI nie udostępnia zbyt wielu szczegółów technicznych dotyczących reaktora IMSR. Wiadomo, że w procesie technologicznym będą zastosowane trzy rodzaje soli w trzech obiegach: sól paliwowa (Fuel Salt), sól chłodząca (Coolant Salt) i sól trzeciego obiegu (Solar Salt). Ta ostatnia stopiona sól przepływa przez wytwornice pary (Steam Generators), gdzie powstaje para wodna napędzająca turbinę kondensacyjną wraz z generatorem elektrycznym. Parę można też wykorzystać bezpośrednio do procesów przemysłowych. Wobec braku danych szczegółowych reaktora IMSR można zajrzeć

do gruntownie udokumentowanego eksperymentu MSRE [3] i do opisu projektu DMSR [4]. Sól chłodząca w eksperymencie MSRE osiągała temperatury rzędu 650°C. To znacznie więcej niż jest to możliwe przy reaktorach chłodzonych wodą (PWR czy PHWR – CANDU). Dlatego para świeża w bloku IMSR będzie miała wyższe parametry, co podniesie sprawność termiczną obiegu. W reaktorach IMSR firma Terrestrial Energy Inc. stosuje zapewne podobny skład soli jak zaproponowano w projekcie DMSR (związek litu, fluoru, berylu, cyrkonu i uranu dla soli paliwowej oraz litu, fluoru i berylu FLiBe dla soli chłodzącej drugiego obiegu). Zanieczyszczenia ciekłej soli związkami powodującymi utlenianie, jak również obecność fluorku uranu powodują korozję, czemu przeciwdziała się przez odpowiedni dobór materiałów (Hastelloy-N w eksperymencie MSRE) i kontrolę chemiczną stopionej soli. Ta sól jest stabilna chemicznie, skutecznie wiąże produkty rozszczepienia uranu i plutonu i ma doskonałe współczynniki przekazywania ciepła co według TEI w sposób zasadniczy podnosi bezpieczeństwo ich reaktora.



Rys. 2. Schemat ideowy reaktora IMSR według TEI

Fig. 2. IMSR reactor flow diagram (source: Terrestrial Energy Inc.)

Innowacyjne rozwiązania zaproponowane przez TEI

Innowacyjność rozwiązań zaproponowanych przez TEI polega na zintegrowaniu moderatora i soli paliwowej w jednym module przeznaczonym do wieloletniej pracy.

Trwałość grafitowego moderatora przy wyższych mocach na jednostkę objętości rdzenia ulega redukcji co firma Terrestrial Energy Inc. wymienia na swoich stronach internetowych jako problem technologii reaktorów na stopionej soli. Aby temu zaradzić TEI proponuje niższą gęstość mocy i wymianę moderatora razem z zużytą stopioną solą rdzenia po siedmiu latach eksploatacji. Projektowane bloki mają dwa miejsca w osłonie bezpieczeństwa zarezerwowane na kadzie rdzeni

zawierające mieszankę paliwową i grafit moderatora. Pracujący rdzeń jest podłączony do reszty bloku, zaś obok niego znajduje się rdzeń usunięty w poprzednim 7-letnim cyklu. Po kolejnych siedmiu latach, gdy przychodzi czas na kolejną wymianę, schłodzoną i już nieco mniej aktywną zawartość starszego rdzenia (mieszankę soli paliwowej i wychwyconych przez tę sól produktów reakcji łańcuchowej) będzie się bezpiecznie wypompywać do odpowiednio ekranowanych naczyń transportowych. Wypompowana zawartość starszego rdzenia wraz z opróżnioną kadzią reaktora będą przetransportowane do permanentnych składów odpadów jądrowych. TEI uważa, że masowa produkcja rdzeni do reaktorów IMSR znacznie obniży ich koszt.



Rys. 3. Rysunek elektrowni jądrowej z reaktorem IMSR według TEI
Fig. 3. IMSR reactor power plant (source: Terrestrial Energy Inc.)

Reaktory IMSR na rynku w latach dwudziestych XXI wieku

Firma TEI ma nadzieję, że ze względu na niskie koszty kapitałowe, bezpieczeństwo eksploatacji, siedmioletni cykl paliwowy i łatwość obsługi niewielkie reaktory IMSR (około 400 MWt i około 200 MWe) będą masowo wprowadzane do eksploatacji w drugiej połowie lat dwudziestych. Aby tak się jednak stało pierwszy reaktor IMSR musi zostać wybudowany i uruchomiony w ciągu najbliższych kilku lat.

W listopadzie 2017 r. kanadyjski urząd regulacyjny energetyki jądrowej (Canadian Nuclear Safety Commission - CNSC) zakończył pierwszą fazę przeglądu założeń konstrukcyjnych reaktora IMSR tzw. *prelicensing vendor design review*. Na życzenie firmy TEI urząd regulacyjny CNSC dokonał wspomnianego przeglądu na podstawie dokumentu GD-385. Podstawowym celem takiej wstępnej oceny jest poinformowanie producenta reaktora (w tym wypadku TEI), czy generalny kierunek jego konstrukcji może być do zaakceptowania przez urząd regulacyjny, a jeśli nie, to jakie zmiany producent musi wprowadzić, aby przyszły proces ubiegania się o licencje (zezwolenia) przebiegał sprawnie. Faza 1 wstępnej oceny konstrukcji reaktora IMSR firmy Terrestrial Energy Inc. rozpoczęła się w kwietniu 2016 r. Wynik oceny ani nie zatwierdza konstrukcji reaktora, ani nie ma wpływu na wynik rozpatrywania podań o wydanie zezwoleń, kiedy producent będzie starał się wybudować i uru-

chomić swój reaktor. Warto przypomnieć, że zgodnie z kanadyjską ustawą o bezpieczeństwie jądrowym *Nuclear Safety and Control Act* urząd regulacyjny CNSC musi wydać dla każdej elektrowni jądrowej w ciągu całego okresu jej istnienia następujące zezwolenia:

- 1) Zezwolenie/Licencja na przygotowanie placu budowy (Licence to Prepare Site)
- 2) Zezwolenie/Licencja budowlana (Licence to Construct) - wymaga przedstawienia wstępnego Raportu Bezpieczeństwa (preliminary Safety Analysis Report)
- 3) Zezwolenie/Licencja na eksploatację (Licence to Operate) - wymaga przedstawienia ostatecznego Raportu Bezpieczeństwa (Final Safety Analysis Report)
- 4) Zezwolenie/Licencja na wycofanie z eksploatacji (Licence to Decommission)
- 5) Licencja na rekultywację terenu (Licence to Abandon)

TEI współpracuje z wieloma firmami i organizacjami w Kanadzie takimi jak Ontario Power Generation Inc., Bruce Power, University of New Brunswick, Organization of Canadian Nuclear Industries i Canadian Nuclear Laboratories (dawniej AECL-CRNL) gdzie być może po 2020 r. zostanie wybudowany pierwszy reaktor IMSR w Kanadzie. Amerykańska filia Terrestrial Energy USA równolegle podejmuje działania w Departamencie Energii i w Urzędzie Regulacyjnym (NRC), ponieważ TEI planuje sprzedaż swoich produktów w całej Ameryce Północnej.

Bezpieczne i niedrogie

Tamą dla rozwoju energetyki jądrowej są kosztowne systemy zabezpieczeń od postulowanych w Raporcie Bezpieczeństwa incydentów takich jak stopienie rdzenia wskutek niedostatecznego chłodzenia (wypadki w Three Mile Island 1979 czy Fukushima Daiichi 2011).

Producenci reaktorów tzw. III+ i IV generacji starają się więc opracowywać maksymalnie niezawodne układy zabezpieczeń, które wykorzystują prawa fizyki w przypadku awarii np. 'pasywny system chłodzenia'. Kanadyjska firma Terrestrial Energy Inc. (TEI) twierdzi, że opracowany przez nią reaktor będzie rozwiązaniem bezpiecznym i atrakcyjnym ze względów ekonomicznych.

Znaczenie energii jądrowej dla klimatu

Rynek energii w skali światowej to obroty rządu 5 bilionów dolarów amerykańskich rocznie, z czego 85% stanowią paliwa kopalne. W październiku 2017 r. środki masowego przekazu w wielu krajach opublikowały wyniki pomiarów atmosferycznego CO₂, którego stężenie jest najwyższe od tysiący lat.

W myśl uznanej teorii, aby zapobiec katastrofie ekologicznej do 2050 r., ludzkość musi zmniejszyć emisję dwutlenku węgla o 80% w stosunku do obecnego poziomu. Na skalę przemysłową może to umożliwić jedynie hydroenergetyka i energetyka jądrowa. Moc elektrowni wodnych jest proporcjonalna do spadku i przepływu rzek i z tego powodu podlega ograniczeniu geograficznemu dla większości państw świata. Energetyka jądrowa nie posiada podobnych ograniczeń pod warunkiem istnienia źródeł wody (do chłodzenia skraplaczy i wymienników ciepła lub pokrywania strat w obiegu zamkniętym chłodzenia kondensatorów). Jednak problemem wielkich bloków jądrowych energetyki zawodowej jest eskalacja kosztów budowy i eksploatacji ze względu na specjalne systemy zabezpieczeń. Jednocześnie opóźnienia rozruchu wielkich jednostek (takich jak francuski EPR) powodują wielomiliardowe straty i nieopłacalność elektrowni jądrowych. Obniżenie kosztów energetyki jądrowej jest jedyną szansą jej upowszechnienia i rzeczywistej redukcji emisji CO₂. Warto zauważyć, że nawet jeżeli ktoś nie wierzy w tzw. efekt cieplarniany to redukcja użytkowania paliw organicznych zmniejsza emisję toksycznych tlenków azotu i siarki i innych składników 'smogu', powodujących szereg chorób układu oddechowego, szczególnie astmę i przedwczesną śmierć wielu tysięcy ludzi. Zwiększenie udziału energii jądrowej w zaspokojeniu zapotrzebowania mocy miałoby bardzo pozytywny wpływ na jakość powietrza. Opisany w artykule reaktor IMSR na ciekłej soli może stanowić ważny krok w tym kierunku.

Małymi i średnimi reaktorami są bardzo zainteresowane firmy chcące sprzedawać elektryczność i ciepło w odległych rejonach Kanady i USA poza zasięgiem sieci elektro-energetycznej.

Firma TEI terminowo osiąga planowane cele. W 2015 r. powstał projekt koncepcyjny IMSR. Jego wstępny przegląd (faza 1) został zakończony przez kanadyjski dozór jądrowy (urząd regulacyjny) CNSC. Trwają dalsze prace

projektowe i rozmowy na temat umiejscowienia budowy pierwszego takiego reaktora w Kanadzie. Jeśli zakończy się to sukcesem i masowa produkcja rdzeni doprowadzi do obniżenia kosztów budowy i eksploatacji IMSR to w połowie lat dwudziestych możliwy jest prawdziwy renesans nuklearny w Kanadzie i w USA.

*mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński,
emerytowany inżynier elektrowni jądrowej Darlington,
Kanada*

mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński jest absolwentem VI L.O. im. Tadeusza Reytana. Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1977 r. Od 1981 r. przebywa w Kanadzie, gdzie przez 33 lata pracował w pionie technicznym elektrowni jądrowych z ciężko-wodnymi reaktorami CANDU (przez 6 lat w szkoleniu i w elektrowni jądrowej NPD w Rolphton, a przez kolejne 27 lat w elektrowni jądrowej Darlington: 4 x 930 MWe). O energetyce jądrowej pisał w artykułach opublikowanych w „Wiadomościach Elektrotechnicznych”, „Gazecie Wyborczej”, „Postępiech Techniki Jądrowej”, „Biuletynie Radiologicznym”, witrynie CIRE i w Nuclear Engineering International (UK):

Autor artykułu należy do osób czynnie włączających się w dyskusje o energetyce jądrowej w Polsce. Wygłosił w Polsce szereg wykładów; był m.in. prelegentem na konferencji NOT „Rozwój energetyki atomowej w Polsce” w grudniu 2007 r., II Kongresie Energetyki Jądrowej na Politechnice Warszawskiej 22-24 maja 2012. Dwukrotnie wygłaszał także referaty na Konferencjach Gospodarczych Polonii (2004 i 2012). Jest autorem przeglądu Programu Polskiej Energetyki Jądrowej dla Nuclear Engineering International Magazine (artykuł „Planning for a Nuclear Poland” NEI, April, 2014).

Literatura:

- [1] Nuclear induced fission; fission reactors - PHYS 314 Nuclear Physics and Radioactivity ; by Dr Barbara Sawicka, UVIC Spring 2017
- [2] <http://www.terrestrialenergy.com/imsr-technology/> (data dostępu: listopad 2017)
- [3] http://www.energyfromthorium.com/pdf/NAT_MSREexperience.pdf PAUL N. HAUBENREICH and J. R. ENGEL, oak Ridge National Laboratory, oak Ridge, Tennessee TTBS7, Revised September 19, 1969 (data dostępu: listopad 2017)
- [4] Nuclear Engineering Handbook, Second Edition, Kenneth D. Kok et al, CRC Press, Nov 3, 2016
- [5] ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS, 2016 Edition A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org> (NOTE: the supplement is not an official IAEA publication and has not undergone an official review by the IAEA)
- [6] Sylvie. Delpecha, Céline Cabetb, Cyrine Slima, Gérard S. Picarda, Molten Fluorides for Nuclear Applications, a LECIME, Laboratoire d'Electrochimie, de Chimie des Interfaces et de Modélisation pour l'Energie, CNRS-UMR7575 - ENSCP - 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 PARIS CEDEX 05, France
- [7] Nuclear Safety and Control Act, Class I Nuclear Facilities Regulations SOR/200-204 31 May, 2000
- [8] GD-385 <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/regulatory-documents/published/html/gd385/index.cfm> (data dostępu: listopad 2017)