

## Reaktor wędrującej fali TWR

### Traveling wave reactor TWR

Wojciech Kramarek<sup>1</sup>\* 

<sup>1</sup> Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie

\*Kontakt / Correspondence: [wojciech.kramarek@gmail.com](mailto:wojciech.kramarek@gmail.com)

#### Streszczenie:

Koncepcja reaktora wędrującej fali (traveling wave reactor, TWR) daje nadzieję na przełom w dążeniu do bezpiecznej, niskoemisyjnej energetyki sprzyjającej zrównoważonemu rozwojowi, wspierającej przeciwdziałanie zmianom klimatycznym oraz redukcję ubóstwa energetycznego. Technologia TWR rozwiązuje kluczowe problemy obecnej energetyki jądrowej: pozwala na „wypalanie” niebezpiecznych odpadów radioaktywnych i drastycznie ogranicza ryzyko proliferacji broni. TWR może pracować bez wymiany wkładu przez 40–60 lat. Pasywne systemy bezpieczeństwa minimalizują ryzyko awarii, a magazynowanie ciepła w stopionej soli umożliwia bezproblemową integrację elektrowni z OZE.

**Słowa kluczowe:** TWR, reaktor wędrującej fali, wypalanie odpadów radioaktywnych

#### Abstract:

The traveling wave reactor (TWR) concept offers hope for a breakthrough in the pursuit of safe, low-emission energy that fosters sustainable development, supports climate change mitigation, and reduces energy poverty. TWR technology solves key challenges facing current nuclear power: it allows for the „burnout” of hazardous radioactive waste and drastically reduces the risk of weapons proliferation. TWRs can operate without replacement for 40–60 years. Passive safety systems minimize the risk of failure, and molten salt heat storage enables seamless integration of the power plant with renewable energy sources.

**Keywords:** TWR, traveling wave reactor, radioactive waste burnout

## 1. Wprowadzenie

Pod koniec XX wieku Bill Gates wraz z grupą podobnie myślących ludzi troszczących się o rozwój ludzkości, opracowali program ukierunkowany na rozwój energetyki. Ustalono, że należy podjąć działania, aby przeciwdziałać narastającym zmianom klimatycznym wynikającym ze spalania paliw kopalnych. Stwierdzono, że rosnące gwałtownie zapotrzebowanie na energię elektryczną powinno być zrealizowane przez rozwój zaawansowanej energetyki jądrowej. Założono, że rozwój energetyki jądrowej doprowadzi do spadku cen energii elektrycznej przyczyniając się do wydobycia miliardów ludzi z ubóstwa.

Opracowane cele zakładały: zwiększenie bezpieczeństwa pracy reaktorów, zmniejszenie ilości odpadów radioaktywnych oraz dostosowanie produkcji energii elektrycznej do aktualnych potrzeb sieci. Ponadto zapewnienie niezależności energetycznej, zrównoważony rozwój środowiskowy oraz postęp medyczny w medycynie nuklearnej.

Opracowane rozwiązanie mają wprowadzać ulepszenia w jak największej liczbie obszarów działalności jądrowej: dotyczących bezpieczeństwa, odpadów, wydajności, ekonomii, odporności na rozprzestrzenianie broni, redukcji ryzyka terrorystycznego oraz ogólnej akceptacji społecznej.

Produktem odpadowym, bardzo niebezpiecznym, przy pracy konwencjonalnych zawodowych reaktorów jest pluton i jego izotopy. Służy on nie tylko do produkcji broni nuklearnej, ale jest również radioaktywnym odpadem trwającym dziesiątki tysięcy lat. Pojawienie się kilkanaście lat temu reaktorów powielających stworzyło szansę na „wypalanie” odpadów radioaktywnych. Ten proces mógłby pomóc w zmniejszeniu ilości odpadów z elektrowni jądrowych i zmniejszenia zagrożeń proliferacją. Większość plutonu z reaktorów jest częścią odpadów radioaktywnych, głównie w formie proszku dwutlenku plutonu. Ta forma przechowywania czyni ten składnik podatnym na kradzież i potencjalne wykorzystanie przy produkcji nielegalnej, terrorystycznej broni.

## 2. Traveling wave reactor TWR

Możliwość wykorzystania odpadów radioaktywnych do produkcji energii elektrycznej oraz zmniejszenie ich ilości na składowiskach były istotnymi powodami rozpoczęcia poszukiwań nowych typów reaktorów. Dzięki rozwojowi wiedzy dotyczącej energetyki jądrowej, nowym możliwościom obliczeniowym oraz nowym materiałom będą powstawały rozwiązania, które były niewyobrażalne jeszcze kilkadziesiąt lat temu.

Wybrany modelem docelowym został tzw. reaktor z wędrującą bieżącą (ang. traveling wave reactor, TWR), którego koncepcja (niezrealizowana) znana jest od wielu lat. Podstawową cechą proponowanego reaktora, zbliżonego w działaniu do reaktora powielającego, jest jego zdolność do przekształcania materiału rozrodzonego w użyteczne paliwo jądrowe na bieżąco i na miejscu w obrębie reaktora. W reaktorze natychmiast zaczyna się proces rozszczepienia wytworzonego materiału jądrowego (plutonu), wytwarzając energię i produkty rozpadu, bez konieczności wyjmowania paliwa z reaktora i jego przetwarzania.

TWR różni się od innych typów reaktorów tym, że pracuje z wysoką efektywnością energetyczną, bez konieczności wzbogacania używanego paliwa, ani przeprowadzania jakiegokolwiek przetwarzania. Paliwem będzie uran naturalny, uran zubożony, tor lub wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych.

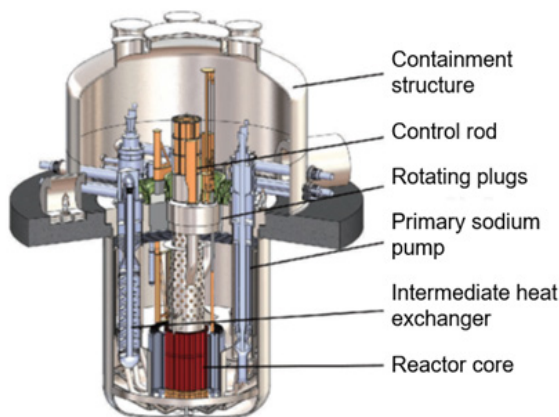
Powstającą koncepcję TWR oparto na kilku założeniach:

1. Musi być reaktorem powielającym.
2. Do procesu rozpadu paliwa i jego rozrodu wykorzystane zostaną neutrony szybkie.
3. Chłodzenie reaktora w oparciu o chłodziwo metaliczne.

## 3. Zasada działania reaktora TWR

Podstawową, wyróżniającą cechą reaktora TWR jest zdolność do przetworzenia żywnego materiału w użyteczne, rozszczepialne paliwo jądrowe na miejscu, bezpośrednio w reaktorze. W reaktorze następuje natychmiast proces rozpadu wytworzonego materiału rozszczepialnego.

TWR różni się od innych typów reaktorów tym, że pracuje z dużą sprawnością energetyczną, bez potrzeby wzbogacania paliwa, ani prowadzenia procesu jego przetwarzania na zewnątrz reaktora. Paliwem może być naturalny uran, zubożony uran, tor albo wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych.

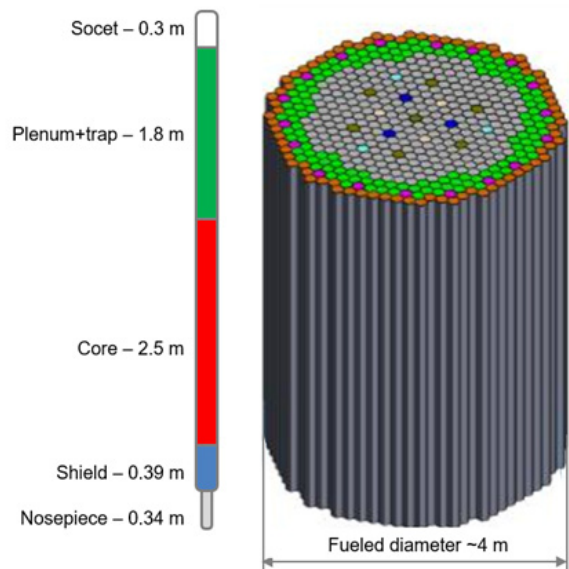


Rys. 1. Główne zespoły reaktora wędrującej fali [1]  
Fig. 1. Main components of a traveling wave reactor [1]

Konstrukcyjnie reaktor TWR jest zbliżony do konwencjonalnego reaktora powielającego na szybkich neutronach, chłodzonego sodem (rys. 1). W obiegu chłodzenia TWR przewidziano trzy pętle: podstawowa pętla chłodząca reaktor, pośrednia pętla, zabezpieczająca przed wyciekami sodu radioaktywnego oraz trzecia pętla chłodzenia, wodna, w której powstaje para kierowana na turbiny. Pętla pośrednia jest barierą izolującą obieg radioaktywny sodu od obiegu parowego.

TWR jest reaktorem typu basenowego, w którym podstawowe elementy systemu reaktora (rdzeń reaktora, pompy elektromagnetyczne, wymienniki ciepła) są umieszczone w dużym zbiorniku płynnego sodu pod niskim ciśnieniem. Korpus reaktora jest chroniony zewnętrzną obudową bezpieczeństwa.

Założono, że TWR będzie używał technologii typowych dla powielających reaktorów z kilkoma wyjątkami. Pręty paliwowe zostały zaprojektowane tak, aby umożliwić wentylację powstających w nich gazów w czasie pracy, do pierwszego chłodzącego obiegu sodu. W klasycznych rozwiązaniach pręty paliwowe są zamknięte szczelnie. Wentylacja pozwoli na głębokie wypalenie paliwa umożliwiając 40 lat pracy. W TWR będą stosowane kanały paliwowe innego typu niż w dotychczas używanych reaktorach, ich geometria będzie inna. Materiały stosowane do budowy rdzenia reaktora są specjalnie opracowanymi stopami stali poprawiającymi reaktywność.

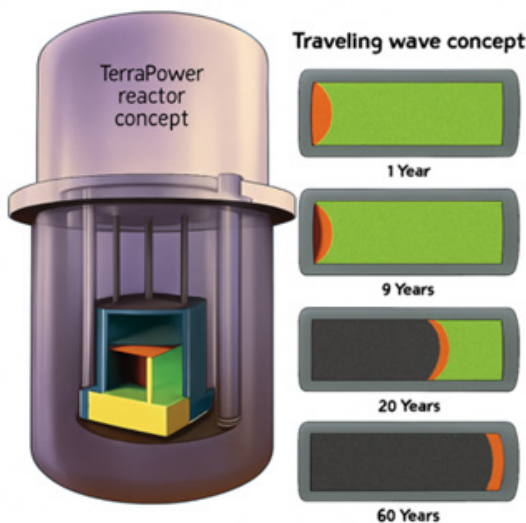


Rys. 2. Rdzeń reaktora TWR (wymiarzy dla obliczeniowej mocy nominalnej 1000 MW) oraz pręt paliwowy [2]

Fig. 2. TWR reactor core (dimensions for a rated power of 1000 MW) and fuel rod [2]

W reaktorze TWR w rdzeniu paliwowym znajduje się niewielka ilość prętów z paliwa rozszczepialnego U235 (rys. 2). Dookoła nich są umieszczone pręty zawierające nierozszczepialny U238. Po uruchomieniu reaktora reakcja rozszczepiania rozpoczyna się najpierw w prętach z U235. Równocześnie w przyległych do nich prętach z uranem U238 następuje przemiana materiału rozrodzonego w Pu239, czyli wspaniałe paliwo jądrowe. Pluton następnie podlega rozpadowi generując nowe neutrony oraz wydzielając ciepło. Powoduje też przemianę U-238 w kolejnych prętach

paliwowych w rozszczepialny U235 lub pluton. Prędkość rozszczepienia i jego intensywność będzie regulowana, podobnie jak w istniejących klasycznych reaktorach, przez zmianę położenia w rdzeniu prętów regulacyjnych.



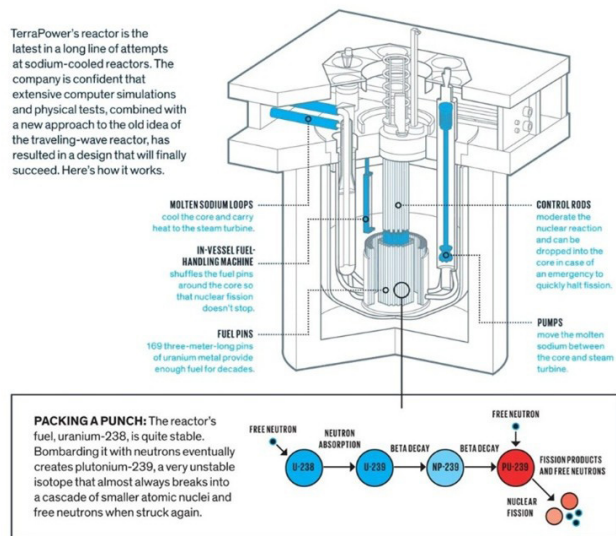
**Rys. 3.** Ideowa zasada pracy reaktora TWR: paliwo (zubożony uran) w hexagonalnych kanałach paliwowych, kolor zielony reprezentuje nieużyte paliwo, czarny zużyte paliwo, pomarańczowy falę rozpadu. Na podstawie [3]

**Fig. 3.** The ideological principle of operation of the TWR reactor: fuel (depleted uranium) inside the hexagonal pillars, green represents unused fuel, black spent fuel, orange fission wave. Based on [3]

W reaktorze następuje powolne przesuwanie strefy rozszczepienia paliwa w rdzeniu (rys. 3). Ta wędrująca fala, do której odnosi się nazwa reaktora, „przemieszcza się” przez rdzeń reaktora w kierunku promieniowym z prędkością zaledwie jednego centymetra na rok. Fala rozszczepienia wędruje przez rdzeń tworząc paliwo na bieżąco. TWR nie wymaga wyjmowania paliwa z rdzenia reaktora i przekształcania go w nowe paliwo. Wypalenie prętów najbliższych rdzenia reaktora spowoduje, że urządzenie sterujące umieszczone obok rdzenia reaktora przesuń je w najdalszy koniec palety z prętami, wstawiając na ich miejsce pręty, w których zaczęła zachodzić reakcja (tzw. handling machine – rys. 4). Zbiornik reaktora w tym czasie pozostaje zamknięty, bez przerywania pracy reaktora.

Przy pracy TWR powstaje nowe paliwo oraz materiały odpadowe (np.ubożony uran). Stan taki pozwala na długotrwałą, samowystarczającą pracę reaktora przez dziesięciolecia, eliminując potrzebę częstego uzupełniania paliwa i utylizacji odpadów. Reaktor nie wymaga wymiany prętów, dopóki we wszystkich nie wypali się paliwo, co powinno trwać według obliczeń, w zależności od wielkości reaktora i ilości prętów, od 40 do 60 lat. TWR potencjalnie może zużywać odpady radioaktywne z innych reaktorów lub ubożony uran, co zmniejsza ryzyko proliferacji broni atomowej.

Głównym problemem przy projektowaniu reaktora TWR jest dobór materiałów na zbiornik reaktora, rury z chłodziwem oraz na osłony prętów paliwowych. Dostępne stopy metali nie są w stanie pracować przez kilkadziesiąt lat w środowisku silnego promieniowania panującego w reaktorze z wędrującą falą.



**Rys. 4.** Schemat działania TWR [4]  
**Fig. 4.** TWR operation diagram [4]

#### 4. Bezpieczeństwo pracy projektowanego reaktora

W projektowanym reaktorze TWR przewidziano kilka poziomów ochrony zapewniających wielopłaszczyznowe bezpieczeństwo pracy reaktora. Reaktor TWR będzie wyposażony w system kontroli reaktywności oraz wielokrotnie redundantny, automatyczny system wyłączania awaryjnego. Gdyby reaktor nie został wyłączony ani przez pręty regulacyjne, ani przez pręty awaryjne, rdzeń reaktora TWR powinien się ustabilizować na poziomie mocy bliskiej zeru. Po wyłączeniu awaryjnym reaktor TWR ma układ stosunkowo prostego odprowadzanie ciepła z paliwa. Reaktor TWR będzie wykorzystywał do odprowadzania ciepła duży zbiornik niskociśnieniowego chłodziwa sodowego. Niskie ciśnienie, wysoka temperatura wrzenia chłodziwa sodowego oraz redundantne zbiorniki podziemne zdecydowanie zmniejszają ryzyko awarii związanej z utratą chłodziwa. Umieszczenie reaktora poniżej poziomu gruntu zwiększy bezpieczeństwo działania.

Przewidziano także zestaw czterech oddzielnych bezpośrednich, pomocniczych układów chłodzenia reaktora tzw. DRACS (direct reactor auxiliary cooling systems). Każdy DRACS składa się z prostej pętli chłodziwa z naturalną cyrkulacją, w której jeden wymiennik ciepła odprowadza ciepło z pierwotnego chłodziwa, a drugi wymiennik ciepła odprowadza to ciepło do atmosfery. Każde dwie pętle DRACS z czterech wystarczają do usunięcia całego ciepła rozpadu.

Reaktor transferuje wytworzone ciepło do stopionej soli, która może być magazynowana w zbiornikach. Nagromadzona energia w soli ma zostać wykorzystana do wytworzenia pary zasilającej turbiny. Technologia magazynowania może zwiększyć (w razie potrzeby) moc wyjściową systemu. Możliwość magazynowania energii pozwala elektrowni na bezproblemową integrację z odnawialnymi źródłami energii.

W projekcie przyjęto rozdzielenie wyspy energetycznej od bloku jądrowego. Gwarantuje to pełne oddzielenie zintegrowanych systemów magazynowania energii i produkcji energii od części jądrowej elektrowni. Rozdzielenie pozwala zespołom eksploatacyjnym na obsługę istotnych zespołów elektrowni, takich jak

turbiny parowe, generatory i zbiorniki soli, poza strefą kontroli jądrowej. Jest to bezpieczniejsze rozwiązanie niż układ połączony i obniży koszty budowy i eksploatacji.

## 5. Podsumowanie

Idea reaktorów TWR ma wprowadzić liczne ulepszenia w wielu obszarach. Z punktu widzenia bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju technologia TWR przedstawia następujące zalety względem konwencjonalnej energetyki jądrowej:

- gospodarka odpadami – reaktor TWR umożliwia „wypalanie” niebezpiecznych odpadów radioaktywnych, w tym plutonu, co znacząco ogranicza ich ilość na składowiskach oraz redukuje ryzyko proliferacji broni nuklearnej,
- efektywność energetyczna – dzięki fali rozszczepienia przemieszczającej się przez rdzeń, system może pracować z wysoką efektywnością nieprzerwanie przez 40–60 lat bez konieczności wymiany lub zewnętrznego wzbogacania paliwa,
- pasywne bezpieczeństwo – wykorzystanie niskociśnieniowego chłodziwa sodowego o wysokiej temperaturze wrzenia oraz redundantnych, naturalnych pętli chłodzenia DRACS minimalizuje ryzyko awarii związanych z utratą chłodziwa,
- integracja z OZE – zastosowanie magazynów ciepła w stopionej soli pozwala na elastyczne dostosowanie produkcji energii do potrzeb sieci i bezproblemową integrację z od-

nawialnymi źródłami energii,

- optymalizacja kosztów – rozdzielenie wyspy jądrowej od konwencjonalnej części energetycznej (turbiny, generatory) pozwala na prowadzenie prac serwisowych poza strefą kontroli jądrowej, co wymiennie obniża koszty eksploatacji.

## 6. Bibliografia

- [1] Gilleland, J., Petroski, R., & Weaver, K. (2016). The traveling wave reactor: design and development. *Engineering*, 2(1), 88-96. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.024>
- [2] Ahlfeld, C.E., Burke, T.M., Ellis, T.S., Hejzlar, P., Weaver, K., Whitmer, C., Gilleland, J.R., Cohen, M.E., Johnson, B.C., Mazurkiewicz, S.M., Mcwhirter, J.D., Odedra, A., Touran, N.W., Davidson, C., Walter, J., Zimmerman, G.B., Weaver, T., Schweiger, P., & Russick, R. (2011). Conceptual Design of a 500 MWe Traveling Wave Demonstration Reactor Plant
- [3] TerraPower. (2020). Sustainable Living through Nuclear Energy. All Sustainable Solutions, <https://allsustainable-solutions.com/terrapower-sustainable-living-through-nuclear-energy-and-science> (dostęp: 27 stycznia 2026).
- [4] Koziol, M. (2018). TerraPower’s Nuclear Reactor Could Power the 21st Century. The traveling-wave reactor and other advanced reactor designs could solve our fossil fuel dependency. *IEEE Spectrum*, <https://spectrum.ieee.org/terrapowers-nuclear-reactor-could-power-the-21st-century> (dostęp: 27 stycznia 2026).