



**Narodowe Centrum Badań Jądrowych**  
**National Centre for Nuclear Research**  
**Świerk**

# Perspektywy wykorzystania toru w energetyce jądrowej

**Narodowe Centrum Badań Jądrowych**

ul. Andrzeja Sołtana 7  
05-400 Otwock-Świerk

tel. +48 22 71 80 001  
fax +48 22 779 34 81

e-mail: [ncbj@ncbj.gov.pl](mailto:ncbj@ncbj.gov.pl)

[www.ncbj.gov.pl](http://www.ncbj.gov.pl)

## Perspektywy wykorzystania toru w energetyce jądrowej

prof. Stefan Chwaszczewski  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

W wielu krajach prowadzone są prace badawcze w zakresie wykorzystania toru w energetyce jądrowej. Popularne opracowania tematu rozbudzają nadzieje na:

1. wykorzystanie toru do budowy bezodpadowych i bezpiecznych reaktorów jądrowych;
2. wykorzystanie toru, jako surowca energetycznego uzupełniającego ograniczone zasoby uranu.

Prace badawcze nad torem prowadzone były także w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i poprzedzających je instytucjach w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka „Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym”. Prace te miały na celu zbadanie możliwości ulepszenia kampanii paliwowych – tradycyjnych uranowych reaktorów energetycznych (zwiększenia bezpieczeństwa oraz ekonomiki). Wyniki prac będą przedstawione na końcu niniejszego opracowania.

### **Czy wykorzystanie toru umożliwi budowę reaktorów bezodpadowych i bezpieczniejszych?**

Obecnie reaktory energetyczne pracują na paliwie uranowym, w skład którego wchodzi dwa izotopy uranu: U-235 i U-238. Rozszczepienie U-235 dostarcza energię i neutrony do samo-podtrzymującej się reakcji łańcuchowej. Część z tych neutronów jest przechwytywana przez U-238, w którym, w wyniku reakcji  $U-238(n,\gamma)$ , powstają izotopy plutonu i dalej, w wyniku przemian jądrowych wywołanych neutronami, izotopy ameryku, kiuru, berkeleu i kalifornu. Izotopy te są traktowane, jako niebezpieczny (radiotoksyczny) odpad i muszą być izolowane od ludzi i środowiska przez dziesiątki tysięcy lat.

Problemy związane z użyciem paliwa uranowego miałyby rozwiązać wprowadzenie toru, Th-232, jako zamiennika uranu U-238. Według tej koncepcji, po napromienieniu Th-232 neutronami nie powstawałby pluton i szkodliwe transuranowce, natomiast otrzymywalibyśmy rozszczepialny izotop U233 (analog U-235 w paliwie uranowym), w reakcji  $Th232(n,\gamma)$ .

Możliwość wytwarzania U-233 z Th-232 spowodowała powstanie mylącego skrótu myślowego **‘paliwo torowe’**. W wyniku napromieniania Th232 neutronami powstaje również izotop U232 (w wyniku reakcji  $Th232(n,2n)$ ). Zarówno U233 jak i U232, zawarte nieuchronnie w wypalonym paliwie reaktorowym z domieszką Th232, są wysoce radiotoksyczne gdyż same są emiterami cząstek  $\alpha$ , ponadto w szeregu rozpadu radioaktywnego U233 pojawiają radiotoksyczne emiterzy cząstek  $\alpha$  (Th229, Ac225, Fr221, At217, i Po213), a w szeregu radioaktywnego rozpadu U232 występuje izotop Tl208 emitujący bardzo przenikliwe promieniowanie  $\gamma$  o energiach kwantów 2,6MeV. Tak przenikliwe promieniowanie  $\gamma$  nastręcza olbrzymich trudności przy

przerobie paliwa reaktorowego z domieszką Th232. Okres zaniku radiotoksyczności szeregu rozpadu U233 wynosi powyżej **miliona lat**, a więc jest dłuższy niż okres zaniku radiotoksyczności plutonu – około **240 tysięcy lat**. **Bezodpadowy reaktor jądrowy wykorzystujący tor jest więc mitem.**

Pogląd o wyższości reaktorów wykorzystujących tor nad standardowymi uranowymi pod względem bezpieczeństwa również nie ma większego uzasadnienia. Prawdopodobnie wziął się on stąd, że użycie toru może zmniejszyć reaktywność wbudowaną reaktora na początku kampanii paliwowej o ok. 10% (piszemy o tym poniżej). Jednak we współczesnych reaktorach jądrowych reaktywność nie stanowi istotnego problemu pod względem bezpieczeństwa..

### **Czy możliwe jest wykorzystanie toru jako surowca energetycznego uzupełniającego ograniczone zasoby uranu?**

Obecna gospodarka uranem, jako surowcem w energetyce jądrowej jest wysoce nieefektywna. Do wytworzenia w elektrowni jądrowej 1 TWh energii elektrycznej ze środowiska wydobywa się około 20 ton uranu naturalnego. Dla porównania, dla wytworzenia tej samej ilości energii elektrycznej w elektrowniach zasilanych węglem kamiennym ze środowiska trzeba wydobyć powyżej 340 tys ton węgla a dla energetyki zasilanej węglem brunatnym – ponad milion ton. Cały szkopuł w tym, że z tych 20 ton uranu naturalnego przemianom jądrowym, w których wytwarzana jest energia, ulega tylko około 130 kg uranu! Reszta to uran zubożony – około 18 ton oddzielonych w procesie produkcji paliwa i około 2 ton w wypalonym paliwie. Oczywiście, przy tak nieefektywnej gospodarce uranem nie starczy go na dłużej niż ok. 100-200 lat.

Ten fakt posłużył do uzasadnienia opracowania technologii wykorzystania toru, jako perspektywicznego paliwa dla energetyki jądrowej, gdyż jego zasoby w skorupie ziemskiej są prawie czterokrotnie większe od zasobów uranu. Rozwiązanie tego zagadnienia nie jest proste. Uran posiada w niezwykle małej ilości jedyny w środowisku izotop rozszczepialny – U235. W wytwarzaniu energii wspomaga go wytwarzany z U238 pluton. Tor nie posiada takich walorów. Aby wykorzystać jedyny, w cyklu torowym izotop rozszczepialny – U233, trzeba tor napromieniować neutronami w działającym reaktorze jądrowym, następnie wyodrębnić ten izotop z napromienionych elementów torowych i wykonać z niego nowe paliwo.

Takie zadanie zostało podjęte w Indiach. Wprawdzie nie od zera, albowiem kraj ten posiadał zaawansowany przemysł jądrowy zbudowany w celach militarnych – konstrukcji broni jądrowej. Bezpośrednim powodem są znaczące zasoby krajowe toru – około 300 000 ton oraz znacznie mniejsze zasoby krajowego uranu – około 61 000 ton. Pośrednim powodem było embargo na dostawy do Indii materiałów i technologii jądrowych nałożone za podjęcie w Indiach jądrowego programu militarnego.

Indyjski program wykorzystania toru w energetyce jądrowej jest realizowany w trzech etapach:

1. Produkcji plutonu w reaktorach PHWR (reaktor kanałowy, moderator i chłodziwo – ciężka woda, paliwo – uran naturalny) – reaktor konstrukcji kanadyjskiej – CANDU;
2. Przerób wypalonego paliwa z reaktora PHWR, wyodrębnienie plutonu, wykorzystanie plutonu jako paliwa w reaktorze na neutronach prędkich do produkcji U233 z toru. Obecnie jest wykorzystywany doświadczalny reaktor na

neutronach prędkich – FBTR o mocy termicznej 40 MW. W budowie znajduje się prototypowy reaktor na neutronach prędkich Kalpakkam o mocy 500 MWe;

3. Przerób paliwa wyładowanego z reaktora na neutronach prędkich, wyodrębnienie U233, produkcja paliwa i wykorzystanie tego paliwa w PHWR. Wg oświadczeń odpowiedzialnej za program organizacji, dwie trzecie wytwarzanej w reaktorze PHWR energii pochodzi obecnie z paliwa wytworzonego z toru.

W stadium budowy znajduje się zaawansowany reaktor ciężkowodny AHWR o mocy 300 MWe, z pionowym ustawieniem kanałów paliwowych, przewidziany na 100 letni okres eksploatacji(!) – o specjalnej konstrukcji dla wykorzystania, jako materiału rozszczepialnego U233. Obecnie, wg oświadczeń indyjskich organizacji odpowiedzialnych za program, na bazie paliwa torowego jest wytwarzana moc 300 MW (nie podano czy to dotyczy mocy cieplnej czy elektrycznej).

Analiza konstrukcji reaktorów, pod kątem tzw. współczynnika konwersji, czyli stosunku wytwarzanych atomów materiału rozszczepialnego z materiału paliworodnego do ilości atomów rozszczepianych wykazała perspektywiczne konstrukcje umożliwiające pełniejsze wykorzystanie toru i uranu w wytwarzaniu energii. Takimi konstrukcjami są wysoko temperaturowe reaktory chłodzone helem (HTR) oraz reaktory na stopionych solach MSR. Reaktory wysoko temperaturowe, dzięki wyższym temperaturom rdzenia reaktora i w rezultacie wyższym energiom neutronów efektywniej przetwarzają materiał paliworodny w paliwo rozszczepialne. Tym zagadnieniom były poświęcone badania prowadzone na reaktorach wysokotemperaturowych w Niemczech – AVR i THTR. Negatywne stanowisko społeczne w Niemczech po awarii reaktora w Czarnobylu spowodowało zamknięcie tych programów. W USA prowadzono takie badania w reaktorach wysokotemperaturowych Peach Bottom i Fort St Vrain. Dla zbadania możliwości uzyskania względnie dużego współczynnika konwersji w lekkowodnych reaktorach PWR przebudowano jeden z wyłączonych reaktorów energetycznych EJ Shippingport na reaktor zawierający tor z U233. Wprawdzie uzyskano współczynnik konwersji większy od jedności, lecz eksperyment wykazał ekonomiczną nieprzydatność takiego rozwiązania

Uznaje się, że bardzo obiecującym rozwiązaniem problemu wykorzystania toru w energetyce oraz również oszczędności w wykorzystaniu uranu jest reaktor na stopionych solach MSR z ciągłym oczyszczaniem paliwa jądrowego z produktów rozszczepienia stanowiących dla klasycznego reaktora materiał absorbujący neutrony. Paliwo, w postaci stopionych fluorków uranu i toru, przepływa przez odpowiednio duży zbiornik umożliwiający osiągnięcie krytyczności układu i wytworzenie energii cieplnej, następnie przepływa przez wymiennik ciepła oraz przez układ on-line oczyszczania paliwa z produktów rozszczepienia. W układzie takim teoretycznie można doprowadzić do pełnego wykorzystania paliwa jądrowego w procesie wytwarzania energii.

Pierwsze prace w zakresie reaktorów na stopionych solach przeprowadzono w USA na reaktorze MSRE o mocy 7,5 MWt w ORNL w latach 1964 – 1969. Proponowano nawet wykorzystanie tego typu reaktora do napędu samolotu. Przyczyną niepowodzenia tego eksperymentu były zagadnienia materiałowe, związane z korozją w stycznością z żrącymi solami fluorków.

W 2012 roku podpisane zostało porozumienie pomiędzy Chińską Akademią Nauk a Oak Ridge National Laboratory w sprawie budowy w Chinach reaktora na stopionych solach. Rozwój technologii odpornych na korozję materiałów daje nadzieję pomyślnej realizacji tego projektu.

Jeśli wszystkie kwestie techniczne zostaną rozwiązane, do pokonania pozostaną jeszcze dwie bariery. Pierwsza z nich to spodziewane trudności w akceptacji tych technologii przez Dozory Jądrowe niezbyt skore w wprowadzaniu rewolucyjnych technologii jądrowych oraz opór producentów urządzeń energetyki jądrowej, którzy zainwestowali duże fundusze w technologie uranowe i nie są zbyt skorzy do rezygnacji z potencjalnych profitów z tych inwestycji.

Druga bariera, to ekonomiczna opłacalność. Jeśli technologie wykorzystania toru w energetyce jądrowej są dość skomplikowane, nie zapewniają znacznego rozwoju bezpieczeństwa, wymagają nowych technologii w wydobyciu toru ze środowiska, przetwarzania itp., dlaczego nie wykorzystać znacznych zasobów zubożonego uranu pozostałego po wzbogacaniu paliw uranowych (około 2 milionów ton) wypalonego paliwa przechowywanego w przechowalnikach (około 200 000 ton)? Efektywniejszym rozwiązaniem wydaje się przerób wypalonego paliwa uranowego i jego powtórne wykorzystanie w reaktorach jądrowych nowej generacji.

### **Realizacja w Instytucie Energii Atomowej oraz w Narodowym Centrum Badań Jądrowych projektu badawczego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka pn. „Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym”**

W 2008 roku, Instytut Energii Atomowej (od 2011 w składzie Narodowego Centrum Badań Jądrowych) złożył propozycje szeregu projektów badawczych w zakresie energetyki jądrowej do Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Tylko jeden projekt uzyskał finansowanie. Był nim projekt „Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym”. Założeniem projektu było zbadanie jak wpłynie wykorzystanie w reaktorze energetycznym paliwa torowego na zmniejszenie wbudowanej reaktywności na początku kampanii paliwowej reaktora energetycznego (w wyniku pochłaniania neutronów przez tor) oraz możliwość wydłużenia kampanii paliwowej (w wyniku nagromadzenia w rozszczepialnego izotopu U233 wytwarzanego w procesie napromieniania toru neutronami). W ramach realizacji projektu zostały zaadaptowane kody obliczeń kampanii paliwowej reaktorów energetycznych, przetestowane procedury wyznaczania efektywnych przekrojów czynnych na podstawie wyników napromieniania próbek toru w reaktorze MARIA oraz metody obróbki chemicznej napromienionych próbek toru. Prace w zakresie chemii toru prowadził Instytut Chemii i Techniki Jądrowej.

W trakcie realizacji projektu Instytut zatrudnił 7 absolwentów uniwersyteckich i politechnicznych ( w tym 4 kobiety), z których 5 osób, po zdobyciu w realizacji projektu kompetencji w analizach kampanii paliwowych reaktorów energetycznych nadal pracuje w NCBJ. Zaadaptowano i opracowano szereg programów do obliczeń kampanii paliwowych reaktorów energetycznych. W reaktorze MARIA przeprowadzono napromieniania próbek toru wraz z detektorami aktywacyjnymi i na podstawie wyników tych pomiarów zweryfikowano programy do wyznaczania efektywnego przekroju czynnego toru w różnych widmach energetycznych strumienia neutronów.

Uzyskane pozytywne wyniki projektu (zmniejszenie reaktywności wbudowanej na początku kampanii paliwowej o ca 10% oraz wydłużenie kampanii paliwowej o około 20 dni) nie znalazły uzasadnienia ekonomicznego przy projektowanej budowie w Polsce 6 GW w elektrowniach jądrowych zarówno w zakresie budowy zakładu wytwarzania torowych prętów paliwowych a tym bardziej w zakresie przerobu wypalonego paliwa torowego.

Opracowane w projekcie narzędzia obliczeniowe zostały wykorzystane w analizach bezpieczeństwa oraz analizach eksploatacyjnych reaktora badawczego MARIA. W wyniku realizacji międzynarodowego programu redukcji wzbogacenia paliwa jądrowego wykorzystywanego w cywilnych obiektach jądrowych do poziomu poniżej 20% (reaktor MARIA był projektowany na paliwo jądrowe o wzbogaceniu 80% w U235) niezbędne było przeprowadzenie analiz bezpieczeństwa oraz analiz eksploatacyjnych tego reaktora z nowym paliwem

Opracowane w projekcie narzędzia obliczeniowe zostały wykorzystane przy analizach technologii postępowania z wypalonym paliwem z reaktorów energetycznych. Przede wszystkim przeanalizowano wykorzystanie toru zamiast zubożonego uranu razem z plutonem wyodrębnionym z wypalonego paliwa w paliwie typu MOX. Wyniki były bardzo obiecujące: wypalenie plutonu w paliwie tor-pluton było rząd wielkości bardziej efektywne niż w paliwie uran-pluton. Dopiero analizy zachowania się w czasie produktów rozpadu izotopów uranu powstałych wyniku napromieniania toru neutronami przyniosło rozczarowanie: w szeregu radioaktywnego rozpadu U233 (izotopu wytworzonego w torze w wyniku napromieniania neutronami) pojawiają się Th229 oraz Ac225, razem izotopy o większej radiotoksyczności i dłuższym okresem połowicznego rozpadu niż uważany za bardzo szkodliwy Pu239.

### **Kierunki prac Narodowego Centrum Badań Jądrowych w zakresie energetyki jądrowej**

Tytułem uzupełnienia podajemy najważniejsze kierunki badawcze i rozwojowe dotyczące energetyki jądrowej rozwijane w NCBJ.

1. Analizy bezpieczeństwa oraz analizy eksploatacyjne reaktora badawczego MARIA;
2. Prace związane z programem budowy w Polsce elektrowni jądrowych:
  - Analizy bezpieczeństwa reaktorów energetycznych;
  - Projektowanie kampanii paliwowych reaktorów lekkowodnych (PWR i BWR)
  - Ochrona radiologiczna, monitoring radiologiczny terenu i okolic elektrowni jądrowej;
  - Zagadnienia materiałowe reaktorów jądrowych;
  - Wpływ elektrowni jądrowej na środowisko;
  - Postępowanie z wypalonym paliwem jądrowym;
  - Szkolenie kadr dla energetyki jądrowej.
3. Uczestnictwo w projektach UE (EURATOM) w zakresie energetyki jądrowej:
  - Rozwoju reaktorów energetycznych IV generacji – projekty Allegro, Alliance, ESNII +, Arkadia;
  - Rozwoju kogeneracji jądrowe – projekt NC2I-R;
  - Informacji społecznej – projekty Newlancer, IPPA;
  - Analiz bezpieczeństwa – projekty NUresafe, Asampsa;
4. Perspektywiczne cykle paliwowe – wypalanie transuranowców w wypalonym paliwie, wykorzystanie uranu zubożonego w reaktorach energetycznych