

# ARTYKUŁY

## BADANIA NAD TOROWYM CYKLEM PALIWOWYM W AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ

### *Research on thorium fuel cycle at University of Science and Technology*

Mikołaj Oettingen, Paweł Gajda

**Streszczenie:** Pierwiastek tor może zostać wykorzystany jako alternatywne paliwo dla energetyki jądrowej. Posiada on szereg zalet, które świadczą o jego użyteczności w jądrowym cyklu paliwowym m.in. jego koncentracja w naturze jest od 3 do 5 razy większa niż koncentracja uranu a zużyte torowe paliwo jądrowe charakteryzuje się mniejszą długotrwałą radiotoksycznością niż zużyte paliwo uranowe. Badania nad torowym cyklem paliwowym prowadzone są również w Polsce. W Katedrze Energetyki Jądrowej, Wydziału Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica (AGH) w Krakowie znajduje się unikatowy w skali Polski zestaw Th-Pb pozwalający na prowadzenie prac badawczo-rozwojowych nad paliwem torowym.

**Abstract:** Thorium can be used as an alternative fuel for nuclear power generation. It presents many advantages over uranium, which shows its usability in the nuclear fuel cycle. Its concentration in nature is about 3-5 times larger than concentration of uranium. In addition, the long-term radiotoxicity of the spent thorium fuel is significantly lower than the radiotoxicity of the spent uranium fuel. The research on thorium fuel cycle is also performed in Poland. Department of Nuclear Energy, Faculty of Energy and Fuels of AGH University of Science and Technology in Krakow owns unique in Poland Th-Pb fuel assembly dedicated for research on thorium fuel.

**Słowa kluczowe:** tor, stos Th-Pb, energetyka jądrowa

**Keywords:** thorium, Th-Pb assembly, nuclear power

#### 1. Wstęp

Udział energetyki jądrowej w światowej produkcji energii elektrycznej wynosi ok. 11% [1]. Obecnie na świecie pracuje 450 komercyjnych reaktorów jądrowych w 30 krajach o całkowitej mocy zainstalowanej ok. 397 GW<sub>e</sub>. Większość z nich stanowią reaktory typu lekko-wodnego typu PWR (Pressurized Water Reactor) i BWR (Boiling Water Reactor). Dodatkowo w ponad 50 krajach znajduje się ok. 230 reaktorów badawczych, a w transporcie morskim do napędu okrętów podwodnych, lotniskowców i lodołamaczy wykorzystywanych jest ok. 180 reaktorów napędowych. W budowie znajduje się 55 nowych reaktorów energetycznych, głównie w Chinach – 11, Indiach – 7 oraz w Rosji – 6 jednostek [2].

Zdecydowana większość komercyjnych reaktorów jądrowych pracuje na paliwie uranowym zawierającym izotop uranu <sup>238</sup>U oraz do 5% rozszczepialnego <sup>235</sup>U. Podczas pracy takiego reaktora rozszczepieniu ulega jednak nie tylko <sup>235</sup>U, który odpowiada za ok. 70% rozszczepień, ale również inne izotopy powstałe na drodze szeregu transmutacji i rozpadów jądrowych. Najważniejszym z nich jest izotop plutonu <sup>239</sup>Pu, który powstaje z obecnego w wyjściowym paliwie <sup>238</sup>U, a który jest odpowiedzialny za ok. 30% rozszczepień. W paliwie zachodzą również rozszczepienia wyższych aktynowców takich jak izotopy Np, Am oraz Cm, choć jest ich znacząco mniej. Dlatego też taki cykl paliwowy nosi nazwę uranowo-plutonowego (nazywany też uranowym lub skrótowo U-Pu). Alternatywą dla niego może być cykl torowo-uranowy (torowy lub Th-U) bazujący na pierwiastku torze, występującym w naturze

praktycznie w postaci jednego izotopu <sup>232</sup>Th [3]. Tor sam w sobie nie jest pierwiastkiem rozszczepialnym, lecz pierwiastkiem paliwo-rodnym, który po wychwycie neutronu oraz szeregu rozpadów promieniotwórczych przekształca się w rozszczepialny <sup>233</sup>U podobnie jak <sup>238</sup>U w <sup>239</sup>Pu.

#### 2. Wykorzystanie toru w energetyce

Podobnie jak w przypadku <sup>239</sup>Pu istnieją dwie koncepcje wykorzystania <sup>233</sup>U jako materiału rozszczepialnego. Izotopy te powstają bezpośrednio w pierwotnym paliwie jądrowym, czyli są wykorzystywane in-situ w rdzeniu reaktora jako uzupełnienie ubytku izotopu rozszczepialnego <sup>235</sup>U zawartego w pierwotnym paliwie. Opcja ta ma zastosowanie w tzw. otwartym cyklu paliwowym, gdzie zużyte paliwo jądrowe nie jest przetwarzane w celu odzyskania izotopów rozszczepialnych, a jedynie jest chłodzone, przed jego ostatecznym składowaniem w głębokich formacjach geologicznych. W opcji drugiej wyprodukowane izotopy rozszczepialne, czy to <sup>239</sup>Pu, czy <sup>233</sup>U, są odzyskiwane ze zużytego paliwa jądrowego na drodze procesów chemicznych, a następnie wykorzystywane do produkcji wtórnego paliwa jądrowego, które może zostać wykorzystane w innym reaktorze jądrowym. Teoretycznie istnieje również możliwość odzyskania izotopów Np, Am oraz Cm, co z jednej strony powiększa ilość paliwa wtórnego, a z drugiej redukuje radiotoksyczność paliwa zużytego, przeznaczonego do ostatecznego składowania. Całkowity recykling aktynowców zawartych w wypalonym paliwie to tzw. zamknięty cykl paliwowy.

Paliwo torowe może być wprowadzone do rdzenia reaktora na dwa zasadnicze sposoby homogeniczny i heterogeniczny. Pierwszy sposób zakłada mieszanie tlenu toru z tlenkiem uranu na poziomie każdego pręta paliwowego. Sposób drugi uwzględnia podzielenie rdzenia reaktora na strefy, w których znajduje się tylko wysokowzbożone w  $^{235}\text{U}$  paliwo uranowe (z j. ang. Seed fuel – autorzy proponują – paliwo *wiodące* – brak jednoznacznego odpowiednika/zamiennika tego terminu w j. polskim) lub tylko paliwo torowe (z j. ang. Blanket – płaszcz torowy). Opcja ta z kolei dzieli się na dwa warianty. W pierwszym wariantcie podział odbywa się na poziomie kasety paliwowej, tzn. w jednej kasecie paliwowej występują osobno pręty z tlenku toru i tlenku uranu (z j. ang. SBU – Seed Blanket Unit). Wariant drugi zakłada podział na poziomie całego rdzenia, który jest wypełniony kasetami paliwowymi zawierającymi, albo pręty torowe albo uranowe (z j. ang. WASB – Whole Assembly Seed and Blanket) [4]. Warto również zaznaczyć, że w przedstawionych wariantach paliwo torowe najczęściej również zawiera w swoim składzie tlenek uranu wzbogacony do ok. 10%  $^{235}\text{U}$  mniej więcej w proporcjach 1:5, co ułatwia powielanie  $^{233}\text{U}$ . Wariant z podziałem na poziomie kasety często jest nazywany koncepcją Radkowsky'ego ze względu na jego wynalazcę Alvina Radkowsky'ego, amerykańskiego fizyka i zwolennika komercyjnego wdrożenia torowego cyklu paliwowego.

### 3. Właściwości paliwa torowego

Zainteresowanie torowym cyklem paliwowym związane jest z kilkoma unikatowymi właściwościami toru w porównaniu z uranem. Przede wszystkim w przypadku użycia jako materiału paliworodnego  $^{232}\text{Th}$  łańcuch transmutacji i rozpadów jądrowych prowadzący do powstania plutonu oraz rzadkich aktywności jest dłuższy niż w przypadku  $^{238}\text{U}$ . Skutkuje to ich mniejszą ilością w zużytych paliwach jądrowym a tym samym jego mniejszą długożyciową radioaktywnością w porównaniu ze zużytych paliw uranowych. Ponadto w zużytych paliwach wyprodukowanym rozszczepialnemu  $^{233}\text{U}$  zawsze towarzyszy silnie radioaktywny  $^{232}\text{U}$  posiadający unikatową sygnaturę radiologiczną. Tym samym zużyte paliwo torowe może być łatwo wykryte, co zwiększa jego odporność na proliferację.  $^{232}\text{Th}$  może być wykorzystany do produkcji  $^{233}\text{U}$  w wielu typach reaktorów jądrowych, zarówno o termicznym, jak i prędkim widmie neutronów np. w termicznym reaktorze wysokotemperaturowym chłodzonym helem lub prędkim reaktorze na ciekłych solach. Z punktu widzenia dostępności toru w naturze jego abudancja w skorupie ziemskiej wynosi ok. 10 ppm, czyli jest od 3 do 5 razy większa niż uranu [5]. Złoża toru są równomiernie rozmieszczone na wszystkich kontynentach, jednak jego największe zasoby występują w Indiach i Australii. Wydobycie toru jest łatwiejsze niż uranu, gdyż jego największe depozyty występują w postaci tzw. piasków monacytowych, co znacznie ułatwia ich wydobycie technikami powierzchniowymi. Obecnie tor jest wydobywany na półprzemysłową skalę na wybrzeżu Malabarskim w Indiach. Indie nie posiadają dużych złóż uranu i dlatego postulują oparcie swojego programu energetyki jądrowej na torze.

Wykorzystanie toru w energetyce jądrowej wiąże się również z pewnymi wyzwaniem. Przede wszystkim tor nie posiada izotopu rozszczepialnego, a jest jedynie materiałem paliworodnym, z którego może dopiero powstać

rozszczepialny  $^{233}\text{U}$ . W związku z tym wymagane jest źródło neutronów, które zapoczątkuje transmutację w  $^{233}\text{U}$ . W reaktorze jądrowym takim źródłem jest paliwo *wiodące* o stosunkowo wysokim (~20%) wzbogaceniu w  $^{235}\text{U}$ . Większa zawartość rozszczepialnego  $^{233}\text{U}$  zwiększa koszty produkcji takiego paliwa. Obecność radioaktywnego  $^{232}\text{U}$  w zużytych paliwach jądrowym utrudnia ekstrakcję wyprodukowanego  $^{233}\text{U}$ , jak i jego ogólne przetwarzanie. Co więcej, czas produkcji  $^{233}\text{U}$  z  $^{232}\text{Th}$  jest ok. 11 razy dłuższy niż  $^{239}\text{Pu}$  z  $^{238}\text{U}$ , z powodu dłuższego czasu połowicznego rozpadu  $^{233}\text{Pa}$  do  $^{233}\text{U}$  (~27 dni) niż  $^{239}\text{Np}$  do  $^{239}\text{Pu}$  (~2,4 dnia). Torowy cykl paliwowy wymaga wielu kosztownych prac badawczo-rozwojowych, ponieważ jego wdrożenie do energetyki jądrowej nie jest obecnie priorytetowe ze względu na dużą dostępność uranu [6].

### 4. Wdrożenie cyklu torowego

Prace nad torowym cyklem paliwowym były już prowadzone w przeszłości, szczególnie w latach 1950-1990. Najbardziej spektakularnymi sukcesami było uruchomienie kilku reaktorów jądrowych chłodzonych helem i moderowanych grafitem typu HTGR (High-Temperature Gas-cooled Reactor) pracujących w cyklu torowo-uranowym. W USA w latach 1966-1972 w elektrowni Peach Bottom, pracował reaktor typu HTGR o mocy termicznej 115 MW<sub>th</sub> a elektrycznej ok. 40 MW<sub>e</sub>. W latach 1976-1989 w USA pracował również reaktor Fort St. Vrain charakteryzujący się zwiększoną w porównaniu z reaktorem Peach Bottom mocą do 842 MW<sub>th</sub> (ok. 330 MW<sub>e</sub>). W Wielkiej Brytanii w latach 1966-1973 pracował eksperymentalny reaktor Dragon o mocy 20 MW<sub>th</sub>. W Niemczech zostały uruchomione dwa reaktory zasilane paliwem torowym w latach 1967-1988, AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) o mocy 46 MW<sub>th</sub> (ok. 15 MW<sub>e</sub>) oraz w latach 1985-1989 jeden reaktor THTR (Thorium High-Temperature Reactor) o mocy 750 MW<sub>th</sub> (ok. 300 MW<sub>e</sub>) [6]. Reaktory niemieckie posiadały rdzenie w postaci złoża kul grafitowych, a pozostałe rdzenie były z bloków grafitowych.

Jak wspomniano wyżej, Indie planują oparcie swojego programu energetyki jądrowej na torowym cyklu paliwowym [7]. Pierwszy etap programu zakłada produkowanie rozszczepialnego plutonu  $^{239}\text{Pu}$  w już działających, jak i nowych reaktorach typu PHWR (Pressurized Heavy-Water Reactor) oraz w PWR. Wytworzony w nich pluton następnie posłuży jako paliwo *wiodące* otoczone płaszczem uranowo-torowym dla planowanej floty reaktorów prędkich powielających typu LMFBR (Liquid Metal Fast Breeding Reactor). Wytworzony w płaszczu torowo-uranowym  $^{233}\text{U}$ , jak i  $^{239}\text{Pu}$  następnie będą wykorzystywane w trzecim stopniu programu jako paliwo dla floty reaktorów AHWR (Advanced Heavy Water Reactor), pracujących w trybie samopowielania  $^{233}\text{U}$ , tzn. jedynym ich paliwem będzie paliworodny  $^{232}\text{Th}$ . Alternatywą dla reaktorów AHWR są reaktory typu MSBR (Molten Salt Breeder Reactor).  $^{239}\text{Pu}$  wytworzony w drugim etapie może być również wykorzystywany jako paliwo *wiodące* tylko dla tego etapu programu.

### 5. Zestaw Th-Pb w AGH

Badania nad potencjałem wykorzystania toru są prowadzone również w Polsce. Katedra Energetyki Jądrowej, Wydziału Energetyki i Paliw AGH posiada unikatowy w skali polskiej zestaw torowo-ołowiowy przedstawiony na

fot. 1 i fot. 2. Składa się on z cylindrycznych prętów torowych otoczonych heksagonalnymi prętami ołowioowymi o długości 120 cm. Pręty torowe o średnicy 12,6 mm są wypełnione pastylkami dwutlenku toru  $\text{ThO}_2$  na długości 100 cm.



**Fot. 1** Rdzeń stosu Th-Pb (dr inż. Przemysław Stanisław)  
**Photo. 1.** Core of the Th-Pb assembly

Pręty zostały wyprodukowane w instytucie Bhabha Atomic Research Centre w Indiach w latach 80. Oba rodzaje prętów są na obu końcach zamknięte aluminiowymi wtyczkami wyposażonymi w specjalne bolce, które umożliwiają ich precyzyjne pozycjonowanie w zestawie paliwowym za pomocą aluminiowej kratownicy. Odstęp między prętami wynosi ok. 0,4 mm, co pozwala na swobodne ich wyjmowanie i zmianę konfiguracji zestawu. Rdzeń zestawu Th-Pb otoczony jest reflektorem zbudowanym z dwóch warstw cegieł ołowianych o sumarycznej grubości ok. 10 cm.



**Fot. 2.** Stos Th-Pb (dr inż. Przemysław Stanisław)  
**Photo 2.** Th-Pb assembly

Zestaw znajduje się na mobilnym wózku pozwalającym przesunąć go do ekranowanego stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do wykonywania eksperymentów ze źródłami promieniowania neutronowego [8]. Możliwość ułożenia dowolnej konfiguracji prętów torowych, jak i ołowioowych oraz możliwość wprowadzania prętów z nowych materiałów np. polietylenu lub grafitu pozwala na prowadzenie naświetlań próbek w wielu zróżnicowanych środowiskach materiałowych. Umożliwia to dowolne kształtowanie intensywności oraz widma strumienia neutronów, w zależności od specyfikacji planowanego eksperymentu. Jako bazowy materiał reflektora został wybrany ołów, ze względu na jego korzystne charakterystyki fizyko-chemiczne m.in. mnożenie neutronów w reakcjach  $(n,2n)$ , niski przekrój czynny absorpcji neutronu, dużą masę atomową, a tym samym słabe spowalnianie neutronów, niepalność, wysoką temperaturę wrzenia. Dodatkowo

ołów przewidziany jest jako jedno z chłodziw dla prędkich reaktorów jądrowych IV generacji typ LFR (Lead-cooled Fast Reactor). Konfiguracja zestawu umożliwi wprowadzenia źródła promieniowania neutronowego w sam jego środek w celu równomiernego naświetlenia symetrycznie rozłożonych próbek. Próbki mogą być rozmieszczone w dowolnej odległości w szczelinach pomiędzy cylindrycznymi prętami torowymi, pod źródłem neutronów, jak i w każdej pozycji po wyjęciu dowolnego pręta.

## 6. Przeprowadzone badania

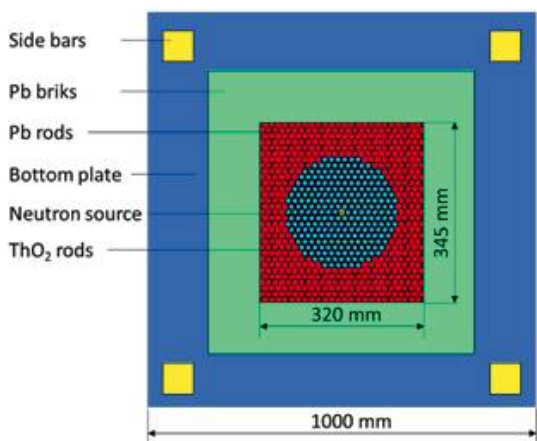
Zestaw Th-Pb w latach 90. wykorzystywany był do pomiarów wydajności reakcji jądrowych, jak i walidacji obliczeń numerycznych z pomiarami eksperymentalnymi przez zespół dr hab. inż. Jerzego Janczyszyna [9]. W ramach prac prowadzonych ok. 20 lat temu zostały dokonane wstępne naświetlenia próbek materiałowych za pomocą źródła neutronowego  $^{252}\text{Cf}$  o wydatku ok.  $5,5 \cdot 10^7$  n/s umieszczonego w centralnym kanale układu, w połowie przeciętego pręta ołowianego. Wynikiem przeprowadzonego eksperymentu był pomiar aktywności próbek monitorów torowych i określenie wydajności reakcji wychwytu neutronu w  $^{232}\text{Th}$  oraz pomiar aktywności próbek wybranych pierwiastków. Do osiowego pomiaru przestrzennej intensywności reakcji wyselekcjonowano trzy pierwiastki: In, Rh i Ni, podlegające czterem reakcją jądrowym  $^{115}\text{In}(n, g)^{116m}\text{In}$ ,  $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ ,  $^{103}\text{Rh}(n, n')^{103m}\text{Rh}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ . Ich próbki w postaci folii zostały umieszczone wzdłuż specjalnie przystosowanego pręta ołowianego. Czas naświetlania próbek wynosił 18h, czas chłodzenia od 5 do 180 min a czas pomiaru od 500 do 2000 sek.

Wykonano również ocenę prawidłowości obliczeń numerycznych wydajności reakcji  $^{232}\text{Th}(n, g)^{233}\text{Th}$ . Obliczenia numeryczne zostały wykonane za pomocą jednowymiarowego kodu BISON oraz kodu Monte Carlo MCNP4. Próbki sproszkowanego metalicznego toru w walcowych pojemnikach niklowych o średnicy wewnętrznej 2,0 mm i długości 24 mm umieszczono między prętami torowymi tak, by ich osie pionowe były równoległe do osi układu w odległości 30 mm od niej. Pomiary wydajności badanych reakcji zostały wykonane przy użyciu półprzewodnikowego detektora promieniowania X i niskoenergetycznego promieniowania gamma, typu LEPS (Low Energy Photon Spectrometer) o grubości 13 mm i powierzchni czynnej 500 mm<sup>2</sup>. Istotnym zagadnieniem pomiarowym było określenie bezwzględnej wydajności detekcji napromienionych próbek. W celu jej wyznaczenia opracowano metodę bazującą na symulacjach numerycznych kodem MCNP4 oraz pomiarach częstości zliczeń dla linii gamma emitowanych przez źródła o znanej aktywności przeznaczone do cechowania spektrometrów ( $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{152}\text{Eu}$ ) [10].

## 7. Plany badawcze

Obecnie trwają prace nad ponownym uruchomieniem zestawu torowego w celu prowadzenia eksperymentów naświetlania paliwa torowego, jak i rzadkich aktywnościami w środowisku ołowianym. Głównym celem planowanej kampanii eksperymentalnej są pomiary natężenia i rozkładu przestrzennego reakcji  $^{232}\text{Th}(n, g)^{233}\text{Th}$  prowadzącej do produkcji rozszczepialnego  $^{233}\text{U}$  w środowisku Th-Pb. Ponadto przewiduje się pomiary natężenia różnych reakcji neutronowych na wybranych rzadkich aktywnościami oraz

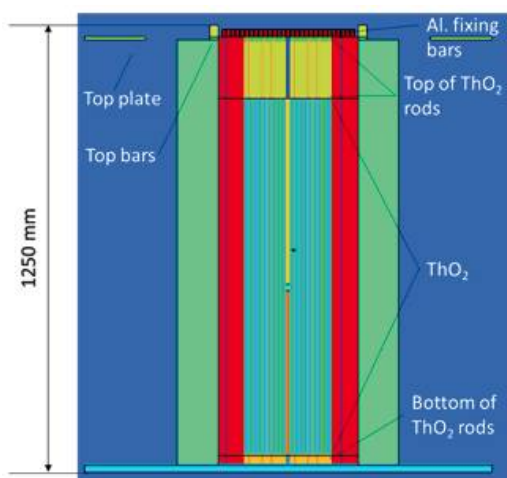
oszacowanie wpływu reflektora ołowianego na te reakcje. Do przeprowadzenia eksperymentów przewiduje się użycia kalifornowego źródła neutronów, gdyż jego widmo energetyczne jest zbliżone do spektrum rozszczepieniowego, co pozwala na rzetelne eksperymentalne odzwierciedlenie warunków fizycznych panujących w rdzeniu reaktora ołowianego prędkiego z paliwem torowym. Źródło takie ponadto charakteryzuje się wysoką aktywnością niezbędną do długotrwałych naświetlań rzędu nawet do 30 dni.



**Rys. 3.** Przekrój poprzeczny opracowanego modelu numerycznego stosu Th-Pb (rys. opracował dr inż. Mikołaj Oettingen)

**Fig. 3.** Horizontal cross section of the developed numerical model for Th-Pb assembly

Prace eksperymentalne nad reaktorami jądrowymi z paliwem torowym wymagają przeprowadzania licznych obliczeń numerycznych o wysokiej precyzji otrzymanych wyników. Opracowane metody numeryczne, programy i dane biblioteczne stosowane do tych obliczeń należy zweryfikować doświadczalnie, aby otrzymane wyniki były wiarygodne. Z punktu widzenia wielkoskalowego rozwoju technologii, korzystne jest dokonanie takiej weryfikacji w małej skali w porównaniu z urządzeniem energetycznym o pełnej mocy. W tym celu zostały wykonane prace profilometryczne oraz inwentaryzacyjne związane z pozyskaniem dokładnych informacji o geometrii, jak i składzie materiałowym stosu.



**Rys. 2.** Przekrój podłużny opracowanego modelu numerycznego stosu Th-Pb (rys. opracował dr inż. Mikołaj Oettingen)

**Fig. 2.** Vertical cross section of the developed numerical model for Th-Pb assembly

Na tej podstawie został stworzony pełny trójwymiarowy model numeryczny do symulacji transportu promieniowania oraz zmian izotopowych metodami Monte Carlo przedstawiony na rys. 1 i rys. 2. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w Akademickim Centrum Komputerowym ACK Cyfronet AGH na superkomputerze Prometheus za pomocą kodu MCB (The Monte Carlo continuous energy Burnup code) opracowanego przez dr. hab. Jerzego Cetnara w Katedrze Energetyki Jądrowej AGH [11]. Dodatkowo trwają zaawansowane prace projektowo-budowlane w celu adaptacji laboratorium analizy radiometrycznej do wykonywania eksperymentów integralnych z wykorzystaniem kalifornowego źródła neutronów. Pracownicy Katedry Energetyki Jądrowej dołączyli również do międzynarodowej inicjatywy COAUTHOR (Consortium of Academics from Universities promoting the use of THORium) promującej rozwój torowego cyklu paliwowego [12].

Mikołaj Oettingen,  
Paweł Gajda,  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Wydział Energetyki i Paliw,  
Katedra Energetyki Jądrowej

#### Literatura:

- [1] World Nuclear Association, Nuclear Power in the World Today, access:04.04.2019 <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [2] International Atomic Energy Agency, PRIS - Power Reactor Information System, access: 04.04.2019, <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [3] International Atomic Energy Agency, Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, IAEA Nuclear Energy Series, No. NF-T-2.4, 2012
- [4] M. Oettingen, K. Skolik, Numerical design of the Seed-Blanket Unit for the thorium nuclear fuel cycle, E3S Web Conf. Volume 10, 2016
- [5] W. W. Schulz, Thorium processing, Encyclopædia Britannica, Encyclopædia Britannica, inc., 12.08.2014, <https://www.britannica.com/technology/thorium-processing>, access: 15.04.2019
- [6] International Atomic Energy Agency, Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges, IAEA-TECDOC-1450, 2005
- [7] World Nuclear Association, Nuclear Power in India, access:04.04.2019, <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>
- [8] M. Oettingen, P. Stanisz, Monte Carlo modelling of Th-Pb fuel assembly with californium neutron source, NUKLEONIKA 2018;63(3):87-91
- [9] J. Janczyszyn, Sprawozdanie z prac prowadzonych w latach 1995 – 1998 w ramach projektu badawczego KBN nr 8T10B05208 pt. Badania modelowe i analiza wariantu energetyki jądrowej z cyklem paliwowym Th - U, Kraków, 1998
- [10] J. Janczyszyn, Sprawozdanie uzupełniające z prac prowadzonych w latach 1998 – 1999 w ramach projektu badawczego KBN nr 8T10B05208 pt. Badania modelowe i analiza wariantu energetyki jądrowej z cyklem paliwowym Th - U, Kraków, 1999
- [11] M. Oettingen, J. Cetnar, T. Mirowski, The MCB code for numerical modeling of fourth generation nuclear reactors. Computer Science 2015, 16(4), 329–350.
- [12] Consortium of Academics from Universities promoting the use of THORium, access: 03.06.2019, <https://sites.google.com/view/coauthor-mou/memorandum-of-understanding>