



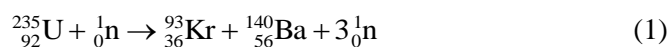
## Powrót do przeszłości – o reaktorach jądrowych chłodzonych ciekłym ołowiem

Mikołaj Oettingen

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Wydział Energetyki i Paliw Katedra Energetyki Jądrowej

### Origo<sup>1</sup>

W 1938 roku dwaj niemieccy uczeni Otton Hahn i Fritz Strassman wykonali serię eksperymentów naświetlania naturalnego uranu wiązką neutronów. Uczni oczekiwali utworzenia się pierwiastków cięższych od uranu (transuranowców) na drodze transmutacji jądrowej. Ku ich zaskoczeniu, analiza chemiczna naświetlonej próbki uranu wykazała również obecność o około połowę lżejszego izotopu baru. Rok później Lise Meitner oraz Otto Frisch wyjaśnili pochodzenie baru. Jego źródłem okazał się proces rozpadu jądra izotopu uranu  $^{235}\text{U}$  obecnego w naturalnym uranie na dwa lżejsze jądra pod wpływem oddziaływania z neutronem o małej energii (1). Nazwali ten proces rozszczepieniem, a energię w nim wydzieloną oszacowali na 200 MeV, czyli 50 milionów razy większą niż w przypadku reakcji spalania paliw kopalnych. Rozpoczęła się era energii jądrowej [1].



Rys. 1. Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia pierwszego rozszczepienia jądra atomowego [2]

### Technologia<sup>2</sup>

Naukowcy zauważyli również, że w procesie rozszczepienia emitowane są neutrony, które mogą zainicjować kolejne rozszczepienia, a tym samym doprowa-

<sup>1</sup> Łac. początek.

<sup>2</sup> Łac. technologia.

dzić do osiągnięcia samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej generującej ciągłą produkcję energii. Rozpoczęły się prace nad budową „pieca” jądrowego zdolnego do zapewnienia warunków fizycznych dla reakcji łańcuchowej.

Reakcja łańcuchowa zachodzi, gdy liczba neutronów w rdzeniu reaktora jądrowego w danym pokoleniu jest równa liczbie neutronów w pokoleniu poprzednim. Zjawisko to można sobie wyobrazić jako następujące po sobie pokolenia lub fale neutronów. Jeśli następna fala jest bliźniaczym odbiciem poprzedniej, to mówimy, że reaktor jądrowy znajduje się w tzw. stanie krytycznym. Jeśli liczba neutronów w rdzeniu reaktora spada, to reaktor wchodzi w stan podkrytyczny, a gdy rośnie, to mamy do czynienia ze stanem nadkrytycznym. Produkcja stałej mocy polega na utrzymywaniu rdzenia reaktora dokładnie w stanie krytycznym, tzn. zapewnieniu niezmiennego liczebności populacji neutronów. Nie wszystkie neutrony wyprodukowane podczas rozszczepienia powodują kolejne rozszczepienie. Niektóre z nich uciekają z rdzenia reaktora i są bezpowrotnie tracone, inne są tracone w procesie absorpcji pasywno-żywniczej w materiałach konstrukcyjnych. Nawet jeśli neutron zostanie zaabsorbowany w rozszczepialnym jądrze  $^{235}\text{U}$ , nie mamy pewności, że spowoduje jego rozszczepienie – może na przykład spowodować utworzenie się  $^{236}\text{U}$  na drodze reakcji jądrowej, nazywanej wychwytem rezonansowym. Prawdopodobieństwo rozszczepienia po pochłonięciu neutronu zależy od nuklidu oraz od energii kinetycznej neutronu. Dla izotopu  $^{235}\text{U}$  prawdopodobieństwo jest bardzo duże – a o to nam przecież chodzi – tylko dla neutronów o energiach termicznych, tzn. o rozkładzie Boltzmanna-Maxwella, odpowiadającym temperaturze kilkuset kelwinów. Średnia energia takich neutronów wynosi około 0,025 eV. Reaktory jądrowe wykorzystujące neutrony termiczne do stymulacji rozszczepień nazywają się reaktorami termicznymi. Z powyższego wynika, że dwoma głównymi czynnikami decydującymi o możliwości osiągnięcia stanu krytycznego, są skład materiałowy oraz geometria rdzenia reaktora. W pierwszym przypadku wiodącą rolę pełni rodzaj paliwa jądrowego, moderatora i reflektora neutronów oraz chłodziwa.

**Paliwo jądrowe** w reaktorach termicznych bazuje na nieparzystych izotopach uranu i plutonu:  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  w formie metalicznej, tlenkowej lub azotkowej. Udział wymienionych izotopów występujących w naturalnym uranie może, a najczęściej musi być sztucznie zwiększony (wzbogacanie uranu), aby w ogóle dało się osiągnąć stan krytyczny. **Moderatorem**, inaczej spowalniczem neutronów, nazywamy materiał o dużym prawdopodobieństwie rozproszenia neutronów przez jądra atomowe. Jeśli jest to materiał zawierający lekkie jądra, to neutrony w zderzeniach szybko tracą energię i stają się „termiczne”. Najczęściej używanymi moderatorami są: lekka woda zawierająca głównie prot<sup>3</sup>, cięż-

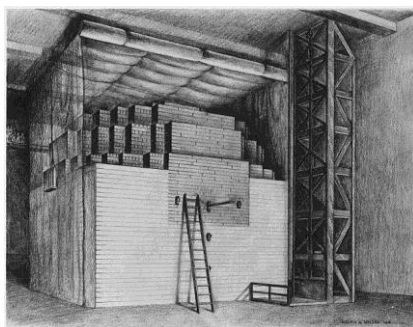
---

<sup>3</sup> Izotop wodoru zawierający tylko proton i nie zawierający neutronów.

ka woda zawierająca większą od naturalnej frakcję deuteru<sup>4</sup> oraz grafit zawierający izotopy węgla. **Reflektor** stanowią wszystkie warstwy materiałowe okalające rdzeń reaktora. Charakteryzują się one dużym prawdopodobieństwem rozproszenia wstecznego neutronu, co zmniejsza ucieczkę neutronów z rdzenia reaktora. Produkty rozszczepienia hamują w rdzeniu reaktora, a ich energia zamienia się na ciepło, odbierane przez **chłodziwo**.

Kolejnym ważnym problemem projektowym jest sposób rozmieszczenia paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora, czyli jego geometria. Pionierzy energetyki jądrowej rozpatrywali dwie opcje. Pierwsza z nich polegała na zmieszaniu moderatora i paliwa oraz budowy tzw. rdzenia homogenicznego. W drugiej opcji konstruowano tzw. rdzeń heterogeniczny przez umieszczenie elementów z paliwem jądrowym w matrycy stworzonej z materiału moderatora. Ta opcja okazała się korzystniejsza w osiąganiu stanu krytycznego. Obecnie buduje się tylko reaktory heterogeniczne z wyraźnym wydzieleniem paliwa i moderatora.

2 grudnia 1942 roku pod kierownictwem Enrico Fermiego został uruchomiony pierwszy w historii tzw. jądrowy „stos” CP-1 (*Chicago Pile Number One*), będący pierwowzorem obecnych reaktorów jądrowych. Miał on kształt spłaszczonej elipsoidy o wysokości 6 m i szerokości 7,5 metra, zbudowanej z cegieł grafitowych, zawierających paliwo jądrowe w formie kul tlenku uranu oraz walców uranu metalicznego o małych rozmiarach. Użycie grafitu jako moderatora umożliwiło przeprowadzenie reakcji łańcuchowej bazującej na uranie naturalnym, nie wzbogaconym w izotop <sup>235</sup>U. Rdzeń reaktora zawierał około 350 ton grafitu, 36 ton tlenku uranu oraz 5,5 tony uranu metalicznego. Nie posiadał on sztucznego systemu chłodzenia ani osłon radiacyjnych. Mechanizm kontrolny stanowiły pręty wykonane z kadmu silnie pochłaniającego neutrony. Za pierwszym razem stos pracował 28 minut z mocą 0,5 W [3]. Był to pierwszy w historii reaktor jądrowy uruchomiony przez człowieka. Naturalne reaktory jądrowe powstały w formacjach skalnych około 2 miliardy lat temu w okolicach Oklo na terenie dzisiejszego Gabonu [4].



Rys. 2. Szkic reaktora CP-1 [5]

<sup>4</sup> Izotop wodoru zawierający proton i neutron.

### Aqua<sup>5</sup>

Lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte XX wieku były okresem najbardziej dynamicznego rozwoju militarnych jak i cywilnych technologii jądrowych. W tym czasie powstały też pierwsze komercyjne elektrownie jądrowe. W 1954 roku uruchomiono elektrownię w rosyjskim Obnińsku, wykorzystującą pierwowzór reaktora RBMK (*Reaktor Bolszoy Moszczynosti Kanalnyj* – Reaktor Kanałowy Wielkiej Mocy), która miała moc elektryczną 5 MW. W roku 1956 ruszyła brytyjska elektrownia Calder Hall wyposażona w cztery reaktory typu MAGNOX (*Magnesium non-oxidising* – nazwa od stopu magnezu w koszulkach paliwowych) o mocy elektrycznej 60 MW każdy, a amerykańska elektrownia Shipping Port uruchomiona w grudniu 1957 roku posiadała reaktor typu PWR (*Pressurized Water Reactor* – reaktor wodny ciśnieniowy) o mocy elektrycznej 60 MW [6]. Każde z państw rozwijało inny typ reaktora jądrowego przeznaczonego do produkcji energii elektrycznej, szukając najbardziej optymalnej technologii pod względem bezpieczeństwa oraz efektywności pracy systemu. Najbezpieczniejszą oraz najbardziej dopracowaną technologią okazały się reaktory typu PWR chłodzone i moderowane lekką wodą. Następujący po tych wydarzeniach okres uważa się za czas komercjalizacji energetyki jądrowej. Jednak nic, co piękne, nie trwa wiecznie. Stagnacja w branży energetyki jądrowej rozpoczęła się pod koniec lat siedemdziesiątych. Liczba zamówień na nowe reaktory systematycznie się zmniejszała, do czego przyczyniły się dwie awarie reaktorów jądrowych: w amerykańskiej elektrowni Three Mile Island w 1979 roku oraz w radzieckiej elektrowni w Czarnobylu w roku 1986 [7].

### Plumbum<sup>6</sup>

Uwolnienie energii uwięzionej w jądrze atomu otworzyło zupełnie nowy dział nauki i techniki. Jednym z atrakcyjnych zastosowań energii jądrowej stały się systemy napędowe jednostek pływających, szczególnie okrętów podwodnych. Pierwszy w historii okręt podwodny o napędzie atomowym, bazującym na reaktorze typu PWR, został opracowany na zlecenie amerykańskiej marynarki wojennej i zwodowany 31 stycznia 1954 roku. Okręt został nazwany USS Nautilus, podobnie jak fikcyjny okręt podwodny z powieści Juliusza Verne'a *Dwaścieścia tysięcy mil podmorskiej żeglugi*. USS Nautilus pozostał w służbie do 1980 roku i przepłynął prawie 500 tysięcy mil morskich.

Opracowanie systemów jądrowego napędu okrętów podwodnych zapoczątkowało nowy wyścig pomiędzy Stanami Zjednoczonymi a Związkiem Radzieckim. Rozpoczęła się batalia o przewagę militarną na morzach i oceanach. Liczba wodowanych okrętów podwodnych o napędzie atomowym rosła lawinowo. W pierwszej połowie lat siedemdziesiątych w Związku Radzieckim został

---

<sup>5</sup> Łac. woda.

<sup>6</sup> Łac. ołów.

ukończony projekt o pseudonimie operacyjnym K 705 Lira [8]. Projekt dotyczył budowy myśliwskiej łodzi podwodnej o promieniu 9,5 m i długości 80 m, napędzanej energią jądrową. Jej uzbrojenie stanowiło sześć wyrzutni torped i min. Ku zdumieniu amerykańskiego wywiadu okazało się, że łodzie klasy K 705 są w stanie osiągnąć prędkość wynoszącą ponad 75 km/h w pełnym zanurzeniu, a tym samym mogą prześcignąć większość amerykańskich torped. W jaki sposób radzieccy konstruktorzy osiągnęli tak wysokie osiągi nowej jednostki podwodnej, wcześniej nie osiągalne dla konstruktorów zachodnich? Po pierwsze kadłub okrętu, jako pierwszy w historii, został wykonany ze stopów tytanu, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością, co pozwoliło na znaczne zmniejszenie jego masy. Po drugie, okręty klasy K 705 Lira zostały wyposażone w nowy typ jądrowej jednostki napędowej – reaktor jądrowy na neutronach prędkich o mocy termicznej 155 MW chłodzony eutektyką<sup>7</sup> bizmut-olów. Użycie eutektyki bizmut-olów gwarantowało większą sprawność pracy systemu napędowego, co bezpośrednio przekładało się na osiąganą prędkość jednostki. Radzieccy konstruktorzy jako pierwsi w historii użyli jako chłodziwa reaktora związku bazującego na ołowiu. Jednak ich osiągnięcia nie zostały wykorzystane w komercyjnych elektrowniach jądrowych z powodu problemów eksploatacyjnych wynikających z ograniczonej wiedzy na temat nowej technologii (projekt wojskowy), jak i trwającej stagnacji w branży jądrowej. Pełne opanowanie technologii ołowiowej okazało się ambitnym wyzwaniem, któremu ówczesni naukowcy nie mogli poddać – była to technologia XXI wieku. Prace nad reaktorami chłodzonymi ołowiem zostały porzucone.



Rys. 3. Okręt podwodny projektu K 705 Lira [9]

<sup>7</sup> Eutektyka (grec. *eûtēktos* – łatwo topliwy), mieszanina eutektyczna, eutektyk, mieszanina 2 lub więcej faz stałych (np. kryształów czystych substancji, ich roztworów stałych) o określonym stałym składzie chemicznym, powstająca podczas krzepnięcia roztworu (o takim samym składzie) w określonej temperaturze, zwanej temperaturą eutektyczną (<http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/3899255/eutektyka.html>).

**Reditus<sup>8</sup>**

Ludzkość wkraczająca w XXI wiek boryka się z poważnym problemem pokrycia ciągle rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dzisiejsza energetyka w dużym stopniu opiera się na spalaniu paliw kopalnych, takich jak gaz ziemny, ropa naftowa, węgiel kamienny oraz węgiel brunatny. W niedalekim czasie przewiduje się znaczny spadek ich wydobycia z powodu ograniczonych zasobów. Dodatkowo produktem ich spalania jest dwutlenek węgla wzmagający efekt cieplarniany. Energetyka oparta na odnawialnych źródłach energii może zaspokoić potrzeby energetyczne lokalnych społeczności, ale wydaje się, że nie jest w stanie pokryć globalnego zapotrzebowania, ze względu na specyficzne warunki środowiskowe potrzebne do jej implementacji.

Energetyka jądrowa może zapewnić duże ilości energii, nie produkuje gazów cieplarnianych oraz zużywa małe ilości paliwa rozszczepialnego. Pragmatyczne podejście do energetyki jądrowej, wolne od obaw związanych z minionymi awariami, zaczęło stawiać ją w nowym pozytywnym świetle – energetyka jądrowa zaczęła się odradzać.

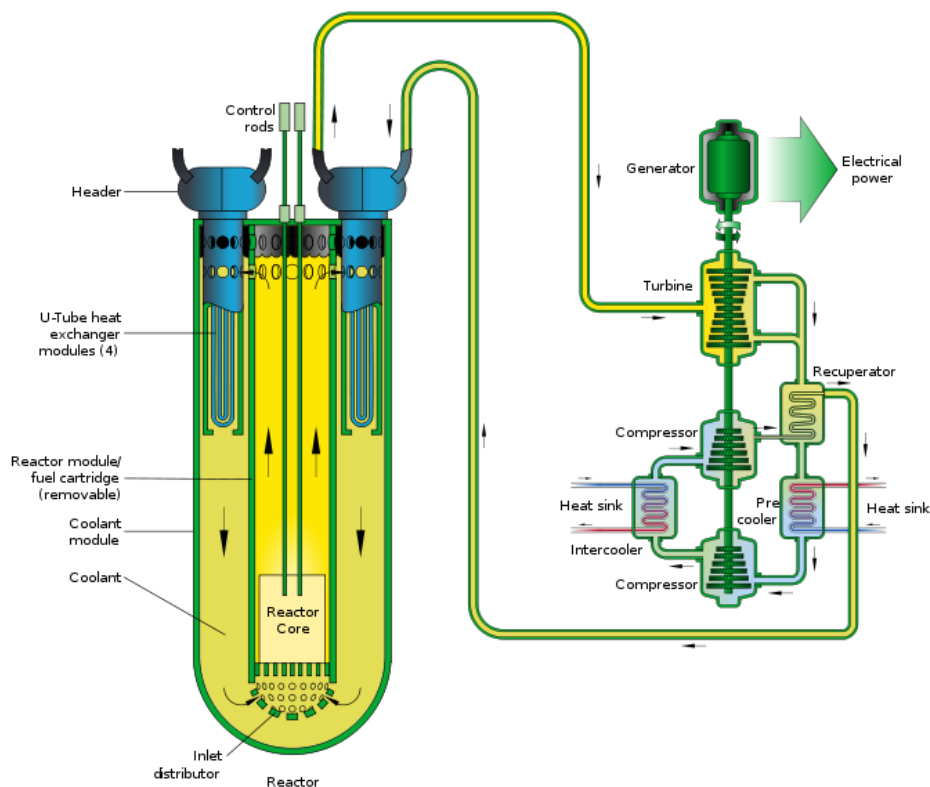
W roku 2000 pod patronatem amerykańskiego Departamentu Energii zostało powołane międzynarodowe forum, mające na celu określenie przyszłych kierunków rozwoju technologii jądrowych. W wyborze najbardziej innowacyjnych technologii ponad 100 międzynarodowych ekspertów kierowało się kilkoma decydującymi kryteriami: zwiększone bezpieczeństwo pracy systemu, zmniejszone koszty produkcji energii elektrycznej, możliwość generacji ciepła przemysłowego wykorzystywanego do produkcji wodoru lub paliw syntetycznych do zastosowań transportowych, redukcja wolumenu odpadów jądrowych poprzez wykorzystanie tzw. zamkniętego cyklu paliwowego oraz ograniczenie proliferacji materiału rozszczepialnego [10].

Z ponad 130 zaproponowanych koncepcji reaktorów jądrowych zostało wybranych sześć typów najbardziej optymalnych do wdrożenia komercyjnego. Są to: reaktor wysokotemperaturowy chłodzony helem (VHTR – *Very High Temperature Reactor*), reaktora na paliwo w postaci stopionych soli uranu (MSR – *Molten Salt Reactor*), reaktor lekko-wodny chłodzony lekką wodą w stanie nadkrytycznym (SCWR – *Supercritical Water-cooled Reactor*), reaktor na neutronach prędkich chłodzony gazem (GFR – *Gas-cooled Fast Reactor*), reaktor na neutronach prędkich chłodzony sodem (SFR – *Sodium-cooled Fast Reactor*) oraz reaktor na neutronach prędkich chłodzony ciekłym ołowiem (LFR – *Lead-cooled Fast Reactor*). Wybrane reaktory zostały nazwane reaktorami IV generacji (Gen IV). Po ponad 25 latach w ramach inicjatywy Gen IV, ponownie rozpoczęły się prace nad wdrożeniem technologii ołowiowej. Do tego czasu wszystkie łodzie podwodne klasy K 705 Lira zostały już wycofane ze służby i ze złomowane – ostatnia w roku 1996.

---

<sup>8</sup> Łac. powrót.

Reaktory chłodzone ciekłym ołowiem charakteryzują się kilkoma unikalnymi cechami, które przyczyniły się do ich wyboru jako jednego z jądrowych systemów energetycznych IV generacji. Po pierwsze, ołów bardzo słabo oddziałuje z neutronami, co umożliwia uzyskanie spektrum neutronów szybkich, niezbędnego do „dopalania” (transmutacji) zużytego paliwa jądrowego zawierającego radioaktywne transuranowce głównie z komercyjnych reaktorów jądrowych typu PWR. Umożliwiłoby to systematyczne zmniejszanie globalnego wolumenu. Ołów charakteryzuje się niską temperaturą topnienia ( $328^{\circ}\text{C}$ ) oraz wysoką temperaturą wrzenia ( $1749^{\circ}\text{C}$ ), co jest atrakcyjne dla charakterystyki bezpieczeństwa.



Rys. 4. Schemat reaktora na szybkich neutronach, chłodzonego ciekłym ołowiem [11]. Compressor – kompresor, Control rods – pręty kontrolne, Coolant – chłodziwo, Electrical power – zasilanie elektryczne, Fuel cartridge – kaseta paliwowa, Generator – generator, Header – głowica, Heat sink – radiator, Inlet distributor – separator przepływu, Intercooler – chłodnica międzystopniowa, Pre-cooler – chłodnica pierwszego stopnia, Reactor – reaktor, Reactor module – moduł reaktora, Recuperator – rekuperator, Turbine – turbina, U-tube heat exchanger – wymiennik ciepła typu U

Posiada on właściwości ekranowania przed promieniowaniem gamma oraz może wiązać niektóre radioaktywne produkty rozszczepienia i tym samym

uniemożliwić ich uwolnienie do otoczenia – ołów wypływa poza rdzeń, aż do wymiennika ciepła. Dobre właściwości przewodzenia ciepła umożliwiają osiągnięcie wysokich sprawności cyklu termodynamicznego oraz częściowy odbiór ciepła powyłączeniowego na drodze naturalnej konwekcji. Dodatkowo ołów słabo reaguje chemicznie z powietrzem oraz z wodą, co eliminuje prawdopodobieństwo zapłonu podczas jego wycieku z systemu chłodzenia reaktora w sytuacjach awaryjnych. W przypadku reaktorów chłodzonych sodem podczas reakcji z wodą wydzielają się duże ilości energii, co może doprowadzić do zniszczenia reaktora [12].

### **Polonia<sup>9</sup>**

Prace badawcze nad reaktorami prędkimi chłodzonymi ciekłym ołowiem prowadzone są również w Polsce na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 2006 roku Katedra Energetyki Jądrowej AGH została partnerem międzynarodowego projektu ELSY (*European Lead-cooled System*), sponsorowanego przez Europejską Wspólnotę Energii Atomowej EURATOM i mającego na celu opracowanie koncepcji europejskiego reaktora jądrowego chłodzonego ciekłym ołowiem [12]. Moc elektryczna reaktora wynosiłaby 600 MW przy sprawności cyklu termodynamicznego powyżej 40%. Zadanie badawcze realizowane w Polsce polegało na zaprojektowaniu rdzenia reaktora bazującego na innowacyjnym paliwie azotkowym, zawierającym izotopy uranu, plutonu oraz transuranowce z wypalonego paliwa jądrowego: izotopy neptunu, ameryku i kiuru. Korzystając z metod Monte Carlo został zaprojektowany rdzeń reaktora spełniający wszystkie wymagania projektowe. Efektem rzetelnego wykonania powierzonego zadania było zaproszenie do kolejnego projektu LEADER (*Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor*), mającego na celu zaprojektowanie prototypu reaktora chłodzonego ciekłym ołowiem oraz współpracę z konsorcjum dążącym do budowy demonstracyjnego reaktora o pseudonimie roboczym ALFRED (*Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator*) [13–14]. Katedra prowadzi również badania nad podkrytycznymi systemami jądrowymi, sterowanymi akceleratorem (ADS – *Accelerator Driven System*), przeznaczonymi do utylizacji zużytego paliwa jądrowego [15]. Systemy ADS stanowią połączenie akceleratora cząstek z reaktorem jądrowym i mogą być również chłodzone ciekłym ołowiem..., ale to już zupełnie inna historia.

Obecnie Polska nie posiada elektrowni jądrowej, jednak polscy naukowcy są w stanie współpracować z zagranicznymi kolegami na równym poziomie, nawet w dziedzinach tak skomplikowanych, jak rozwój technologii reaktorów IV generacji.

---

<sup>9</sup> Łac. Polska.



### **Futurum**<sup>10</sup>

Komercyjne wdrożenie reaktorów chłodzonych ciekłym ołowiem przewidziane jest po roku 2030 roku – 60 lat po uruchomieniu pierwszych reaktorów tego typu napędzających radzieckie łodzie podwodne. Czy naukowcy opanują technologię ołowiową w stopniu zapewniającym najwyższe standardy bezpieczeństwa? Czy technologia pierwotnie opracowana jako źródło energii dla łodzi podwodnych znajdzie zastosowanie komercyjne? Czy w przyszłości będziemy używać elektryczności wyprodukowanej w reaktorach jądrowych IV generacji chłodzonych ciekłym ołowiem? Przekonamy się w ciągu następnych 15 lat – prace nad tą technologią nadal trwają.

### **Literatura**

- [1] *Historia Fizyki – Od czasów najdawniejszych do współczesności*, Andrzej Kajetan Wróblewski, PWN, 2011
- [2] *Nuclear Fission Experimental Apparatus*, J. Brew, Wikimedia Commons, 2006
- [3] <http://www.atomicarchive.com/>
- [4] <http://mragheb.com>
- [5] *Drawing of the reactor*, Melvin A. Miller of the Argonne National Laboratory, Wikimedia Commons, 2009
- [6] <http://www.world-nuclear.org/>
- [7] <http://www.swiadomieoatomie.pl/>
- [8] <http://www.fas.org/>
- [9] *Alpha class submarine*, Departament Obrony Stanów Zjednoczonych, Wikimedia Commons, 1983
- [10] <https://www.gen-4.org>
- [11] *Lead-Cooled Fast Reactor Schemata*, Idaho National Library, Wikimedia Commons, 2009
- [12] *LFR Lead Fast Reactor*, L. Cinotti, C. Fazio, J. Knebel, S. Monti, H. Aït Abderrahim, FISA 2006 EU Research and Training in Reactor Systems, Conference Proceedings, 2006
- [13] [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/96603\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/96603_en.html)
- [14] *The ALFRED project on Lead-cooled Fast Reactor*, Alessandro Alemberti, ESNI Conference: Advanced fission research in Horizon 2020, 2012
- [15] <http://freya.sckcen.be/>

---

<sup>10</sup> Łac. przyszłość.