

## Abstract

The Dual Fluid Reactor (DFR) is a novel concept of innovative, high-temperature and fast nuclear reactor patented by an international group of scientist from the Institut für Festkörper-Kernphysik (IFK) in Berlin. The distinctive feature of its design is the use of two independent liquid loops for the fuel (molten salts (DFRs) or molten metal (DFRm)) and for the coolant (liquid lead). The DFR combines the advantages of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR) and the Lead-cooled Fast Reactor (LFR) and allows for optimization of working parameters in each loop for specific purposes. As a consequence, DFR can be characterized by a very high power density, a high fuel burnup, and a negative temperature coefficient of reactivity. All this leads to a significant cost reduction, an increased reliability, and a larger safety, which are crucial in nuclear power generation.

The dissertation presents a new 250 MWth Dual Fluid Reactor metallic design (DFRm) with liquid eutectic uranium-chromium fuel (composed of enriched uranium  $^{235}\text{U}$ ) and circulating at a nominal temperature of  $1000^\circ\text{C}$ . It follows the recent patent WO2020088707-A1 by IFK and verifies its basic principles. According to thermal and neutronic analyses performed in the thesis, the reactor is critical and can operate for about 17 years without refueling. The core region is of 0.6 m in radius, 1.2 m high, and consists 1666 fuel tubes made of silicon carbide (SiC) arranged in a hexagonal grid. The reactor dimensions result from parametric and material analysis with respect mainly to the effective neutron multiplication factor. The unique geometry, the applied materials, and very large values of the working medium parameters lead to a small and a compact construction of the reactor.

Further analysis of the safety shows that DFRm is characterized by the negative temperature coefficient of reactivity, which equals to about  $-3.00$  pcm/K. All investigated material coefficients (fuel, coolant, reflector) are negative and stay even more negative with progressing burnup of the fuel. The thermal expansion of reactor materials and some minor changes in geometry do not significantly affect reactivity coefficients which always remain negative. The negative temperature coefficient allows the DFRm reactor to be self-regulated without any additional systems (e.g. control rods) and therefore considerably simplifies the reactor design.

Finally, two extra fuel compositions made of spent nuclear fuel (SNF) from Light Water Reactors are investigated. The fuels include series of actinides up to  $^{245}\text{Cm}$ . The results show a unique DFRm properties: significant reduction of minor actinides (in particular  $^{237}\text{Np}$  and americium isotopes) with high breeding capabilities. A minor change of the initial SNF fuel composition with unchanged geometry achieves a notably higher burnup (above 185 MWd/kgHM), a higher yield of average number of neutrons  $\bar{\nu}$  (up to 2.94), and a higher conversion ratio (up to 1.26) as compared to the base U-Cr enriched uranium fuel. This can extend the DFRm operation time without refueling up to 29 years acting as a nuclear battery and can efficiently manage long-lived nuclear waste.

## Streszczenie

Reaktor dwupłynowy (DFR) to koncepcja innowacyjnego, wysokotemperaturowego reaktora jądrowego na neutrony prędkie, opatentowana przez międzynarodową grupę naukowców z instytutu badawczego Institut für Festkörper-Kernphysik (IFK) w Berlinie. Cechą charakterystyczną jego konstrukcji jest zastosowanie dwóch niezależnych obiegów dla ciekłego paliwa (stopione sole (DFRs) lub stopiony metal (DFRm)) i chłodziwa (stopiony ołów). DFR łączy w sobie zalety zarówno reaktora prędkiego na stopionych solach (MSFR) jak i reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem (LFR), a także pozwala na optymalizację parametrów pracy w obydwu obiegach. W konsekwencji DFR charakteryzuje się wysoką gęstością mocy, bardziej efektywnym wykorzystaniem paliwa jądrowego i ujemnym temperaturowym współczynnikiem reaktywności. Wszystko to prowadzi z jednej strony do znacznego obniżenia kosztów, a z drugiej do zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa, tak istotnego w energetyce jądrowej.

W rozprawie przedstawiono nową koncepcję metalicznego reaktora dwupłynowego o mocy 250 MW<sub>th</sub> z ciekłym eutektycznym paliwem uranowo-chromowym o temperaturze znamionowej 1000°C. Praca ta nawiązuje do niedawno zgłoszonego przez IFK patentu WO2020088707-A1 i weryfikuje jego podstawowe założenia. Z przeprowadzonych analiz cieplno-przepływowych i obliczeń neutronowych wynika, że reaktor jest krytyczny i może pracować przez około 17 lat bez konieczności wymiany paliwa. Rdzeń reaktora o promieniu 0.6 m i wysokości 1.2 m składa się z 1666 kanałów paliwowych wykonanych z węgla krzemu (SiC) rozmieszczonych w układzie heksagonalnym. Wymiary reaktora są rezultatem analiz parametrycznych i materiałowych wykonywanych w odniesieniu głównie do efektywnego współczynnika mnożenia neutronów. Unikalna geometria, zastosowane materiały oraz bardzo wysokie parametry czynnika roboczego prowadzą do uzyskania niewielkich, kompaktowych rozmiarów reaktora.

Według przeprowadzonej analizy bezpieczeństwa, reaktor DFRm charakteryzuje się ujemnym temperaturowym współczynnikiem reaktywności, który wynosi około -3.00 pcm/K. Wszystkie badane materiałowe współczynniki reaktywności (dla paliwa, chłodziwa, reflektora) są ujemne i stają się jeszcze bardziej ujemne wraz ze zwiększającym się poziomem wypalenia paliwa. Okazuje się, że rozszerzalność termiczna materiałów reaktora oraz niewielkie zmiany geometrii nie wpływają znacząco na wartości badanych współczynników, które w każdym z rozpatrywanych przypadków pozostają ujemne. Wysoki ujemny współczynnik temperaturowy pozwala na samoregulację reaktora DFRm bez żadnych dodatkowych układów (np. prętów regulacyjnych), co znacznie upraszcza konstrukcję reaktora.

Zbadano też dwa dodatkowe składy paliwa zawierające aktywność włącznie do <sup>245</sup>Cm pochodzące z wypalonego paliwa jądrowego (SNF) z reaktorów lekkowodnych. Osiągnięte rezultaty wskazują na unikalne właściwości DFRm: znaczną redukcję aktywność mniejszych (w szczególności <sup>237</sup>Np i izotopów ameryku) przy zachowaniu wysokiego poziomu konwersji. Nieznaczna zmiana składu izotopowego paliwa przy niezmiętej geometrii umożliwia osiągnięcie znacznie wyższego poziomu wypalenia paliwa (powyżej 185 MWd/kgHM), wyższej średniej wydajności neutronów rozszczepieniowych  $\bar{\nu}$  (do 2.94) oraz wyższego współczynnika konwersji (do 1.26)

w porównaniu ze standardowym paliwem U-Cr. Dzięki temu okres eksploatacji reaktora DFRm może zostać wydłużony do 29 lat bez konieczności wymiany paliwa, co pozwala na pracę jako bateria jądrowa a długożyciowe odpady jądrowe są efektywnie zagospodarowane.