

# Reaktorių klasifikacija

Pasaulyje gaminami įvairių rūšių branduoliniai reaktoriai, kurie vieni nuo kitų skiriasi savo paskirtimi, konstrukcija, naudojamomis medžiagomis, dalijimosi reakcijoms palaikyti naudojamų neutronų energija ir gamybos kartomis. Reaktoriai klasifikuojami taip:

- Pagal branduolinio kuro pasiskirstymą reaktoriuje;
- Pagal lėtikliui naudojamą medžiagą;
- Pagal aušalui naudojamą medžiagą;
- Pagal dalijimosi reakcijoms sukelti naudojamų neutronų energiją;
- Pagal branduolinio kuro cheminę formą;
- Pagal branduolinių reaktorių paskirtį;

Dabar smulkiau aprašysime kiekvieną iš jų.

## Pagal branduolinio kuro pasiskirstymą reaktoriuje

1. **Homogeniniai reaktoriai.** Tokiuose branduoliniuose reaktoriuose branduolinis kuras sudaro mišinį su aušalo arba lėtiklio medžiaga. Tokio reaktoriaus pavyzdys yra išlydytos druskos reaktorius (MSR). Kuras gali būti skystas: pvz. vandenyje ištirpintas urano sulfatas arba kietas, pvz. urano oksido ( $UO_2$ ) mišinys esantis polietilene.
2. **Heterogeniniai reaktoriai.** Juose branduolinis kuras yra atskirtas nuo neutronų lėtiklio (pvz. RBMK reaktorius). Dauguma branduolinių reaktorių yra būtent heterogeniniai.

## Pagal lėtikliui naudojamą medžiagą

1. **Neutronų lėtinimui naudojamas grafitas.**
  - a. **Magnox reaktoriai.** Tai yra jau nebegaminami technologiškai pasenę branduoliniai reaktoriai. Šio tipo reaktoriai buvo pradėti gaminti 1956 m. rugpjūčio 27d. Didžiojoje Britanijoje, taip pat jie buvo eksportuojami į keletą pasaulio šalių. Reaktoriai buvo naudojami ir elektros energijai gaminti, ir gauti branduoliniam ginklui reikalingą plutonį. Pavadinimas „Magnox“ yra žodžių „Magnesium“ ir „non-oxidizing (liet. magnis ir nesioksiduojantis)“ santrumpa. Nesioksiduojantis magnio ir aliuminio lydinys buvo naudojamas kuro strypų gamybai. Kurui buvo naudojamas gamtinis (t. y. nesodrintas) uranas. Aušalui naudojamas anglies dvideginis, dalijimosi reakcijų kontrolei – boro-plieno strypai. Reaktoriaus pranašumai yra kuro strypų pakeitimo metu nenutrūkstamas eksploatavimas, tvirta reaktoriaus konstrukcija, reaktoriui aušinti naudojamos nesprogios dujos ir mažas „magnox“ lydinio neutronų sąveikos skerspjūvis. Tačiau šios rūšies reaktorius pasiekia mažą galią (iki 200 MW), kuro strypams laikyti naudojami „magnox“ lydinio vamzdžiai pasižymi pakankamai žema lydymosi temperatūra, „magnox“

lydinys reaguoja su vandeniu, taip pat senesnės konstrukcijos „Magnox“ reaktoriuose kaitintuvai, kuriuose iš reaktoriaus išeinantys aušinimo kanalai kaitindavo vandenį, buvo už reaktoriaus betoninio biologinio radiacinės apsaugos skydo, taip sukeldami aplinkos apšvitą dėl gama spinduliuotės bei neutronų pluošto.

Šiuo metu Didžiojoje Britanijoje veikia dvi Magnox reaktorius eksploatuojančios atominės elektrinės: Oldbury jėgainė, kuri uždaroma 2008 m. ir Wylfa elektrinė, kurios reaktorius bus stabdomas 2010 metais.

- b. Pažangus dujomis aušinamas reaktorius AGR (*angl.- Advanced Gas-cooled Reactor*). Tai yra patobulintas Magnox reaktorius. AGR kurui naudoja sodrintą uraną, todėl šios rūšies reaktoriaus kuro nereikia taip dažnai keisti kaip Magnox reaktoriuje. Taip pat AGR pasižymi aukštesne aušalo temperatūra, taigi ir didesniu šiluminiu naudingumu (šiluminis naudingumas – reaktoriaus elektrinės ir šiluminės galių santykis), kuris siekia 41 proc.. AGR yra eksploatuojami Didžiojoje Britanijoje esančiose 7 branduolinėse jėgainėse, kurios turi po 2 šios rūšies reaktorius. AGR elektrinė galia yra 555 – 625 MW. Pagrindiniai trūkumai yra didelis reaktoriaus užimamas tūris ir mažas kuro išdegimo gylis (taigi dėl palyginti mažo kuro degimo metu gaunamo šilumos kiekio padidėja reaktoriaus šiluminis naudingumas).
- c. RBMK (*rus. Реактор Большой Мощности Канальный*) reaktorius. Tai savitos konstrukcijos didelės galios reaktorius, Sovietų Sąjungoje naudotas ir elektros energijai, ir plutoniui išgauti. Tai yra vienintelis pasaulyje reaktorius lėtikliui naudojantis grafitą, o aušinimui-paprastą vandenį. Vienas iš RBMK reaktoriaus trūkumų yra teigiamas reaktoriaus reaktyvumo koeficientas. RBMK reaktoriuje lengvasis vanduo ( $H_2O$ ) naudojamas ir reaktoriaus aktyviajai daliai aušinti, ir neutronams sugerti. Taigi, šiame reaktoriuje grandininės branduolių dalijimosi reakcijos kontrolė priklauso ir nuo aušalo. Aušalo vandenyje atsiradę garų burbulai nesugeria neutronų, taigi suintensyvėja dalijimosi reakcijos, kurios dar labiau įkaitina aušalą, jame atsiranda dar daugiau garų burbulų ir reaktoriaus galia gali staigiai išaugti iki kelių šimtų kartų. Reaktoriuose su neigiamu reaktyvumo koeficientu aušale atsiradus pertekliniams garų burbulams skilimo reakcijos sulėtėja, nes aušalui ir neutronų lėtinimui naudojamas lengvasis vanduo ne taip efektyviai lėtina greituosius neutronus. Dėl Černobylio AE įvykusios avarijos metu atskleistų RBMK reaktoriaus trūkumų šio tipo reaktoriai pasaulyje daugiau nebestatomi. Iš viso buvo pagaminta 17 RBMK reaktorių, kurių 4 veikė Černobylio atominėje jėgainėje.
- d. Aukštatemperatūris reaktorius su rutuliniais šilumą išskiriančiais elementais (*angl. Pebble Bed Modular Reactor*). Tai naujos konstrukcijos kintamos galios reaktoriai. Priešingai nei įprasti lengvojo vandens reaktoriai, PBMR neturi nei kuro strypų, nei aušinančio vandens. Kuras yra sudarytas iš mažiųjų urano grūdelių, padengtų anglies ir keramikos sluoksniu. 15 000 tokių kruopelių supresuojamos į vieną 6 cm skersmens dydžio rutulį, kuris savo ruožtu įvelkamas į grafito šarvą. Rutulyje besidalijantis uranas išskiria šilumą, o grafitas sulaiko jonizuojančiąją spinduliuotę ir atlieka neutronų lėtinimo funkciją. Į vieną reaktoriaus indą sudedama apie 300 000 tokių rutuliukų, juos vėsina helio dujos, kurios šildamos plečiasi ir suka turbiną. Helis chemiškai ir radiologiškai yra inertiškas, todėl cirkuliuodamas reaktoriuje netampa radioaktyvus. Galima teigti, kad vienas toks rutulys yra tarsi mažas reaktorius. PBMR reaktorių elektrinė galia yra 110-140 MW, tačiau prireikus su nedidelėmis išlaidomis ją galima padidinti. Kitas privalumas yra tai, kad šiuose reaktoriuose negali įvykti radioaktyviųjų medžiagų nutekėjimo, nes net

ir kritiniu atveju vidaus temperatūra būna žemesnė nei lydosi keramika, kuria padengtas kuras. Nepaisant visko, šis reaktorius turi keletą trūkumų. Kuro rutuliai yra padengti grafitu, kuris yra degus. Dėl kuro formos tai pačiai galiai sukurti reikia didesnio kuro tūrio nei naudojant įprastus kuro strypus. Dėl to iškyla problemų saugant panaudotą branduolinį kurą. PBMR reaktorių panaudojimo galimybės pramoniniu mastu vis dar tiriamos.

## 2. Neutronų lėtinimui naudojamas sunkusis vanduo.

Šiuose reaktoriuose neutronų lėtinimo funkciją atlieka sunkusis vanduo - deuterio (deuteris – vandenilio izotopas su neutronu ir protonu branduolyje) oksidas ( $D_2O$ ). Sunkusis vanduo mažai sugeria neutronus, todėl, skirtingai negu lengvojo vandens reaktoriuose, kurui naudojamo urano nereikia sodrinti iki didelės koncentracijos. Todėl reaktoriuje kurui gali būti naudojamas ir nesodrintas uranas. Galima išskirti kelias pagrindines sunkiojo vandens reaktorių rūšis:

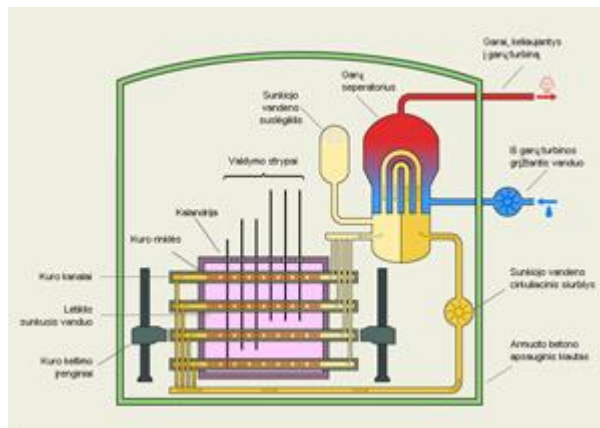
- a. CIRUS (*angl. Canada India Research U.S.*). Tai yra tiriamasis reaktorius, kurį Kanada 1954 m. pardavė Indijai, ir kuris neutronų lėtinimui naudoja sunkųjį vandenį. Šis reaktorius kurui naudoja gamtinį uraną ir pasiekia 40 MW galią. CIRUS neatitinka TATENA saugumo reikalavimų (kurie nustojo galioti, kai reaktorius buvo parduotas). Nors Kanada ir JAV sutartyse kėlė reikalavimus, jog šis reaktorius turi būti naudojamas tik taikiems tikslams, Indija šiuo reaktoriumi kasmet pagamindavo 6,6 – 10,5 kg plutonio, tinkamo branduolinio ginklo gamybai. 1997 m. CIRUS buvo sustabdytas rekonstrukcijai ir 2005 m. vėl pradėjo veikti. Visgi JAV ir Indijos vadovai sutarė 2010 m. sustabdyti šio reaktoriaus darbą.
- b. NRX buvo didžiausias sunkųjį vandenį neutronų lėtinimui ir lengvąjį aušinimui naudojantis tyrimų reaktorius, 1947 m. pastatytas Kanados Chalk River laboratorijose. Jo šiluminė galia buvo 10 MW, 1954 m. padidinta iki 42 MW. Tuo metu tai buvo didžiausios galios pasaulyje tiriamasis reaktorius, grandininių reakcijų metu generuodavęs milijardus laisvų neutronų. Dėl šių savybių jis buvo naudojamas medžiagų tyrimo pramonėje bei medicinoje. NRX reaktorius yra cilindro formos, kurio sienos pagamintos iš aliuminio. Cilindro skersmuo yra 8m, aukštis – 3 m. Cilindre yra 175 šešių cm skersmens sunkiojo vandens bei helio pripildyti vamzdžiai, kurių bendras tūris yra 14 000 litrų. Keičiant vandens kiekį, reguliuojama reaktoriaus galia. Tarpuose tarp šių vamzdžių yra aliumininiai kuro strypai (31 mm skersmens ir 3,1 m ilgio, kiekvieno masė yra 55 kg), kurie yra įmaiti į aliumininis vamzdžius su 250 litrų/s greičiu tekančiu lengvojo vandens aušalu. Branduolių dalijimosi reakcijoms reguliuoti naudojama 12 boro strypų, kurie valdomi pneumatine sistema ir elektromagnetu. Jeigu reaktoriaus galia staiga padidėja, elektromagnetas išjungiamas ir visi kontroliniai strypai įleidžiami į reaktoriaus aktyviąją dalį.
- c. CANDU (*angl. "CANada Deuterium Uranium"*) reaktorius. Tai yra plačiai nuo 1960 m. naudojamas Kanadoje sukurtas reaktorius. Visi dabar Kanadoje veikiantys branduoliniai reaktoriai yra CANDU tipo. Daugiausia šios rūšies reaktorių turi jų gamintoja Kanada – 18 (šiuo metu 2 atnaujinami, 5 - išmontuojami), 4 blokus eksploatuoja Pietų Korėja, po 2 blokus – Kinija, Indija ir Rumunija, po vieną bloką - Pakistanas ir Argentina.

CANDU reaktoriuje aušalui naudojamas sunkusis vanduo, kuris teka aukšto slėgio pirminiu aušinimo kontūru. Garų separatoriuje mažesnio slėgio antrinio aušinimo kontūro vanduo užverda ir garai keliauja sukurti generatoriaus turbinas. Nepanaudota

vandens šiluminė energija išsklaidoma aplinkoje. Šio tipo reaktoriuose kuras laikomas 10 cm skersmens kuro rinklėse. Norint pakeisti kurą, reaktoriaus nereikia sustabdyti – pakanka panaudotas kuro rinkles kuro perkrovimo mašina pakeisti naujomis. Tam, kad laisvieji neutronai galėtų netrukdomi pereiti pro kuro rinklių sienelės, šių sienelės yra gaminamos iš cirkonio, kuris nesugeria neutronų. Kuro kanalai yra panardinti į žemo slėgio sunkiojo vandens (kuris lėtina neutronus) pilną rezervuarą, vadinamą kalandrija. Grandinės reakcijos stabilumą užtikrina valdymo strypai. Esant grėsmei dalijimosi reakcijai tapti nevaldoma, į kalandriją įleidžiama gadolinio nitrato ( $Gd(NO_3)_3$ ) tirpalo, kuris greitai absorbuoja perteklinius neutronus.

Pagrindinis CANDU reaktoriaus privalumas yra kurui naudojamas nesodrintas gamtinis uranas. Tai daryti leidžia maža sunkiojo vandens neutronų sugertis. Dėl šios priežasties šio reaktoriaus eksploatacija yra palyginti pigi.

Reaktoriaus kuro rinklės sudarytos iš 28 arba 37 pusės metro ilgio cirkonio strypų, kuriuose yra urano tabletės. Kiekviename kuro kanale telpa 12 tokių rinklių.



1 pav. CANDU reaktoriaus schema

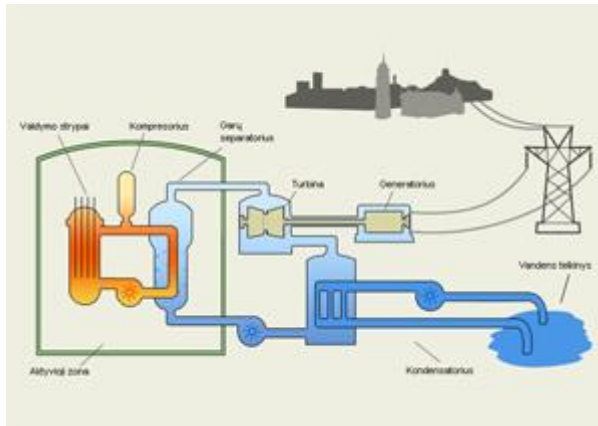


2 pav. CANDU kuro rinklės

### 3. Lėtikliui naudojamas lengvasis (įprastas) vanduo.

Lengvojo vandens reaktoriai (*angl. LWR - Light Water Reactor*) neutronų lėtinimui naudoja lengvąjį vandenį ( $H_2O$ ). Aušinimui taip pat naudojamas įprastas vanduo. Branduoliniam kurui naudojamas sodrintas 3proc. U–235, kuris reaktoriuje keičiamas nustatytu periodiškumu perkraunant apie 25 proc. kuro. Reaktoriaus saugumą užtikrina paprastas neutronus lėtinančio vandens kiekio sumažinimas. Suintensyvėjus dalijimosi reakcijoms, išleidžiama dalis lėtiklio, taip sumažinant neutronų lėtinimo tikimybę. Sumažėjus lėtujų neutronų skaičiui, sulėtėja ir dalijimosi reakcijos.

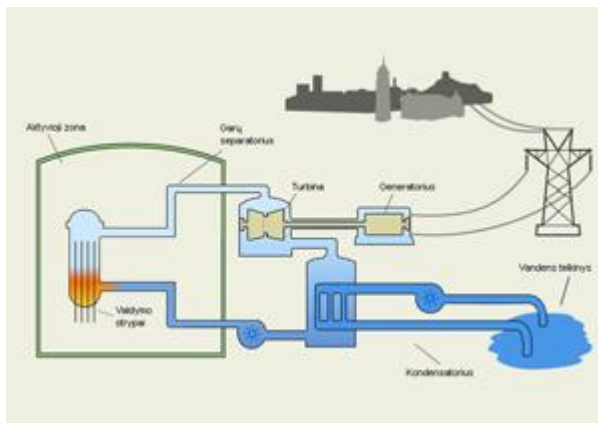
Lengvojo vandens reaktoriai yra labiausiai paplitusi branduolių reaktorių rūšis. Plačiausiai naudojamas yra suslėgto vandens reaktorius (*angl. PWR - Pressurized Water Reactor*).



3 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus (PWR) supaprastinta schema

3 pav. matyti, jog reaktorių aušina 2 kontūrai. Pirmuoju kontūru tekančio vandens slėgis siekia 15-16 MPa, todėl vanduo jame neužverda. Antrajame kontūre tekančio vandens slėgis yra daug mažesnis, todėl garų separatoriuje vanduo nesunkiai užverda. Pro garų separatoriaus viršutinę dalį išeinantys garai gali būti naudojami generatoriaus turbinai sukuti, povandeniniams ir kitiems jūrų laivams varyti, pastatams šildyti ar pan. Elektros energijos gamybai pasaulyje šiuo metu naudojama daugiau nei 230 PWR reaktorių. Jie pasižymi dideliu stabilumu, neutronų lėtinimui naudojamas lengvasis vanduo yra pigus. Dėl dviejų reaktoriaus aušinimo kontūrų, antrajame cirkuliuojantis vanduo nėra užterštas radionuklidais.

PWR trūkumas yra didelis pirminio kontūro slėgis, kurio užtikrinimui reikalingos brangios ir tvirtos konstrukcijos. Kadangi lengvasis vanduo stipriai sugeria neutronus, branduolinis kuras turi būti sodrinamas. Kitas lėtikliui lengvąjį vandenį naudojantis reaktorius yra verdančio vandens reaktorius (*angl. BWR – Boiling Water Reactor*). Šiame reaktoriuje aušinimui naudojamas vienas kontūras, kuriame yra 2 kartus mažesnis slėgis negu suslėgto vandens reaktoriuje. BWR aušinimo kontūre palaikomas 75 atmosferų slėgis vandens virimo temperatūrą pakeliantis iki 285°C. Taip pat šis aušinimui naudojamas distiliuotas lengvasis vanduo greituosius neutronus verčia šiluminiais. Dėl savo nesudėtingos palyginti su suslėgto vandens reaktoriumi konstrukcijos (jame reikalinga sudėtinga aukšto slėgio palaikymo sistema) BWR plačiai naudojamas elektros gamybai civiliniams tikslams.



4 pav. Verdančio vandens reaktoriaus (BWR) supaprastinta schema

Kiti verdančio vandens reaktoriaus privalumai yra žemesnė kuro temperatūra lyginant su PWR kuru bei dėl žemesnio aušinimo kontūro slėgio ir paprastesnės jo konstrukcijos mažesnė aušalo išsiliejimo tikimybė. Vandens cirkuliacijai aušinimo kontūru nereikalingi didelės galios siurbliai. Šiuo metu JAV projektuojamas naujasis ekonomiškasis supaprastintas verdančio vandens reaktorius ESBWR (*angl. Economic Simplified Boiling Water Reactor*), kuriame vanduo reaktoriaus korpusu cirkuliuoja be jokios išorinės jėgos poveikio (vadinamasis pasyvusis reaktorius).

BWR trūkumai yra sudėtingi kuro suvartojimo skaičiavimai, kurie atsiranda dėl skirtingų aušalo fazinių būsenų (jame garai sudaro 12-15 proc. viso aušalo). Dėl vieno aušinimo kontūro buvimo garų turbina yra užteršiama trumpaamžiais radionuklidais, todėl yra reikalinga papildoma radiacinė kontrolė. Schemoje viršuje matyti, jog kontroliniai strypai į reaktoriaus aktyviąją dalį įkišami per apatinę reaktoriaus korpuso dalį. Tai reikalauja papildomų hidraulinių sistemų, o reaktoriaus veiklos sutrikimo atveju yra tikimybė, jog nesuveikus kontrolinių strypų reguliavimo sistemoms gali įvykti branduolinė avarija. Daugumos kitų reaktorių kontroliniai strypai į reaktoriaus aktyviąją dalį įleidžiami pro viršutinę jos dalį, o suintensyvėjus dalijimosi reakcijoms išsijungia kontrolinius strypus valdantys elektromagnetai ir šie gravitacijos jėgos veikiami nusileidžia į reaktoriaus aktyviąją zoną.

#### 4. Lėtikliui naudojami lengvieji metalai.

##### a. Išlydytų druskų reaktorius (*angl. MSR – Molten Salt Reactor*)

Tai naujos konstrukcijos reaktorius, kuriame aušalui naudojama išlydytos druskos. Reaktoriaus kuras yra išlydytas įvairių druskų mišinys, kurį sudaro urano arba plutonio fluoridas, cirkonio arba natrio fluorida druska ir neutronų lėtinimui naudojamos ličio fluorida (LiF) arba berilio fluorida (BeF) druskos. Išlydytų druskų reaktoriaus druskų garų slėgis yra mažas, taip pat perkrauti kurą, pašalinti dalijimosi produktus galima nestabdant reaktoriaus. Šie reaktoriai pasižymi ypatingai geromis vidinėmis saugos užtikrinimo funkcijomis, susijusiomis su savaiminiu kuro drenažu gresiant avarijai. Skystas kuras yra nedegus, jam išsiliejus į aplinką radionuklidai nepasklistų į aplinką, bet liktų kuro matricoje. Išlydyta druska gali cirkuliuoti esant ypatingai aukštomis temperatūroms, taip pasiekiamas aukštas elektros energijos gamybos efektyvumas. Dėl aukštų išlydytos druskos temperatūrų MSR gali būti naudojamas vandenilio gamybai arba kitoms cheminėms reakcijoms kritinėmis sąlygomis stebėti. Šie reaktoriai yra mažo dydžio bei nesunkiai reguliuojamos galios, todėl ateityje jie gali būti naudojami kaip automobilių varikliai. Šiuo metu yra vykdomi intensyvūs MSR moksliniai tyrimai ir 2025 m. planuojama pradėti šių reaktorių eksploatavimą.

##### b. Skystu metalu aušinamas reaktorius (*angl. LMCR – Liquid Metal Cooled Reactor*)

Tai yra pažangus skystu metalu aušinamas reaktorius, jau naudojamas povandeniniuose laivuose. Šio tipo reaktoriai, kaip ir MSR, dar nėra naudojami komercinei elektros energijos gamybai. Skystas metalas gali cirkuliuoti esant ypač aukštomis temperatūroms (iki 800°C). Tai gali būti natrio, natrio-kalio ar plieno-švino junginiai, gyvsidabris. Svarbu pabrėžti, kad

dauguma LMCR yra greitųjų neutronų reaktoriai, tik kai kurie dalijimosi reakcijoms sukelti naudoja lėtuosius neutronus, kurie gaunami naudojant BeO lėtiklį.

#### **5. Lėtikliui naudojamos organinės medžiagos.**

Šie reaktoriai yra pastaruoju metu vykdomos naujų branduolinių reaktorių paieškos ir mokslinių tyrimų objektas. Juose aušalui ir lėtikliui naudojami bifenilo ir terfenilo angliavandeniliai

### **Pagal aušalui naudojamą medžiagą**

#### **1. Reaktorius aušinamas vandeniu.**

Šiai kategorijai priskiriami suslėgto vandens reaktorius (PWR), verdančio vandens reaktorius (BWR) bei baseino tipo atvirasis reaktorius, kuriame kuro strypai su kontroliniais strypais yra panardinti į vandens baseiną, kurio vanduo atlieka neutronų lėtinimo funkciją, aušina reaktorių bei apsaugo operatorius ir aplinką nuo žalingo jonizuojančios spinduliuotės poveikio.

#### **2. Skystu metalu aušinami reaktoriai.**

Vanduo negali būti naudojamas greitųjų neutronų reaktorių aušinimui, todėl tam tikslui reaktoriaus aušalui naudojami skysti metalai, kurie nesugeria ir nelėtina greitųjų neutronų. Tai natrio, natrio kalio, plieno ar plieno-švino metalais aušinami reaktoriai.

#### **3. Dujomis aušinami reaktoriai (angl. GCR – Gas Cooled Reactor).**

Tai reaktoriai, neutronų lėtinimui naudojantys grafitą, o aušalui – anglies dvideginio dujas. Yra išskiriami 2 GCR tipai: Jungtinės Karalystės sukurtas Magnox reaktorius ir tuo pačiu metu Prancūzijoje sukonstruotas UNGG reaktorius. Šie reaktoriai jau nebenaudojami. Pagrindinis jų skirtumas yra kuro apvalkalui naudojamos medžiagos: Magnox reaktoriuje naudojamas magnio-aliuminio lydinys, UNGG – magnio-cirkonio. Didžiojoje Britanijoje Magnox reaktorius pakeitė pažangusis dujomis aušinamas reaktorius (AGR), Prancūzijoje UNGG – suslėgto vandens reaktorius (PWR).

#### **4. Išlydyta druska aušinami reaktoriai.**

Šios rūšies reaktoriai trumpai aptarti reaktorių skirstymo pagal lėtiklį punkte.

### **Pagal dalijimosi reakcijoms sukelti naudojamų neutronų energiją**

#### **1. Lėtųjų (šiluminių) neutronų reaktoriai.**

Tai labiausiai paplitę branduoliniai reaktoriai. Juose lėtikliui naudojama medžiaga po dalijimosi reakcijų susidariusių greitųjų neutronų energiją sumažina iki 0,025 eV. Tokios energijos neutronai vadinami šiluminiais. Jie yra stipriai sugeriami U-235 branduolių ir beveik nesugeriami U-238 branduolių.

## 2. Greitųjų neutronų reaktoriai.

Šiuose reaktoriuose grandinės branduolių dalijimosi reakcijas palaiko greitieji neutronai (jų energija siekia 1 MeV), todėl nereikalingas neutronų lėtklis. Toks reaktorius turi naudoti didelio prisodrinimo branduolinį kurą. Greitųjų neutronų sukeltų dalijimosi reakcijų metu gaunama daug daugiau dalijimosi neutronų lyginant su šiluminių neutronų sukeliomomis reakcijomis. Pertekliniai neutronai gali būti naudojami kitiems tikslams (pvz. gaminti branduolinį kurą (greitieji dauginimo reaktoriai) arba ilgaamžius radionuklidus versti trumpaamžiais).

Greitųjų neutronų reaktorių aušinimui naudojamas skystas metalas arba dujos. Kurui turi būti naudojamas didelio sodrinimo kuras, nes Pu-239 neutronų sąveikos skerspjūvis ir U-238 neutronų sugerties skerspjūvis yra apie 12 kartų mažesni greitiesiems neutronams lyginant juos su šiluminiais.

## Pagal branduolinio kuro cheminę formą

### 1. Oksidinio kuro reaktoriai.

- Urano dioksido (UO<sub>2</sub>) kuro tabletes naudojantys reaktoriai (pvz. PWR, BWR ar CANDU reaktoriai).
- Įvairių oksidų mišinį kurui naudojantys MOX (angl. MOX – Mixed OXide) reaktoriai. MOX kurą sudaro plutonio ir natūralaus arba branduoliniame reaktoriuje panaudoto urano mišinys, kurio savybės panašios kaip ir sodrinto arba mažai sodrinto urano.

### 2. Metalinio kuro reaktoriai. Šio tipo kuras pasižymi daug didesniu šiluminiu laidumu už oksidinį kurą, tačiau negali būti naudojamas aukštose temperatūrose.

- TRIGA (*angl. Training, Research, Isotopes, General Atomics*) kuro reaktoriai. TRIGA reaktorius naudoja urano-cirkonio hidrido (UZrH) kurą. Šiuose reaktoriuose gaunami pertekliniai neutronai naudojami moksliniuose tyrimuose. JAV šiuo metu turi 35 TRIGA reaktoriaus, tiek pat jų yra ir kitose pasaulio šalyse.
- Aktinidų kuro reaktoriai. Šio tipo kuras gaunamas greituosiuose dauginimo reaktoriuose plutoniui arba uranui sugėrus neutronus. Aktinidų kurą sudaro cirkonio, plutonio, urano ir mažųjų aktinidų (neptunio, americio, kiurio, berkljo, kalifornio, einšteinio ar fermio) lydinys.

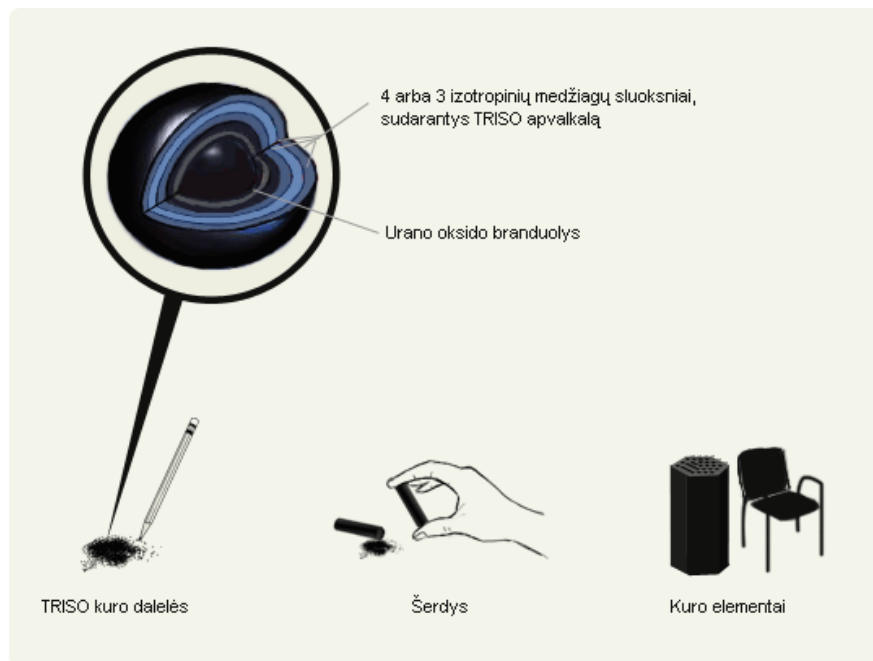
### 3. Kitų, rečiau naudojamų cheminių kuro formų branduoliniai reaktoriai:

- Keramikinio kuro. Šis kuras pasižymi dideliu šiluminiu laidumu bei aukštomis lydymosi temperatūromis, tačiau augant temperatūrai toks kuras ima termiškai plėstis. Taip pat keramikinė kuro forma dar nėra pakankamai ištyrinėta.
- Urano nitrido (UN) kuro reaktoriai. Jie naudojami NASA projektuose. UN kuro privalumas yra aukštesnis nei UO<sub>2</sub> šiluminis laidumas ir labai aukšta lydymosi temperatūra. Tokio kuro trūkumas yra brangus azoto <sup>15</sup>N gavimas.
- Urano karbido reaktoriai. Šis kuras ateityje gali būti naudojamas IV kartos dujomis aušinamame greitųjų neutronų reaktoriuje.
- Skysto kuro reaktoriai:
  - Išlydytų bevandenių druskų reaktoriai. Šiuose reaktoriuose branduolinis kuras yra ištirpintas aušalo medžiagoje. Šiai kategorijai



priklauso išlydytos druskos bei skystų fluoridų ( $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ ) reaktoriai.

- Vandeninių urano druskų tirpalų reaktoriai. Tokį kurą naudoja vandeniniai homogeniniai reaktoriai, kuriuose kuras sumaišytas su aušalu bei lėtikliu. Tokie reaktoriai yra mažos galios bei turi didelį trūkumą: įvykus avarijai ir kurui turint sąlytį su aplinka, radionuklidai lengvai patenka į aplinką.
- TRISO(*angl. TRISO - Tristructural-isotropic*) kuro reaktoriai. TRISO kurą sudaro urano oksido (kartais UC ar UCO) branduolys, padengtas 4 arba 3 izotropinių medžiagų sluoksniais, kurie apsaugo kurą nuo sąlyčio su aplinka esant itin aukštoms mechaninėms bei terminėms apkrovoms. Toks kuras naudojamas keramikinio guolio moduliniam reaktoriuje (*angl. PBMR - Pebble Bed Modular Reactor*). Taip pat ateityje TRISO kuras bus naudojamas IV kartos labai aukštos temperatūros reaktoriuose VHTR.



5 pav. TRISO kuras

## Pagal branduolinių reaktorių paskirtį

1. **Branduoliniai reaktoriai, skirti elektros energijos gamybai branduolinėse jėgainėse.** Šiai kategorijai priklauso didžioji dalis jau aptartų branduolinių reaktorių.
2. **Reaktoriai, skirti transporto priemonių varomajai jėgai generuoti:**
  - a. Jūrų laivyno laivams (daugiausiai kariniame jūrų laivyne) varyti.
  - b. Aviacijoje naudojamų raketų, kosminių erdvėlaivių varymui.
3. **Reaktoriai, kurių sukuriama šiluma naudojama:**
  - a. Vandens gėlinimui. Tokiu būdu gėlu vandeniu aprūpinamos vietovės, kuriose labai trūksta geriamojo vandens. Didžiausia vandens gėlinimo jėgainė pasaulyje yra Jungtiniuose Arabų Emyratuose. Per metus joje išgaunama 300

milijonų kubinių metrų geriamojo vandens (tokio kiekio vandens Vilniaus miestui užtektų 9 metus). Ši vandens gėlinimo jėgainė nėra branduolinė.

- b. Gyvenamųjų ir gamyklų pastatų šildymui.
- c. Vandens gamybai, kuris vėliau panaudojamas reakcijoms su deguonimi, kurių metu gauta energija naudojama transporto priemonėms varyti arba elektros energijai gaminti.

#### 4. **Branduolių virsmo reaktoriai, kuriuose vieni branduoliai virsta kitais:**

- a. Dauginimo reaktoriai (*angl. Breeder reactors*), kuriuose tuo pačiu metu kurui naudojamos daliosios ir nedaliosios medžiagos, gamina daliąsias medžiagas. Skiriami 2 dauginimo reaktorių tipai:
  - Greitieji dauginimo reaktoriai (*angl. fast breeder reactor*). Dėl greitųjų neutronų reaktoriuose gaunamų perteklinių neutronų galima eksploatuoti branduolinį reaktorių, kurį pradžioje pakrovus plutoniu, galima iš gamtinio arba jau panaudoto urano gaminti naują branduolinį kurą.
  - Šiluminiai dauginimo reaktoriai (*angl. thermal breeder reactor*). Tokiuose reaktoriuose gaminamas branduoliam kurui tinkantis dalusis U-233 izotopas. Pradžioje reaktorių pakraunamas sodrintu uranu, plutoniu arba MOX kuru. Toliau eksploatuojant reaktorių yra reikalingas Th-232, kuris, pagavęs neutroną ir įvykus beta skilimui, virsta U-233 branduoliu. Kadangi Th-232 izotopas gamtoje aptinkamas dažnai, todėl taip sumažinama branduolinio kuro gamybos kaina.
- b. Reaktoriai, kuriuose gaunami įvairūs radioaktyvūs americio izotopai (kurie naudojami dūmų detektoriuose) arba Co-60 ar Mo-99 izotopai, kurie naudojami medicinoje gydymo ir diagnostikos tikslams.
- c. Reaktoriai, kuriuose gaunami branduoliniams ginklams tinkami cheminiai elementai.

#### 5. **Moksliniai tiriamieji reaktoriai.** Juose gaunami laisvieji neutronai, todėl šie reaktoriai naudojami kaip neutronų šaltiniai medžiagų analizei, moksliniams tyrimams, radioizotopams, kurie naudojami medicinoje bei pramonėje, gauti. Moksliniai tiriamieji reaktoriai yra daug mažesni už kitų rūšių reaktorių, todėl jie naudojami nemažai pasaulio universitetų. Šiuo metu pasaulyje yra apie 280 tokių reaktorių, jie naudojami 56 valstybėse. Kai kurie tyrimų reaktoriai naudoja didelio sodrinimo uraną, todėl stengiamasi tokių kurą pakeisti mažo sodrinimo uranu.