

---

# Konteinerių CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500 su panaudotu branduoliniu kuru kritiškumo įvertinimas

---

**Artūras Šmaižys,  
Povilas Poškas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduolinės inžinerijos  
problemų laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas*

Panaudojant SCALE kompiuterinių kodų sistemą (JAV) atlikta dviejų tipų konteinerių CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500, skirtų ilgalaikiam panaudoto branduolinio kuro saugojimui (2%  $U^{235}$  pradinis išodrinimas) Ignalinos AE, kritiškumo analizė. Skaičiavimai atlikti esant įvairiam konteinerių užpildžiusio vandens tankiui ir lygiui tiek esant normaliam panaudoto branduolinio kuro kasečių išsidėstymui, tiek hipotetinių avarijų atvejais. Gauta, jog visais atvejais neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{\text{eff}}$  nėra didesnis už leistiną 0,95 reikšmę.

**Raktažodžiai:** panaudotas branduolinis kuras, kritiškumas, konteineris, ilgalaikis sausas saugojimas, normali eksploatacija, avarinės situacijos

---

## 1. ĮVADAS

Statant Ignalinos AE buvo planuota, kad išlaikius panaudotą branduolinį kurą baseinuose apie trejus metus, jis bus išvežtas į Rusiją perdirbti ir palaidoti. Tačiau atkūrus Lietuvoje nepriklausomybę, situacija visiškai pasikeitė, todėl reikėjo skubiai spręsti, kaip toliau tvarkyti panaudotą branduolinį kurą Lietuvoje, nes kuro baseinai jau beveik užpildyti. Įvertinus įvairius variantus, buvo nutarta pereiti prie visiškai kitokios panaudoto branduolinio kuro saugojimo technologijos, t. y. jį saugoti sausuose konteineriuose. Tuo tikslu buvo numatyta pastatyti panaudoto branduolinio kuro saugojimo (iki 50 metų) aikštelę Ignalinos AE teritorijoje ir pradžia išigyti šešiasdešimt Vokietijos firmos GNB konteinerių. Jau nupirkta 20 konteinerių – tai metaliniai CASTOR RBMK-1500 tipo (toliau CASTOR) konteineriai, o kitus (40 vnt.) dar numatoma nupirkti – tai metalo ir betono tipo CONSTOR RBMK-1500 (toliau CONSTOR) konteineriai.

Konteineriams panaudotam branduoliniam kurui saugoti keliami labai dideli saugos reikalavimai, nes panaudotas branduolinis kuras yra labai pavojingas tiek branduoliniu, tiek radiaciniu požiūriu. Todėl atliekant saugos analizės įvertinimą paprastai atliekama ir nepriklausoma jos ekspertizė. Lietuvos energetikos institutas kaip tik ir buvo atsakingas už tokios ekspertizės atlikimą.

Konteinerių panaudotam branduoliniam kurui saugoti saugos analizė aprėpia daug klausimų. Šia-

me straipsnyje pateikiamas tikrai CASTOR ir CONSTOR tipų konteinerių kritiškumo įvertinimas. Tam tikslui buvo panaudota JAV kompiuterinių kodų sistema SCALE. Atliekant konteinerių kritiškumo įvertinimą, prielaidos dėl konteinerių komponentų mechaninių deformacijų buvo padarytos daug konservatyvesnės negu jos yra gautos saugos įvairių avarinių situacijų metu analizės ataskaitoje.

Pagrindinis saugos kriterijus tokiai sistemai – efektinis neutronų daugėjimo koeficientas neturi būti didesnis už 0,95 [1]. Siekiant padidinti atsargos laipsnį labai dažnai vykdant kritiškumo analizę priimamas ne realaus išdegimo kuras, o šviežias, t. y. niekada reaktoriuje nebuvęs, kuras, kurio reaktyvumas yra didžiausias. Taip padaryta ir šiuo atveju. Be to, nors šiuose konteineriuose numatyta saugoti 2%  $U^{235}$  pradinio išodrinimo panaudotą branduolinį kurą, atliekant skaičiavimus konservatyviai buvo tarta, jog kuro išodrinimas yra 2,4%  $U^{235}$ .

## 2. KRITIŠKUMO ĮVERTINIMO METODIKA IR SCALE KOMPIUTERINIŲ KODŲ SISTEMA

Sistemoje, kurioje yra dalijimosi medžiaga, dalijantis sunkiesiems branduoliams išsiskyrę antriniai neutronai savo ruožtu gali sukelti naujų branduolių dalijimąsi – taip gali nenutrūkstamai vykti branduolių dalijimosi grandininė reakcija, kuri apibūdinama neutronų daugėjimo koeficientu. Begalinei vienalytei terpei šis koeficientas užrašomas taip:

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f; \quad (1)$$

čia  $\eta$  – neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtakos koeficientas;  $\epsilon$  – neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos koeficientas;  $p$  – tikimybė išvengti rezonansinio pagavimo;  $f$  – šiluminio panaudojimo koeficientas.

(1) formulė vadinama keturių dauginamųjų formule.

Kai aktyvioji zona yra baigtinių matmenų, naudojamas efektyvus neutronų daugėjimo koeficientas, kurį galima traktuoti įvairiai:

$$k_{eff} = \frac{\text{neutronų skaičius „n+1“ kartoje}}{\text{neutronų skaičius „n“ kartoje}} = \frac{\text{neutronų daugėjimas}}{\text{neutronų absorbcija + neutronų nuotėkis}}$$

$$k_{eff} = \eta \epsilon p f P_1 P_2; \quad (2)$$

čia  $P_1$  – tikimybė, kad greitieji neutronai nenutekės,  $P_2$  – tikimybė, kad šiluminiai neutronai nenutekės.

Efektinis neutronų daugėjimo koeficientas priklauso nuo skyrančio elemento prigimties, jo grynumo, kiekio bei formos. Skyrančios medžiagos tūris ir masė, kuriems esant neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{eff} = 1$ , vadinami kritiniu tūriu ir kritine mase.

Yra sukurti įvairūs kritiškumo įvertinimo kompiuteriniai kodai. Vienas iš jų – SCALE kodų sistema, kuri, be kritiškumo, atlieka ir daugelio kitų faktorių įvertinimą.

SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) kodų sistemos istorija prasideda 1969 m., kai Oak Ridge nacionalinė laboratorija (ORNL), pagal JAV Atominės energijos komisijos (AEK) pavedimą, pradėjo sertifikuoti transportavimo konteinerius, atlikdama skaičiavimus KENO kodu, kuris statistiniu Monte Karlo metodu įvertindavo kritiškumą. 1969–1976 m. AEK patikėjo ORNL atlikti transportavimo konteinerių kritiškumo, radiacinės saugos ir šilumos mainų analizę.

SCALE sistema sudaryta iš „standartinių“ analizės sekų (valdymo modulių), kurios, atlikdamos numatytos sistemos analizę, automatiškai kreipiasi į tam tikrus kodus (funkcinius modulius). Funkciniais moduliais galima atlikti lankstesnę sistemos analizę, tačiau įvedimo logika gerokai sudėtingesnė nei valdymo modulių, be to, funkciniai moduliai turi būti vykdomi atskirai nuo valdymo modulių.

SCALE versijos 4.3 valdymo moduliai:

– CSAS svarbiausias kritiškumo įvertinimo valdymo modulis, kuris skaičiuoja sistemos neutronų daugėjimo koeficientą. Yra aštuonios sekos, kurios gali atlikti vienmatės (1-D) arba trimatės (3-D) sistemos

analizę, rasti sistemos kritinius geometrinius matmenis ar medžiagos koncentraciją;

– CSAS6 atlieka 3-D sudėtingos geometrinės sistemos neutronų daugėjimo koeficiento skaičiavimą Monte Karlo metodu;

– SAS1, SAS3, SAS4 moduliai, kurie pagal 1-D ar 3-D Monte Karlo modeliavimo metodus atlieka radiacinės saugos analizę;

– SAS2H atlieka branduolinio kuro išdegimo/skilimo, fotonų ir neutronų šaltinio spektro skaičiavimus. 1-D modeliu įvertina cilindrinės sistemos radialinę ekvivalentinę dozę;

– QADS  $\gamma$  spinduliavimo apsaugą skaičiuoja 3-D point-kernel metodu;

– HTAS1 šilumos mainų analizės valdymo modulis.

Akronimai CSAS, SAS, HTAS atitinkamai reiškia Criticality Safety Analysis Sequences, Shielding Analysis Sequences, Heat Transfer Analysis Sequences.

Atliekant konteinerių CONSTOR ir CASTOR RBMK-1500 kritiškumo įvertinimą, efektyvus neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{eff}$  buvo skaičiuojamas valdymo modulių CSAS25. Minėtas modulis kreipiasi į funkcinius modulius (kodus): BONAMI [2], NITAWL-II [3], KENO V.a [5]. Kad būtų sumažinta žmogaus daromų įvedimo klaidų tikimybė, SCALE sistemos duomenų valdymas yra kiek įmanoma automatizuotas. CSAS25 ir daugeliui kitų valdymo modulių yra pritaikyta standartinė procedūra, kuri pateikia skaičiavimams tinkamus duomenis. Šią procedūrą atlieka Medžiagos Informacijos Apdorotojas (Material Information Processor) [4], kuriam pateikus įvedimo duomenis: medžiagos standartinį simbolinį žymėjimą, mišinio numerį, procentinę dalį teorinės tankio reikšmės, temperatūrą, izotopinę sudėtį, celę sudarančias medžiagas bei jų geometrinius parametrus, sukuriamas uždaviniui reikalinga skerspjūvių biblioteka, kurią, kaip dvejetainį įvedimo failą, naudoja atitinkami kodai.

BONAMI – funkcinis modulis, atliekantis rezonansinius nuklidų savidangos skaičiavimus, paremtus Bondarenkos metodu, ir sukuriantis problemai reikalingų duomenų kompleksus. Pagrindinis parametras, kurį skaičiuoja BONAMI, tai efektyvus tam tikros energetinės grupės skerspjūvis:

$$\sigma_g = \frac{\int_g du \sigma(u) \phi(u)}{\int_g du \phi(u)}; \quad (3)$$

čia  $\sigma(u)$  – skerspjūvis, tenkantis letargijos vienetui  $u$ ,  $\phi(u)$  – neutronų srautas, tenkantis letargijos vienetui  $u$ .

Kadangi skerspjūviai paprastai būna žinomi (iš rezonansinių parametrų, lentelių ir pan.), tai rezonansinis savidengimas reikalauja nustatyti neutronų srautą  $\phi(u)$ . Skerspjūvio skaitinė vertė priklauso nuo neutronų energijos ir temperatūros.

NITAWL-II – pagal Nordheimo integralinį būdą, įvertina rezonansinę savidangą nuklidų, turinčių rezonansinius parametrus. Nordheimo integralinis būdas suvedamas į neutronų srauto medžiagoje, turinčioje rezonansinius absorberius, skaičiavimą. Neutronų srautas, priklausantis nuo energijos  $E$ , skaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$\begin{aligned} \phi(E)\Sigma_T(E) = \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{1 - P_o^*(E)^{\frac{E}{1-\alpha_i}}}{\alpha_i} \int_E^{\infty} \phi(E')\Sigma_{si}(E') \frac{dE'}{E'} + \right. \\ \left. + P_o^*(E)\Sigma_{Ti}(E)W(E) \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

čia  $\phi(E)$  – neutronų srautas (neutronai/(cm<sup>2</sup>·s));  $\Sigma_T(E)$  – makroskopinis suminis skerspjūvis absorberyje (cm<sup>-1</sup>);  $i$  – nuklido indeksas:  $i = 1$  absorberiu,  $i = 2$  pirmajam lėtikliui,  $i = 3$  antrajam lėtikliui;  $P_o^*(E)$  – neutrono pradinio pabėgimo iš absorberio srities tikimybė;  $\alpha_i$  – maksimali energijos dalis, kurią neutronas gali prarasti elastinio susidūrimo metu su nuklidu, kurio masė  $A_i$ ,  $\alpha_i = 4A_i/(A_i + 1)^2$ ;  $\Sigma_{si}$  ir  $\Sigma_{Ti}$  –  $i$ -ojo nuklido makroskopiniai suminis ir elastinės sklaidos skerspjūviai (cm<sup>-1</sup>);  $W(E)$  – tam tikra neutronų srauto energijos variacija išoriniame lėtiklyje: ikiterminių energijų srityje  $W(E)$  lygus  $1/E$ , terminių energijų srityje, kai  $E < 5kT$ ,  $W(E)$  kinta pagal Maksvelo pasiskirstymo dėsnį.

Taikant modelį, kurį nusako (4) lygtis, daromos šios prielaidos:

- kiekvienas rezonansinis nuklidas traktuojamas individualiai, neatsižvelgiant į kitus rezonansinius nuklidus, kurie gali būti toje pačioje sistemoje;
- erdvinis neutronų srautas absorberijoje ir lėtiklio regionuose laikomas vienodu;
- neutronų perėjimas į absorberio regioną ir iš jo nustatomas pagal pradinio pabėgimo tikimybę;
- kitų absorberio sričių buvimas sistemoje gali būti vertinamas pasitelkus Dankovo faktorių, kuris atitinka  $P_o^*(E)$ .

KENO V.a – daugiagrūpė Monte Karlo metodu paremta programa, kuri skaičiuoja 3-D sistemos efektyvų neutronų daugėjimo koeficientą  $k_{eff}$ . KENO V.a atlikdamas  $k_{eff}$  skaičiavimą, naudoja duomenų bibliotekas, kurias konkrečiam uždaviniui sudaro BONAMI ir NITAWL-II. Pagrindinė lygtis, kuria remiasi funkcinis modulis KENO V.a, yra Bolcmano pernešimo lygtis, kuri išvedama remiantis kinetine dujų teorija:

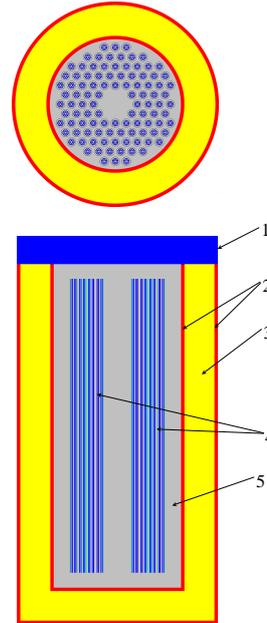
$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t}(X, E, \Omega, t) + \Omega \cdot \nabla \Phi(X, E, \Omega, t) + \\ + \Sigma_t(X, E, \Omega, t) \Phi(X, E, \Omega, t) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} = S(X, E, \Omega, t) + \int \int_{E' \Omega'} \Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \\ \rightarrow \Omega, t) \Phi(X, E', \Omega', t) d\Omega' dE'; \end{aligned} \quad (5)$$

čia  $\Phi(X, E, \Omega, t)$  – neutronų srautas (neutronai/cm<sup>2</sup>/s) vieno steradiano kampu, kurio energija  $E$ , kryptis  $\Omega$ , pozicija  $X$ , laiko momentas  $t$ ;  $\Sigma_t(X, E, \Omega, t)$  – makroskopinis suminis skerspjūvis (cm<sup>-1</sup>);  $\Sigma_s(X, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t)$  – makroskopinis diferencialinis sklaidos skerspjūvis (cm<sup>-1</sup>);  $S(X, E, \Omega, t)$  – neutronų susidarymas (neutronai/cm<sup>3</sup>/s).

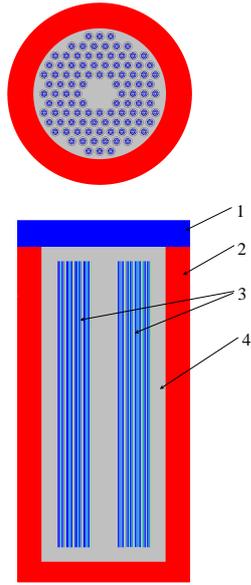
### 3. PAGRINDINĖS PRIELAIIDOS ATLIEKANT CASTOR IR CONSTOR KONTEINERIŲ KRITIŠKUMO ĮVERTINIMĄ

Konteineris CONSTOR – tai cilindrinis indas, kurio skersmuo per 2 m, aukštis per 4 m, sienelės storis 0,43 m. Šoninę sienelę sudaro du plieniniai cilindrai, tarp kurių yra specialaus betono sluoksnis, dugną – dvi plieninės plokštės ir betonas tarp jų, dangtis padarytas iš plieno (1 pav.).



1 pav. Konteinerio CONSTOR konceptualinis modelis. 1 – dangtis, 2 – plieniniai cilindrai, 3 – betonas, 4 – konteinerio krepšys su kuro pluoštais, 5 – ertmė, užpildyta vandeniu

Konteinerio CASTOR vidinės ertmės geometrinė forma ir matmenys, krepšio geometriniai parametrai, konstrukcinės medžiagos yra tokie patys, kaip ir CONSTOR konteinerio. Skiriasi tik konteinerių šoninės sienos ir dugno geometriniai matmenys bei medžiagos: CASTOR atveju jie yra padaryti iš kaliaus ketaus (2 pav.), o CONSTOR atveju – iš plieninių cilindrų ir betono tarp jų (1 pav.). Taip pat skiriasi dangčių sistemos, tačiau suminis dangčių sto-



2 pav. Konteinerio CASTOR konceptualinis modelis. 1 – dangtis, 2 – kalus ketus, 3 – krepšio vamzdžiai su kuro pluoštais, 4 – sritis, užpildyta vandeniu

ris skiriasi tik 1 cm, o medžiagos, iš kurių jie pagaminti, tos pačios.

Konteineriai skirti saugoti 102 panaudoto kuro pluoštus (pluoštas = 1/2 kuro rinklės) ir turi būti suprojektuoti taip, kad tiek normaliomis, tiek avarinėmis sąlygomis efektyvus neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{eff}$  nebūtų didesnis už 0,95. Kuro pluoštai patalpinami į konteinerį, įdedamą į specialios konfigūracijos krepšį.

Atliekant kritškumo įvertinimą, uždavinio sąlygos buvo formuojamos šitaip:

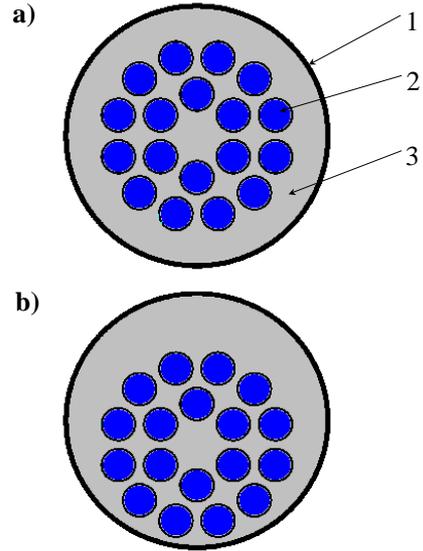
1. Konteineris maksimaliai užpildytas, t. y. jame yra 102 kuro pluoštai. Dalinio konteinerio užpildymo atveju gaunamos mažesnės  $k_{eff}$  reikšmės.

2. Modeliuojant tariama, kad kiekvienas iš 102 pluoštų sudarytas iš 18-os šilumą išskiriančių elementų (šelių), t. y. neatliekamas homogenizavimas.

3. Konteineris užpildytas vandeniu. Tariama, kad vandens tankis krepšio ir konteinerio viduje kinta nuo 0,2 g/cm<sup>3</sup> iki 1,0 g/cm<sup>3</sup>. Vandens tankio variacija leidžia sumodeliuoti sistemos kuras–krepšys–konteinerio korpusas reaktyviausią būseną normaliomis ir avarinėmis sąlygomis.

4. Skaičiavimuose neatsižvelgiama į faktą, kad reaktyvumas mažėja, mažėjant dalijimosi medžiagos kiekiui, priklausančiam nuo išdegimo, ir kad susidaro skilimo produktai. Todėl konservatyviai tariama, kad pluoštuose yra tik šviežias kuras, kurio išsodinimas 2,4% <sup>235</sup>U (nors planuojama į šiuos konteinerius dėti tik 2,0% pradinio išsodinimo panaudotą branduolinį kurą).

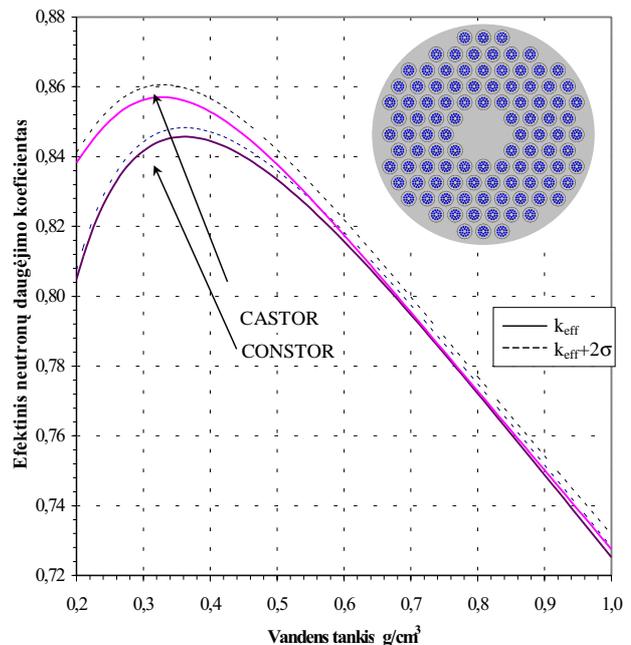
5. Pluoštuose esantys šelai ir jų įtvirtinimo konstrukcijos yra nepažeidžiamos.



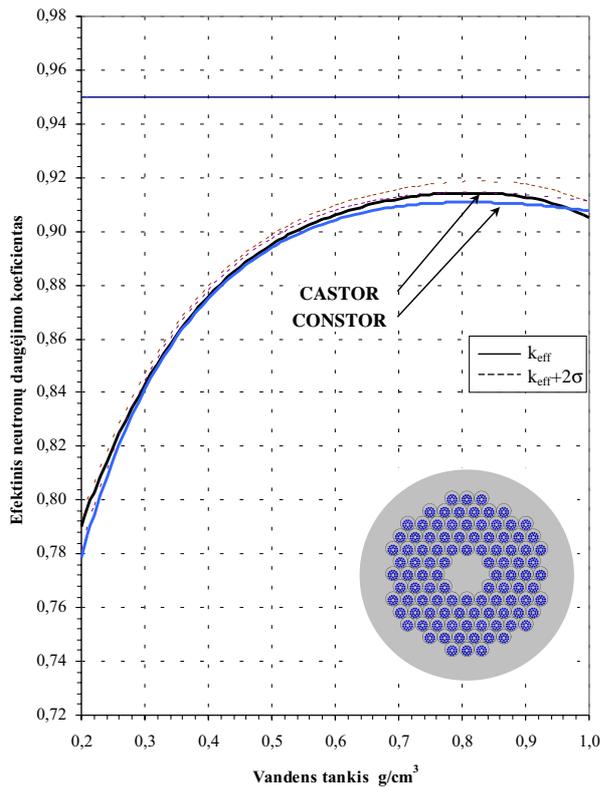
3 pav. Pluošto padėtis krepšio vamzdyje normaliomis sąlygomis (a) ir avariniu atveju (b)

6. Nėra neutronų nuotėkio iš sistemos, tai realizuojama nustatant kraštinę visiško atspindžio nuo išorinio konteinerio paviršiaus sąlygą.

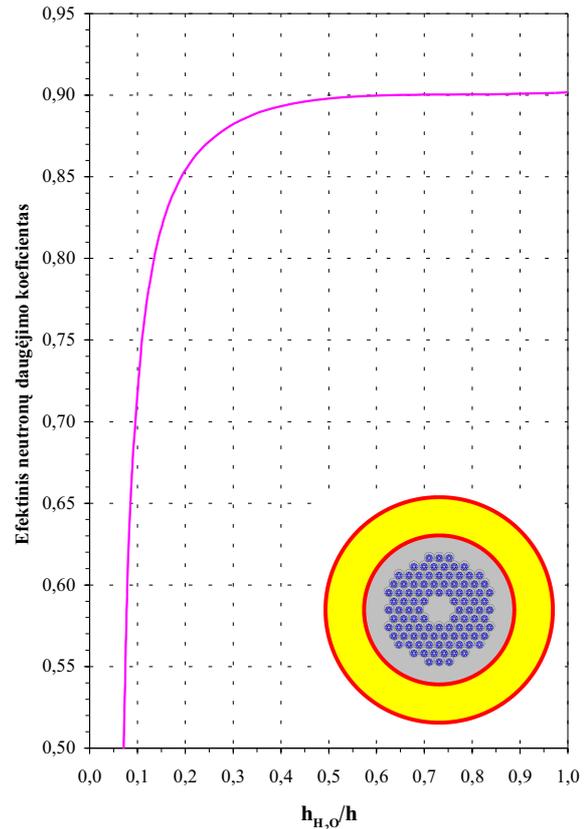
7. Pluoštų centriniai nešiantieji strypai, krepšio viršutinės ir apatinės konstrukcijos konservatyviai pakeičiamos vandeniu. Tariama, kad pluoštai sudaryti iš kuro tablečių (UO<sub>2</sub>) ir jas supančių apvaskalų



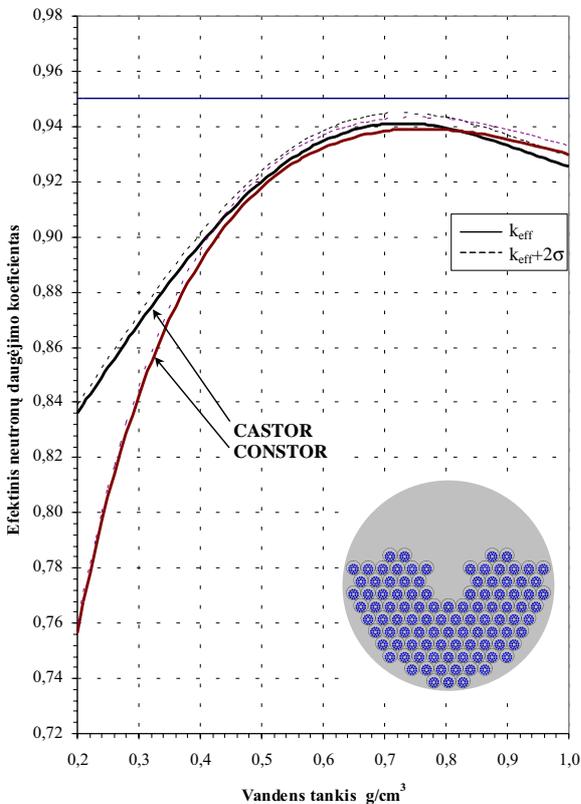
4 pav. Efektyvio neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{eff}$  dinamika kintant vandens tankiui, kai krepšio vamzdžių ir kuro pluoštų išsidėstymas yra normalus



5 pav. Efektinio neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{eff}$  dinamika kintant vandens tankiui, kai krepšio vamzdžiai su pluoštais sukritę konteinerio viduryje



7 pav. Efektinio neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{eff}$  dinamika kintant vandens lygiui konteineryje CONSTOR RBMK-1500.  $h_{H_2O}$  – vandens stulpo aukštis,  $h$  – konteinerio vidinės ertmės aukštis



6 pav. Efektinio neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{eff}$  dinamika kintant vandens tankiui, kai krepšio vamzdžiai su pluoštais sukritę į konteinerio dugną

(Zn + 1% Nb), o krepšį sudaro nerūdijančio plieno vamzdžiai (sudėtiniai elementai: Cr, Mn, Fe, Ni).

8. Krepšio vamzdžiai išdėstyti šešiakampio tinklelio mazguose. Nominalus atstumas tarp vamzdžių centrų (žingsnis) 124,13 mm ir vamzdžių sienelių storis 2 mm.

9. Numatoma, kad avarijos metu gali sumažėti atstumas tarp krepšio vamzdžių ir jie gali susiliesti. Tuomet žingsnis lygus 101,6 mm, minimalus vamzdžių sienelių storis 1,8 mm. Be to, panaudoto kuro pluoštai savo vamzdžiuose užima ekscentrinę padėtį (3 pav. b).

Konteinerio centre yra krepšio centrinis vamzdis, kuris skaičiavimuose pakeičiamas vandeniu, tačiau tariama, kad į tą sritį avarijos atveju negali patekti krepšio vamzdžiai.

Efektinio neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{eff}$  priklausomybė nuo vandens tankio išanalizuota esant normalioms sąlygoms, kai krepšio vamzdžiai išsidėstę taip, kaip parodyta 4 pav., ir avarinėmis sąlygomis, esant dviems krepšio vamzdžių išsidėstymo atvejams (5 ir 6 pav.).

Taip pat CONSTOR konteineriui išnagrinėta, kaip keičiasi  $k_{eff}$  kintant vandens ( $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ ) lygiui konteinerio vidinėje ertmėje (7 pav.).

#### 4. SKAIČIAVIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Lyginant CONSTOR ir CASTOR konteinerių kritiškumo įvertinimo rezultatus, pateiktus 4–6 pav., pažymėtina, kad efektinio neutronų daugėjimo koeficiento vertės vieno ir kito tipo konteineriams gerokai skiriasi, kai vandens tankis yra mažesnis už  $0,5 \text{ g/cm}^3$ . Kai vandens tankis didesnis nei  $0,5 \text{ g/cm}^3$ , rezultatai mažai skiriasi. Šį skirtumą būtų galima paaiškinti šitaip. Neutronų daugėjimą sistemoje sąlygoja įvairios branduolinės reakcijos. Viena svarbiausių – sunkiųjų branduolių dalijimasis, kurios efektyvųjų skerspjūvių lemia neutronų energijos. Branduoliai efektyviausiai skyla jiems sąveikaujant su šiluminiais neutronais, kurių sistemoje pradiniu laiko momentu yra mažai, tačiau laikui bėgant greitieji neutronai sąveikauja su medžiagos atomais ir dauguma sąveikos atvejų neutronai nesugeriami, o išsklaidomi tam tikrais kampais. Sklaidos proceso metu jie praranda energiją, t. y. jie lėtėja, kol neutronų energija nesumažėja iki šiluminės ir tuomet juos sugeria aplinka. Neutronai efektyviausiai lėtinami, kai jie glaudžiai susiduria su vandenilio branduoliais. Vandenyje yra didelis kiekis vandenilio atomų (kai vandens tankis  $1 \text{ g/cm}^3$ , tai vandenilio branduolių tankis  $6,66 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ), todėl vanduo efektyviai lėtina neutronus. Tuo atveju, kai vandens tankis mažesnis už  $0,5 \text{ g/cm}^3$  (kartu mažas ir vandenilio atomų tankis), neutronų lėtinimui įtaką turi konteinerių sienos, kurios padarytos iš skirtingų medžiagų ir neutronai sąveikauja su medžiagų atomais skirtingai, todėl gaunamos skirtingos neutronų daugėjimo koeficiento vertės (4, 5 pav.). Be to, minėti skirtumai gauti, kai konteinerio krepšio vamzdžiai yra gana arti konteinerio sienų. Vandens tankiui esant didesniau už  $0,5 \text{ g/cm}^3$ , konteinerių sienų daroma įtaka maža ir kreivės mažai skiriasi. 6 pav. matyti, kad efektinio neutronų daugėjimo koeficiento vertės tiek CONSTOR, tiek CASTOR konteineriams mažai skiriasi visame vandens tankių kitimo intervale. Taip yra todėl, kad konteinerių krepšio vamzdžiai susiglaudę konteinerių centruose ir neutronų sąveika su sienų medžiagomis maža.

Be to, kaip matyti 4–6 pav., esant normaliam krepšio vamzdžių ir kasečių juose išsidėstymui, efektinis neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{eff}$  pasiekia maksimumą, kai vandens tankis yra apie  $0,35 \text{ g/cm}^3$ , o toliau didėjant vandens tankiui jis mažėja. Avariniu atveju, kai vamzdžiai sukritę centre (5 pav.) arba apačioje (6 pav.),  $k_{eff}$  pasiekia maksimumą, kai vandens tankis yra apie  $0,7\text{--}0,8 \text{ g/cm}^3$ . Tai susiję su tuo, kad  $k_{eff}$  labai priklauso nuo geometrinio krepšio vamzdžių su kuro pluoštais išsidėstymo bei juos supančios aplinkos (vandens), ir optimalus neutronų daugėjimas gaunamas esant skirtingoms vandens tankio vertėms.

Pažymėtina, kad didžiausias reikšmės  $k_{eff}$  įgauna avarinių situacijų metu (5, 6 pav.) ir būtent tada,

kai krepšio vamzdžiai sukrenta į konteinerio apačią (6 pav.). Tačiau ir tuo atveju  $k_{eff}$  yra mažesnis už 0,95.

7 pav. parodyta, kaip  $k_{eff}$  priklauso nuo vandens lygio konteineryje. Didėjant konteinerio užpildymo vandeniu laipsniui, labai staigiai didėja ir  $k_{eff}$ . Tačiau, kai konteineris yra jau iki penktadalio užpildytas vandeniu, tolesnis vandens stulpo augimas kur kas mažiau keičia  $k_{eff}$ , o kai konteineris iki pusės užpildytas vandeniu, tai tolesnis vandens kiekio didėjimas labai mažai keičia  $k_{eff}$  reikšmę. Toki  $k_{eff}$  kitimą priklausomai nuo konteinerio užpildymo vandeniu laipsnio galima paaiškinti tuo, kad, kaip jau minėta, neutronų daugėjimą labiausiai lemia sunkiųjų branduolių dalijimosi reakcija, kurios efektyvusis skerspjūvis maksimalus, kai sistemoje sąveikauja sunkieji branduoliai ir šiluminiai neutronai. Kai konteinerio užpildymo vandeniu laipsnis mažas, šiluminių neutronų nedaug ir neutronų daugėjimas, sąlygotas sunkiųjų branduolių dalijimosi, yra nežymus. Vandens lygiui didėjant, susidaro vis daugiau šiluminių neutronų ir neutronų skaičius, o kartu ir  $k_{eff}$  didėja.

#### 5. IŠVADOS

1. Panaudojant SCALE kompiuterinių kodų sistemą (JAV), atliktas dviejų tipų konteinerių CASTOR ir CONSTOR, skirtų ilgalaikiam panaudoto branduolinio kuro saugojimui Ignalinos AE, kritiškumo analizė.

2. Skaičiavimai parodė, kad patekus vandeniui į konteinerį, tiek esant normaliam panaudoto branduolinio kuro kasečių išsidėstymui, tiek hipotetinių avarių atvejais, efektinis neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{eff}$  nėra didesnis už leistiną 0,95 reikšmę, todėl kritiškumo požiūriu konteineriai CASTOR ir CONSTOR yra tinkami RBMK-1500 reaktorių panaudotam branduoliniam kurui, kurio pradinis įsoderinimo laipsnis 2%, saugoti.

Gauta  
2001 09 25

#### Literatūra

1. International Atomic Energy Agency, Implementation of burnup credit in spent fuel management systems. IAEA, Vienna, 1998. P. 146.
2. Green N. M. BONAMI: Resonance Self-shielding by the Bondarenko Method. Rev. 5. Oak Ridge National Laboratory, March 1997.
3. Greene N. M., Petrie L. M., Westfall R. M. NITAWL-II: Scale System Module for Performing Resonance Shielding and Working Library Production. Rev. 5. Oak Ridge National Laboratory, March 1997.
4. Landers N. F., Petrie L. M., Bucholz J. A. The Material Information Processor for SCALE. Rev. 5. Oak Ridge National Laboratory, March 1997.

5. Landers N. F., Petrie L. M. KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping, Rev. 5. Oak Ridge National Laboratory, March 1997.

**Artūras Šmaižys, Povilas Poškas**

**CRITICALITY ANALYSIS OF THE CASTOR RBMK-1500 AND CONSTOR RBMK-1500 CASKS LOADED WITH SPENT NUCLEAR FUEL**

**S u m m a r y**

Criticality analysis of two types of casks RBMK-1500 and CONSTOR RBMK-1500 was performed. These casks are planned for an interim storage of spent nuclear fuel at the Ignalina NPP. The calculations were made for different density and level of water inside the casks for normal position of the basket tubes and half assemblies in the casks and for assumed hypothetical accident conditions. For all cases the neutron multiplication factor  $k_{eff}$  was found to be below the permissible value 0.95.

**Key words:** spent nuclear fuel, criticality, cask, interim dry storage, normal operation, accident conditions

**Артурас Шмайжис, Повилас Пошкас**

**ОЦЕНКА КРИТИЧНОСТИ КОНТЕЙНЕРОВ CASTOR RBMK-1500 И CONSTOR RBMK-1500 С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ**

**Р е з ю м е**

С помощью системы компьютерных кодов SCALE (США) проведена оценка на критичность контейнеров двух типов – CASTOR RBMK-1500 И CONSTOR RBMK-1500, предназначенных для долгосрочного хранения отработавшего ядерного топлива на Игналинской АЭС. Расчёты выполнены для разной плотности и уровня воды, заполнившей контейнер при нормальном расположении пучков отработавшего ядерного топлива и при гипотетических аварийных условиях. Получено, что для всех случаев эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{эфф}$  не превышает допустимого значения 0,95.

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо, критичность, контейнер, долгосрочное сухое хранение, нормальная эксплуатация, аварийные условия