



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Egidijus Klusavičius

**PAŽANGAUS VERDANČIO VANDENS REAKTORIAUS
TECHNOLOGINIŲ PARAMETRŲ ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. Jonas Gylys

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(parašas) Doc. dr. Egidijus Puida
(data)

PAŽANGAUS VERDANČIO VANDENS REAKTORIAUS
TECHNOLOGINIŲ PARAMETRŲ ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas
Branduolinė energetika kodas 621E32001

Vadovas
(parašas) prof. Jonas Gylis
(data)

Recenzentas
(parašas) doc. dr. Robertas Poškas
(data)

Projektą atliko
(parašas) Egidijus Klusavičius
(data)

KAUNAS, 2015

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS IR MECHATRONIKOS FAKULTETAS**

Tvirtinu: _____

Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)

katedros vedėjas

doc. E. Puida

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema **Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinių parametru analizė**

.....
Patvirtinta 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2.

2. Darbo tikslas: Išanalizuoti esminius technologinius, saugos ir ekonominius parametrus ABWR reaktoriuje ir juos palyginti su senesnės kartos reaktorių technologijomis. Išanalizuoti struktūrinius BWR vidinių komponentų tobulinimus iki ABWR. Pateikti ir išanalizuoti verdančio vandens tipo reaktorių uždarymo priežastis, pasekmes ir įtaką ABWR tobulinimui. Pasinaudojant metodika atlikti ABWR reaktoriaus branduolinio kuro ciklo skaičiavimus ir analizę. Atlikti ABWR reaktoriaus šiluminius skaičiavimus ir palyginti su PWR. Atlikti atominės elektrinės su ABWR reaktoriumi ekonominius skaičiavimus ir palyginti su kitų šaltinių atliktais skaičiavimais.

.....
3. Darbo struktūra: Įvadas. 1. Elektrinės su pažangiu verdančio vandens reaktoriumi statybų perspektyvos Lietuvoje. 2. ABWR reaktoriaus evoliucija, technologijos, parametru analizė. 3. Aktyviosios zonos skaičiavimai. 4. ABWR reaktoriaus branduolinio kuro ciklo skaičiavimas. 5. AE su ABWR ekonominiai skaičiavimai. 6. Išvados. 7. Literatūros sąrašas. 8. Priedai.

.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: atliekant baigiamąjį magistro darbą laikytis Lietuvos Respublikos norminių aktų reikalavimų, bei baigiamojo magistro darbo apiforminimo reikalavimų

.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 m. gegužės mėn. 27 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui **Egidijui Klusavičiui**

Užduotį gavau **Egidijus Klusavičius**

(studento vardas, pavardė)

.....
(parašas)

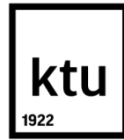
(data)

Vadovas **prof. Jonas Gylys**

(pareigos, vardas, pavardė)

.....
(parašas)

(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Egidijus Klusavičius

(Studento vardas, pavardė)

Branduolinė energetika, 621E32001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinių parametų analizė“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 _____

_____ Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Egidijaus Klusavičiaus** baigiamasis projektas tema „**Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinių parametų analizė**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Klusavičius, E. Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinių parametru analizė. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. Jonas Gylys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Šilumos ir atomo energetikos katedra.

Kaunas, 2015. 61 psl.

SUMMARY

Analysis of the technological parameters of the Advanced Boiling Water Reactor

ABWR - the world's first 'Generation III' or even 'III+' reactor in operation – provides the highest level of safety and security. This latest design has increased the power generation capacity of the reactor while also decreasing its containment size – reducing its overall footprint. Key components have undergone rigorous testing to make them more reliable than in previous designs.

The analysis chosen explore not only the principle of reactor safety and technological parameters, but also to analyze and core changes to the internal components. In the nuclear power industry one of the most important factors is the nuclear fuel cycle, therefore taking advantage of the global energy information service created a calculators, at work will be carried out ABWR nuclear fuel cycle calculations and analysis of data obtained. In order to verify the reactor design parameters, it is appropriate to carry out thermal reactor calculations, and compare them with PWR reactors, to highlight the main advantages and disadvantages. Lithuania planned to build this type of reactor, therefore using the methodology at the work will be performed economic calculations and comparisons with other sources of calculations.

Research aim – to analyze technological and economical parameters of the Advanced Boiling Water Reactor.

Objectives:

1. To analyze the main safety and technological improvements of ABWR.
2. To explore operating principal and technological parameters of ABWR, compare them to BWR and other older generation technology.
3. To analyze improvements of BWR internal components before ABWR.
4. To explore the reasons and consequences of BWR closing.
5. To analyze nuclear fuel cycle, thermal and economical parameters of ABWR.

Research methods – logical analysis and synthesis of scientific literature and documents, statistical analysis, grouping, comparative and graphical representation.

Turinys

| | |
|--|----|
| ĮVADAS | 11 |
| 1. ELEKTRINĖS SU PAŽANGIU VERDANČIO VANDENS REAKTORIUMI STATYBŲ PERSPEKTYVOS LIETUVOJE | 12 |
| 2. ABWR REAKTORIAUS EVOLIUCIJA, TECHNOLOGIJOS, PARAMETRŲ ANALIZĖ .. | 13 |
| 2.1. Branduolinių reaktorių kartos..... | 13 |
| 2.2. Verdančio vandens reaktoriaus veikimo principas..... | 14 |
| 2.3. Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus veikimo principas..... | 15 |
| 2.4. Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologijų analizė | 17 |
| 2.5. Pagrindiniai ABWR ir BWR tipo reaktorių techniniai duomenys ir jų skirtumai | 23 |
| 2.6. ABWR reaktoriaus vidinių komponentų analizė, palyginimas su BWR-5 reaktoriumi . | 24 |
| 2.7. Verdančio vandens reaktorių uždarymo priežasčių analizė | 25 |
| 3. AKTYVIOSIOS ZONOS SKAIČIAVIMAI..... | 29 |
| 3.1. Preliminarus šiluminis reaktoriaus skaičiavimas | 30 |
| 3.2. ABWR aktyviosios zonos šiluminių savybių skaičiavimas, palyginimas su PWR | 32 |
| 4. ABWR REAKTORIAUS BRANDUOLINIO KURO CIKLO SKAIČIAVIMAS..... | 35 |
| 4.1. Branduolinio kuro ciklo balanso skaičiavimas..... | 35 |
| 4.2. Energijos suvartojimo ir CO ₂ dujų išmetimo į aplinką balanso skaičiavimas | 39 |
| 4.3. Energijos suvartojimo iš pakartotinai sodrinant nuskurdinto UF ₆ ir CO ₂ išmetimo į aplinką balanso skaičiavimas..... | 40 |
| 4.4. Branduolinio kuro kainos apskaičiavimas..... | 43 |
| 5. AE SU ABWR EKONOMINIAI SKAIČIAVIMAI | 44 |
| 6. IŠVADOS | 51 |
| 7. LITERATŪROS SĄRAŠAS | 53 |
| 8. PRIEDAI | 56 |
| 8.1. 1 Priedas | 56 |
| 8.2. 2 Priedas | 56 |
| 8.3. 3 Priedas | 57 |
| 8.4. 4 Priedas | 60 |
| 8.5. 5 Priedas | 60 |
| 8.6. 6 Priedas | 61 |

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

| | |
|---|----|
| 2.1 pav. Branduolinių reaktorių kartos..... | 13 |
| 2.2 pav. ABWR reaktoriaus aktyvioji zona | 16 |
| 2.3 pav. ABWR reaktoriaus principinė schema..... | 16 |
| 2.4 pav. Mobilūs siurbliai sumontuoti ant sunkiasvorio transporto, skirti aušinti reaktorių sunkios avarijos atveju..... | 18 |
| 2.5 pav. Integruotas recirkuliacinis siurblys | 20 |
| 3.1 pav. ABWR reaktoriaus kuro rinklė (GE-14) ir šiluminis elementas | 30 |
| 3.2 pav. Tipinis branduolinių reaktorių kuras | 33 |
| 4.1 pav. Branduolinio kuro ciklas | 35 |
| 4.2 pav. Branduolinio kuro ciklas iki atominės elektrinės | 36 |
| 4.3 pav. Medžiagų balanso srauto diagrama | 40 |
| 4.4 pav. Branduolinio kuro ciklas pakartotinai sodrinant uraną | 41 |
| 4.5 pav. Medžiagų balanso srauto diagrama | 42 |
| 4.6 pav. Sudėtinės kainos diagrama | 44 |

LENTELIŲ SĄRAŠAS

| | |
|--|----|
| 2.1 lentelė. Pagrindiniai BWR aktyviosios zonos parametrai ir evoliucija iki ABWR. | 15 |
| 2.2 lentelė. Recirkuliacinių siurbių techninės charakteristikos..... | 19 |
| 2.3 lentelė. Apsaugos gilyn koncepcija..... | 22 |
| 2.4 lentelė. ABWR ir BWR techninių parametų palyginimas..... | 23 |
| 2.5 lentelė. ABWR reaktoriaus vidinių komponentų palyginimas su BWR-5 | 24 |
| 2.6 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti po avarijų arba incidentų..... | 26 |
| 2.7 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti dėl politinių ir kitų priežasčių | 27 |
| 2.8 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti po pilno savo atidirbimo laiko, arba buvę nenaudingi ekonomiškai..... | 28 |
| 3.1 lentelė. ABWR 1350 reaktoriaus duomenys | 29 |
| 3.2 lentelė. Gauti rezultatai | 34 |
| 4.1 lentelė. Pradiniai duomenys | 36 |
| 4.2 lentelė. Skaičiavimų rezultatai | 37 |
| 4.3 lentelė. Gauti rezultatai | 38 |
| 4.4 lentelė. Energijos suvartojimas ir CO ₂ išmetimas į aplinką kiekvieno proceso metu..... | 39 |
| 4.5 lentelė. Energijos suvartojimas pakartotinai sodrinant uraną ir CO ₂ išėiga kiekvieno proceso metu. | 42 |

| | |
|---|----|
| 4.6 lentelė. Branduolinio kuro ciklo kainos parametrai | 43 |
| 4.7 lentelė. Branduolinio kuro ruošimo kainos visuose branduolinio kuro ciklo etapuose | 43 |
| 5.1 lentelė. Pradiniai duomenys | 45 |
| 5.2 lentelė. Gauti rezultatai | 49 |

SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

ABWR – advanced boiling water reactor – pažangus verdančio vandens reaktorius;

BWR – boiling water reaktor – verdančio vandens reaktorius;

PWR - pressurized water reactors – suslėgto vandens reaktorius;

RBMK – rus. Реактор Большой Мощности Канальный - tarybinių didelio galingumo uraninių-grafitinių reaktorių tipas;

JAV – Jungtinės Amerikos valstijos;

LOCA – Loss Of Coolant Accident – aušalo netekimo avarija;

x - urano įsodrinimas, %;

r - slaptoji garavimo šiluma, kJ/kg;

h' - vandens entalpija, kJ/kg;

h'' - sauso sočiojo garo entalpija, kJ/kg;

c_p - savitoji šiluma, kJ/kg*K;

T - temperatūra, °K;

t - temperatūra, °C;

w - greitis, m/s;

q - šilumos srauto tankis, kW/m²;

AE – atominė elektrinė;

MW – megavatai;

AP -1000 – suslėgto vandens reaktorius;

EPR – Europos suslėgto vandens reaktorius;

ECCS – avarinio aušinimo sistema;

ALARA – radiacinės saugos optimizavimo principas;

SCRAM – greito stabdymo sistema;

AZAAS – aktyviosios zonos avarinio aušinimo sistema;

GWh – gigavatvalandės;

N – šiluminė galia;

n- kuro elementų skaičius rinkelėje;

$\bar{t}_{\text{H}_2\text{O}}$ - vidutinė vandens temperatūra;

p - vandens slėgis;

$\bar{\gamma}_{\text{H}_2\text{O}}$ - vidutinis vandens tankis;

t_{įėjimo} - įeinančio vandens temperatūra;

t_{išejimo} - išeinančio vandens temperatūra;

δ'' – šiluminių elementų skersmuo;
x - prisodrinimo laipsnis;
 γ_{UO_2} – urano dioksido tankis;
 \bar{q} – vidutinis šiluminis srautas šiluminių elementų paviršiuje;
 a'' – gardelės žingsnis;
 a' - kasetės plotis;
 \mathcal{D} – kasetės apvalkalo storis;
a - kasetės žingsnis;
 δ – tarpelio plotis;
m - aktyviosios zonos aukštis;
 K_{statybos} – atominės elektrinės statybos kaina;
P – pagamintos elektros energijos kiekis;
T – metinis reaktoriaus darbo laikas valandomis;
 E_{paros} – pagamintos elektros energijos kiekis per parą;
 E_{pagamins} – pagamintos elektros energijos kiekis per 60 metų;
 E_{metinis} – pagamintos elektros energijos kiekis per metus;
 $N_{\text{rinkl.}}$ – kuro rinklių skaičius;

IVADAS

Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinė, saugos ir ekonominė analizė yra aktuali Lietuvai, svarstant naujo energetinio bloko statybas. Lengvojo vandens reaktoriams yra priskiriami du tipai PWR ir BWR, šie reaktoriai kartu sudaro apie 80 proc. šiuo metu pasaulyje eksploatuojamų reaktorių, jų skirtumą jau galima išvelgti ir pavadinime, jie skiriasi vandens sąlygomis, kuris naudojamas ir kaip lėtiklis ir kaip aušalas.

Šiuo metu pasaulyje yra eksploatuojami 75 verdančio vandens tipo reaktoriai, 28 uždaryti dėl tam tikrų priežasčių, apie kurias bus kalbama ir analizuojama darbe. Šiai dienai yra statomi šeši, naujos kartos verdančio vandens reaktoriai ABWR, vienas tokių turėtų atsirasti ir Lietuvoje.

Pažangus verdančio vandens reaktorius ABWR yra sukurtas pagal patobulintus ankstesnius Japonijos, JAV ir Europos šalių BWR reaktorių modelius, atsižvelgiant į ilgametę šių reaktorių eksploatavimo patirtį bei panaudojant geriausias jų savybes. Su tokiais saugos technologijomis, ABWR reaktoriai yra vieninteli praktikoje išbandyti ir veikiantys AE.

Analizuojant reaktoriaus technologinius parametrus, pasirinkta tirti ne tik reaktoriaus veikimo principą, saugą ir technologijas, bet atlikti ir aktyviosios zonos vidinių komponentų gerinimo analizę. Kadangi branduolinėje energetikoje vienas iš svarbiausių faktorių yra branduolinis kuras, todėl pasinaudojant pasaulinės informacinės energetikos tarnybos sukurta skaičiuokle, darbe atliekami ABWR branduolinio kuro ciklo skaičiavimai, bei gautų duomenų analizė. Siekiant patikrinti reaktoriaus projektinius parametrus, tikslinga atlikti šiluminius reaktoriaus skaičiavimus, bei juos palyginti su PWR reaktoriumi, taip išskirti pagrindinius reaktoriaus privalumus ir trūkumus. Lietuvoje planuojama statyti tokio tipo reaktorių, todėl pasinaudojant metodika, darbe atliekami ekonominiai skaičiavimai, bei palyginimai su kitų šaltinių atliktais skaičiavimais.

Darbo tikslas - atlikti pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologinių, saugos ir ekonominių parametrų analizę.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti esminius saugos ir technologinius patobulimus ABWR reaktoriuje.
2. Aptarti BWR ir ABWR reaktorių veikimo principą, bei technologinius parametrus ir juos palyginti su senesnės kartos reaktorių technologijomis.
3. Išanalizuoti struktūrinius BWR vidinių komponentų tobulinimus iki ABWR.
4. Pateikti ir išanalizuoti verdančio vandens tipo reaktorių uždarymo priežastis, pasekmes ir įtaką ABWR tobulinimui.
5. Atlikti ABWR reaktoriaus šiluminę aktyviosios zonos, branduolinio kuro ciklo ir ekonominę analizę.

1. ELEKTRINĖS SU PAŽANGIU VERDANČIO VANDENS REAKTORIUMI STATYBŲ PERSPEKTYVOS LIETUVOJE

Nesiliaujant diskusijoms Lietuvoje dėl atominės elektrinės statybos, baigiamajame darbe pasirinkta analizuoti ABWR tipo reaktorių, kuris pasirinkus Japonijos strateginį investuotoją „Hitachi“, turėjo atsirasti Visagino mieste, tačiau po 2012 m. spalio 14 d., įvykusio referendumo ir Lietuvos piliečiams nepritarus dėl Visagino atominės elektrinės statybos, AE statybos su tokio tipo reaktoriumi tapo miglotos.

Lietuva, nors ir nedidelė valstybė, tačiau turinti ilgametę patirtį branduolinės energetikos srityje. Nuo 1983 m. iki 2009 m. Lietuvoje veikė vienintelė Baltijos šalyse branduolinė jėgainė, kuri turėjo savo laiku galingiausius pasaulyje reaktorius, pastarieji yra įrašyti į Gineso rekordų knygą. Elektrinėje buvo numatyta pastatyti net keturis RBMK (kanalo tipo šiluminių neutronų vandens-grafito branduolinis reaktorius) tipo reaktorius, tačiau buvo pastatyti ir paleisti tik du reaktoriai. Lietuvai stojant į Europos sąjungą ir vykdant tarptautinius įsipareigojimus, pirmasis Ignalinos atominės elektrinės blokas buvo uždarytas 2004 m. gruodžio 31 d. o antrasis, kuris gamino apie 70 procentų šalies elektros energijos, buvo uždarytas 2009 m. gruodžio 31 d.

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę, jos gaminamas elektros energijos kiekis, didžiąja dalimi buvo pakeistas importu iš kaimyninių šalių. Importuoti turime apie 62 proc. elektros energijos ir apie 80 proc. visų reikalingų išteklių, kurių didžioji dalis importuojama iš vienos šalies – Rusijos.[17] Esant atominei elektrinei, importuojamas elektros energijos kiekis iš kaimyninių šalių buvo ženkliai mažesnis, vietinės elektrinės Lietuvoje turėjo mažesnę apkrovimą ir gamino mažiau elektros energijos. Veikiant atominei elektrinei ir mažiau naudojant iškastinį kurą, išmetamų teršalų į aplinką kiekis buvo mažesnis.

Siekiant įgyvendinti Lietuvos ir kitų Baltijos šalių energetikos saugumą ir padaryti jas pilnavertes ES (Europos sąjungos) nares, jų energetikos sektorius turi būti sujungtas su Europos sąjungos šalimis. Šiuo metu vykdomas planas sujungti Baltijos šalis su Europos energetikos sistema. Darbai pradėti vykdyti 2009 m. birželio 17 d. Įgyvendinus šį planą Baltijos šalyse, Lenkijoje, Suomijoje bei Švedijoje bus nutiestos trys jungtys, 700 MW jungtis tarp Lietuvos ir Švedijos, 650 MW Estijos ir Suomijos ir dvi 500 MW jungtys tarp Lietuvos ir Lenkijos. Visų jungčių darbai turi būti baigti iki 2020 m.[34]

Esant pramonės augimui, elektros energijos paklausa Baltijos šalyse didėja, todėl akivaizdu, kad elektros energijos trūkumas didės, o jam kompensuoti prireiks papildomų elektros energijos šaltinių. Todėl viena iš geriausių alternatyvų elektros energijos gamybai, kuri užtikrintų bazinę elektros energijos gamybą būtų nauja Visagino AE.

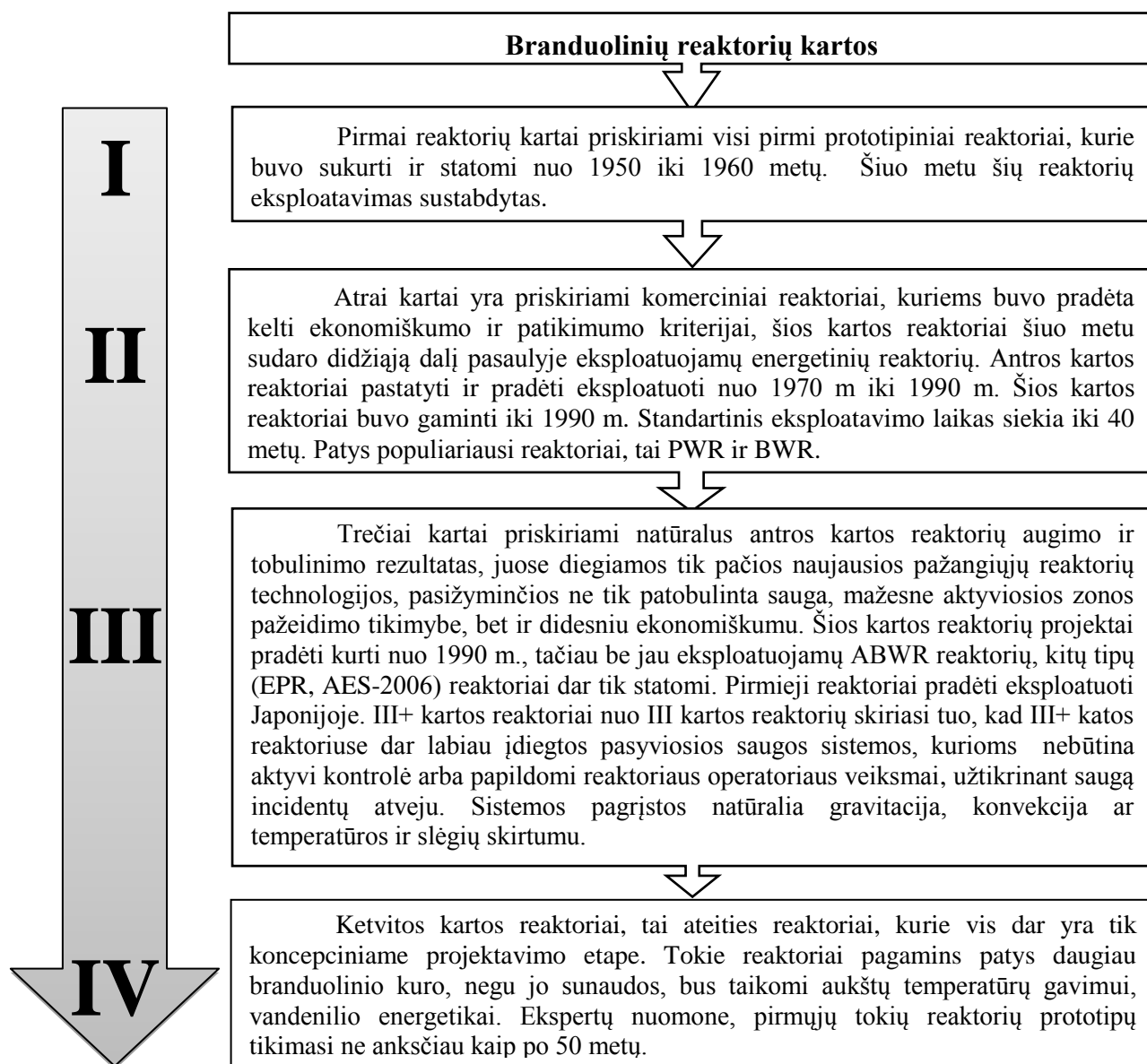
Atominė elektrinė būtų ekonomiškai naudinga verslui, visuomenei ir gyventojams, būtų sukurta daug naujų darbo vietų, vietinis logistikos ir statybos sektorius sulauktų naujų užsakymų.

Strateginiu investuotuju naujosios AE statybai pasirinkus „Hitachi“, būtų statoma elektrinė su pažangiu verdančio vandens reaktoriumi ABWR, todėl neatsitiktinai darbe pasirinkta analizuoti tokio tipo reaktorių.

2. ABWR REAKTORIAUS EVOLIUCIJA, TECHNOLOGIJOS, PARAMETRŲ ANALIZĖ

2.1. Branduolinių reaktorių kartos

Branduolinis reaktorius – tai įrenginys, skirtas sudaryti ir kontroliuoti nepertraukiamą grandininę branduolių dalijimosi reakciją, kurios tikslas yra išgauti terminę energiją ir paversti ją elektros energija. Branduoliniai reaktoriai yra klasifikuojami pagal branduolinio reaktoriaus tipą, aušalą, ir kartą. Per branduolinės energetikos vystymosi laiką, buvo sukurtos kelios branduolinių reaktorių kartos. 2.1 paveiksle pateikiama, kaip branduoliniai reaktoriai yra skirstomi pagal kartas.



2.1 pav. Branduolinių reaktorių kartos (sudaryta autoriaus remiantis literatūra [29]).

ABWR tipo reaktorius yra priskiriamas III ar net III+ kartai, ir tai yra vienintelis šios kartos reaktorius išbandytas praktikoje ir jau eksploatuojamas. Lyginant su ankstesnių kartų technologijomis, galima išskirti šiuos esminius ABWR privalumus:

- Atominėms elektrinėms visi branduoliniai reaktoriai kuriami ir statomi pagal standartinį projektą, kas įtakoja daug mažesnius projektavimo ir statybos finansinius resursus, pagreitina visą licenzijavimo procedūrą, kuri paprastai užima gana ilgą laiko tarpą,
- Supaprastinus reaktoriaus automatizuotą valdymą, reaktorius tapo ne tiek daug priklausomas nuo valdymo sutrikimų ir žmogiškojo faktoriaus klaidų, kurias gali atlikti operatorius,
- Esant didesniam galios išnaudojimo koeficientui, reaktoriaus eksploatavimo trukmė pailgėjo.
- Lyginant su ankstesnėmis kartomis sumažinti incidentai, kurie gali įtakoti reaktoriaus aktyviosios zonos išsilydymo galimybes.

2.2. Verdančio vandens reaktoriaus veikimo principas

Verdančio vandens reaktorius galima priskirti suslėgto vandens reaktoriams (PWR), tik be garo generatoriaus. BWR vanduo cirkuliuoja per aktyviają zoną, veikdamas kaip lėtiklis ir kaip šilumnešis, slėginio indo viduje. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad PWR tipo reaktoriai veikia su didesnėmis temperatūromis ir kontūrų slėgiais, kas tokio tipo reaktoriui įtakoja paprastesnį valdymą, tačiau reikalauja daugiau vamzdinių, vožtuvų ir kitų papildomų įrenginių. Taip pat, prie didelių slėgių dirbantiems reaktoriams, dažniau dyla mechanizmai ir dalys, kuriuos reikia keisti. BWR reaktoriuje vanduo įšyla maždaug iki 300 °C ir verda, sudarydamas apie 70 barų slėgio garą. Vanduo (apie 10 %) virtęs garu patenka į turbinas. Atidirbęs garas kondensuojasi ir grįžta į slėginį indą, taip ciklas užbaigiamas. Abiejų reaktorių naudojamas kuras yra panašus, tačiau BWR reaktoriaus galios tankis (energija aktyviosios zonos tūrio vienetui) yra maždaug dvigubai mažesnis, (tai patvirtina 3.2 poskyryje atlikti skaičiavimai) nei PWR, esant mažesnei temperatūrai ir slėgiui. Tas įtakoja, kad BWR slėginis indas yra gerokai didesnis, nei PWR, esant panašioms šiluminėms reaktorių galioms. Tačiau reaktoriaus apsauginis kiautas gali būti mažesnis, kadangi nėra garo generatorių, o sistemos slėgis mažesnis. BWR be garo generatorių savikaina yra mažesnė, tačiau didesnė tikimybė užteršti visą sistemą radioaktyviomis medžiagomis, esant kuro rinklių pažeidimo atvejui. Kadangi BWR temperatūra ir slėgis (apie 70 barų) yra žemesni, todėl šiluminis efektyvumas yra žemesnis. [35]

BWR aktyviosios zonos evoliucija ir tobulinimai iki ABWR pateikiami 2.1 lentelėje.

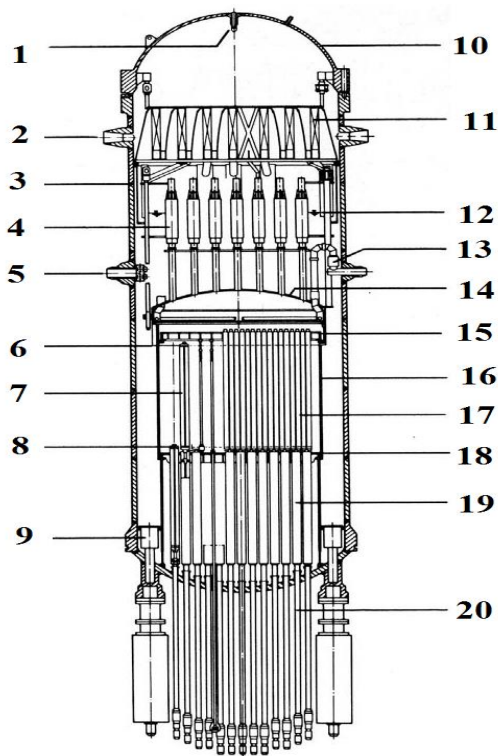
2.1 lentelė. Pagrindiniai BWR aktyviosios zonos parametrai ir evoliucija iki ABWR (sudaryta remiantis [19] literatūra).

| Eil. Nr. | Parametrai | BWR-2 | BWR-3 | BWR-4 | BWR-5 | ABWR |
|----------|--------------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| | | | | | | |
| | | BWR/1 | BWR/2 | BWR/3 | BWR/4/5/6 | ABWR |
| 1. | Šiluminė galia MW | 1064 | 1380 | 2436 | 3293 | 3926 |
| 2. | Elektrinė galia MW | 357 | 460 | 840 | 1100 | 1350 |
| 3. | Aktyviosios zonos skersmuo (m) | 3,02 | 3,44 | 4,07 | 4,75 | 5,16 |
| 4. | Aktyviosios zonos aukšti (m) | 3,66 | 3,66 | 3,71 | 371 | 3,71 |
| 5. | Kuro rinklių skaičius | 308 | 400 | 560 | 764 | 872 |
| 6. | Valdymo strypų skaičius | 73 | 97 | 137 | 185 | 205 |
| 7. | Galios tankis (kw/l) | Apie 40 | Apie 40 | Apie 50 | Apie 50 | Apie 50 |
| 8. | Kuro tipas | 7x7 | 7x7R | 8x8 | 8x8 R | 8x8 |

Nuo pirmųjų iki šių laikų verdančio vandens reaktorių aktyvioji zona nemažai pasikeitė, elektrinė ir šiluminė reaktoriaus galia išaugo beveik keturis kartus, galios tankis padidėjo apie 20%. Tai įtakojo didesnis aktyviosios zonos skersmuo, ko pasekoja gali tilpti daugiau kuro rinklių.

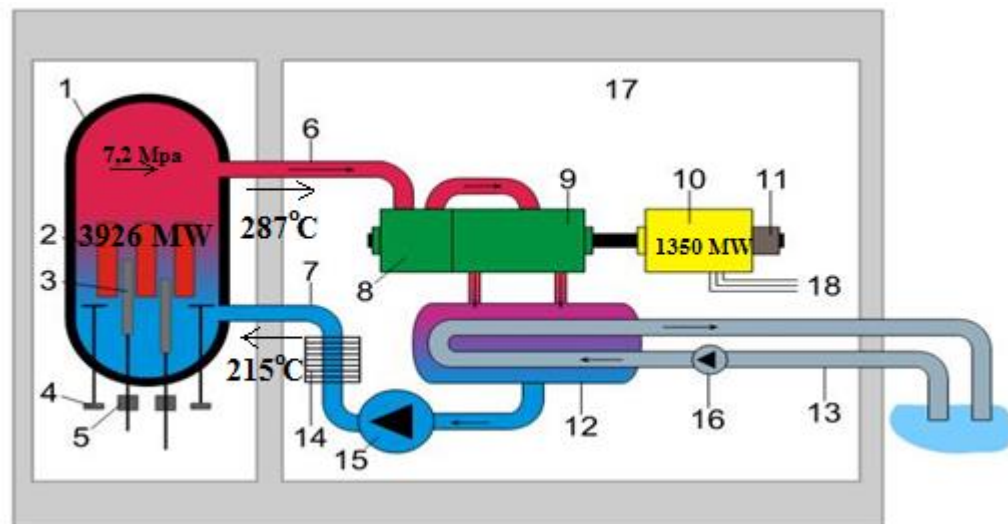
2.3. Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus veikimo principas

Pažangus verdančio vandens reaktorius (ABWR) yra didelis priverstinės cirkuliacijos (integruoti siurbliai), tiesioginio ciklo BWR reaktorius. Jis priskiriamas III ar net III+ reaktorių kartai, elektrinė galia gali siekti iki 1350 MW, šiluminė iki 3926 MW. ABWR yra vienas iš reaktorių tipų, kuris parengtas pagal JAV jungtinę EPRI/DOE pažangaus lengvojo vandens reaktoriaus plėtros programą, vykdomą nuo 1987 m. Reaktoriaus konstrukcija, tai ilgas GE BWR plėtros kūriny. Esant tiesioginiam ciklui, reaktoriaus sistemoje esantis aušinantis vanduo užverda, praeina aukštyn per reaktoriaus aktyviąją zoną, ko eigoje susidaro garas.[35] Reaktoriaus aktyviosios zonos schema pateikta 2.2 pav. ir ABWR reaktoriaus principinė schema pateikta 2.3 pav.



(1) – Ventiliacijos vandens atvamzdis; (2) – garo atvamzdis; (3) – reaktoriaus slėginis indas; (4) – garo separatoriai; (5) – atvamzdis skirtas stabdymo metu naudojamam aušinimo vandeniui ištekėti; (6) – aktyviosios zonos viršus; (7) – valdymo strypas; (8) – aktyviosios zonos apačia; (9) – reaktoriaus vidiniai siurbliai; (10) – reaktoriaus slėginio indo gaubtas; (11) – garo džiovintuvai; (12) – normalus vandens lygis; (13) – aktyviosios zonos užtvindymo sistema; (14) – aktyviosios zonos gaubto viršus; (15) – viršutinė rėtinė; (16) – aktyviosios zonos gaubtas; (17) – kuro rinklės; (18) – apatinė rėtinė; (19) – valdymo strypų pavaros vamzdžiai; (20) – valdymo strypai su su tikslaus judesio pavaromis.

2.2 pav. ABWR reaktoriaus aktyvioji zona



2.3 pav. ABWR reaktoriaus principinė schema [18]. (1) - reaktoriaus slėginis indas; (2) - branduolinio kuro elementas; (3) - valdymo strypai; (4) - cirkuliaciniai siurbliai; (5) - valdymo strypų varikliai; (6) – garas; (7) - paduodamas vanduo; (8) - aukšto slėgio turbina; (9) - žemo slėgio turbina; (10) – generatorius; (11) - generatoriaus sužadintuvas; (12) – kondensatorius; (13) - aušinimo vandens kontūras; (14) – pašildytuvas; (15) - maitinimo vandens siurblys; (16) - šalto vandens siurblys; (17) - betono korpusas; (18) - prijungimas prie elektros tinklo.

Pirma garas išdžiovinamas, toliau tiesiogiai nukreipiamas į turbinų skyrių. Atidirbęs garas sukondensuojamas į vandenį ir sugrąžinamas į aktyviają zoną. Įdiegus naujus patobulinimus, apie kuriuos bus kalbama darbe, pastarieji padidino reaktoriaus patikimumą, saugą o taip pat pagerino

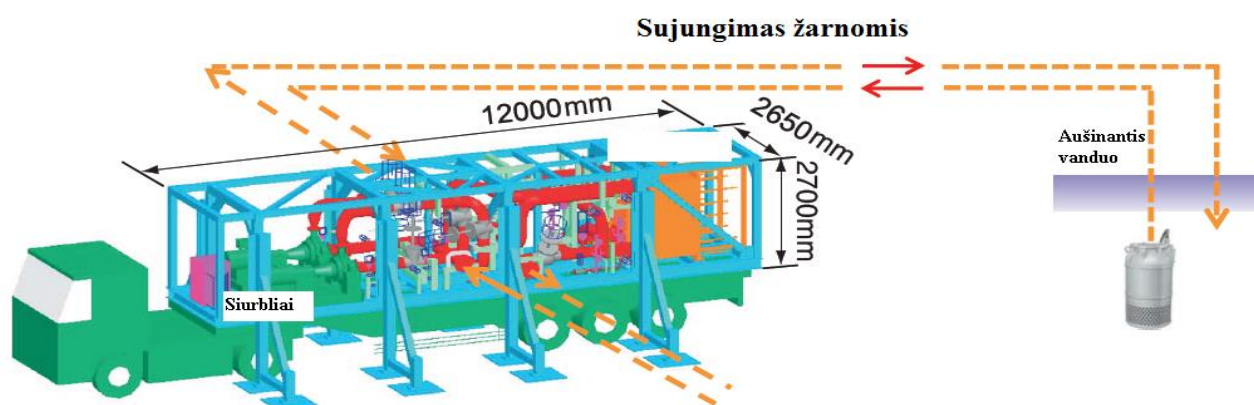
ekonominius rodiklius. Naujieji patobulinimai apima išorinių recirkuliacijos siurblių pakeitimą vidiniais, kas įtakoja didelio skersmens vamzdžių, esančių žemiau aktyviosios zonos viršaus nebuvimą. Akivaizdu, kad dėl šių patobulinimų suvirintų siūlių skaičius sumažėja, bei pirminio kontūro vamzdynas tampa nereikalingas. Sumažėjus techninės priežiūros poreikiui, normalios reaktoriaus eksploatacijos metu, natūraliai sumažinama profesinės apšvitos rizika personalui. Be to, esant šilumnešio cheminių parametrų kontrolei ir tobulesniam branduoliniam kurui, taip pat beveik nenaudojant lydinių su kobalto priemaišomis, dar labiau sumažinta personalo apšvita. Naujoji reaktoriaus pastato konstrukcija, kuriame yra aktyvioji zona, leidžia sudaryti antrinį apsauginį kiautą. Reaktoriaus pastatas kartu su reaktoriaus slėginiu indu yra integruoti, tai leidžia pagerinti bendrą seisminį atsparumą. Naujoji kontrolės sistema ir skaitmeniniai prietaisai, leidžia užtikrinti didesnę tikslumą ir patikimumą. Reaktoriaus efektyvumas siekia iki 34,2 % (3926 MW šiluminės galios paverčiama 1350 MW elektrine galia). Deklaruojamas ir tyrimais apskaičiuotas aktyviosios zonos pažeidimo dažnis - $<1,6 \times 10^{-7}$ reaktoriui per metus, o didelių radioaktyviųjų medžiagų išmetimų į aplinką dažnis - $<1 \times 10^{-6}$ reaktoriui per metus. Atominės elektrinės su ABWR statybų trukmė trunka 39 mėnesius. Reaktorius yra atestuotas ir atitinka EUR dokumentą 2000 m., taip pat yra atliekamas jo tipinio projekto vertinimas Didžiojoje Britanijoje bei jam JAV yra išduotas NRC sertifikatas 2008 m. kovo mėn. ABWR reaktoriaus konstrukcijos licenziją turi trys šalys, tai Japonijoje, JAV ir Taivanas. Pirmasis ABWR buvo pastatytas Japonijoje kaip Kashiwazaki 6-tas blokas, ir pradėtas eksploatuoti nuo 1996 m. Taip pat Japonijoje veikia dar keturi enegetiniai blokai su ABWR, kita dalis yra statomi arba planuojami (neišimtis Lietuva). Eksploatuojant tokį reaktorių, per metus susidaro apie 28,7 TeU panaudoto kuro, kuris turi būti saugomas ir keičiamas reaktoriuje, maždaug kas 24 mėn.[35]

2.4. Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus technologijų analizė

Analizuojant verdančio vandens reaktorių, išryškėja, kad esminis ir vizualiai labiausiai matomas technologinis skirtumas tarp ABWR ir BWR reaktorių – cirkuliaciniai siurbliai sumontuoti reaktoriaus korpuso viduje, toliau darbe bus aptartas išsamiau šis patobulinimas. Be to: numatomas ilgesnis reaktoriaus eksploatacijos laikas – 60 metų, jėgainės projekte įdiegtos modernios skaitmeninės reaktoriaus valdymo sistemos, atlikti patobulinimai ECCS, apsauginio gaubto konstrukcijoje ir kitose su branduoline sauga susijusiose sistemose, sumažintas eksploatacijos metu susidarančių radioaktyviųjų atliekų kiekis, pagal ALARA principą sumažintos apšvitos dozės eksploatuojantiems darbuotojams. [14] Analizuojant ABWR, galima išskirti šiuos esminius patobulinimus, bei standartines technologijas:

- Apsaugos sistemos įdeigtos ABWR reaktoriuje yra pilnai kompiuterizuotos, todėl eksploatacinio personalo darbas supaprastėja ir padidėja patikimumas. Taigi, tokiu būdu išvengta žmogiškojo faktoriaus klaidų, supaprastėja reaktoriaus valdymas. [28]

- Užtikrinant patikimą vandens įpurškimo sistemą ir maksimalų aušinimą, įdiegtos papildomos prevencijos priemonės didinančios mobilumą, nešiojamų (mobilių) siurblių įvedimas. Sunkios avarijos atveju, aušinimui naudojama mobilios aušinimo sistemos (sunkiasvoris transportas su siurbliais žr. 2.4 pav.) Šis papildomos įrangos įvedimas yra taikomas ir kitokio tipo reaktoriuose, tačiau šių papildomų saugos priemonių įvedimą ABWR reaktoriuje įtakojo Fukushima BWR reaktorių avarija.



2.4 pav. Mobilūs siurbliai sumontuoti ant sunkiasvorio transporto, skirti aušinti reaktorių sunkios avarijos atveju [24].

- ABWR reaktoriaus aušinimo sistema, lyginant su senesnės kartos BWR tipo reaktorių aušinimo sistemomis, sudaryta net iš trijų nepriklausomų sistemų - žemo slėgio sistemų (LPFL), aukšto slėgio sistemų (HPCF, RCIC) ir likutinės šilumos šalinimo sistemų (apsauginio gaubto erdvės aušinimas (containment spray), kondensato baseino (suppression pool) aušinimas, ADS). Lyginant su senesnės kartos reaktorių technologijomis, avarinio aušinimo sistemos garantuoja, kad netekus išorinio elektros energijos arba maitinančiojo vandens (feedwater), ar įvykus bet kokiai avarijai, aktyvioji zona bus pasidengusi po vandeniu. Senesnės kartos reaktoriuose aktyviosios zonos „atidengimas“ (core uncover), yra įmanomas reiškinys, tačiau esančios aušinimo sistemos užtikrina, kad kuro rinklių temperatūra nepasiektų kritinių temperatūrų, t.y. nebūtų aktyviosios zonos pažeidimo. Pakeitus sistemų įsijungimo tvarką, ABWR sistemos įsijunginėja nuosekliai, o ne visos kartu, tokiu būdu supaprastintas operatorių darbas, paprasčiau jas sekti. Esant avarijos atvejui, sistemos automatiškai gali dirbti net iki 72 valandų be papildomo operatorių darbo. [2]

ABWR aušinimo sistema pateikiama 1 priede.

- ABWR įrengtos net trys nepriklausomos ir dubliuojančios saugos sistemos. Saugos sistemos yra visiškai fiziškai ir mechaniškai atskirtos. Sistemos patalpintos skirtingose patalpose, prijungtos prie atskirų dubliuotų energijos šaltinių. Esant dviejų sistemų sutrikimams, trečioji pilnai užtikrins reaktoriaus stabdymą ir aušinimą. [28]

- Kadangi sustabdžius reaktorių, branduoliniame kure vyksta radioaktyvieji virsmai, ko pasekoja susidaro likutinė reaktoriaus šiluma, ABWR reaktoriuje įdiegta autonominė RCIC (reactor core isolation cooling) sistema, kuri veikia be papildomo energijos tiekimo, naudodama po sustabdymo susidarantį garą, kuris suka nepriklausomą turbiną, o pastaroji energiją perduoda aušinimo vandens siurbliui. Turbinoje garas susikondensuoja ir patenka į kondensato baseiną, iš kurio turbinos sukamas siurblys vandenį grąžina į maitinamojo vandens kontūrą, kuriuo vanduo grįžta į reaktorių. Sistema sukurta taip, kad galėtų aušinti sustabdytą reaktorių ne tik dingus išoriniam energijos tiekimui, bet ir praradus rezervinius elektros energijos šaltinius, tokius kaip akumuliatorius, dyzelinius generatorius ir kt.

Likutinę šilumos išsiskyrimo galios priklausomybę nuo laiko galima pasiskaičiuoti pagal formulę:

$$W_{tiek} = 0,064W_0[t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] \quad (2.1)$$

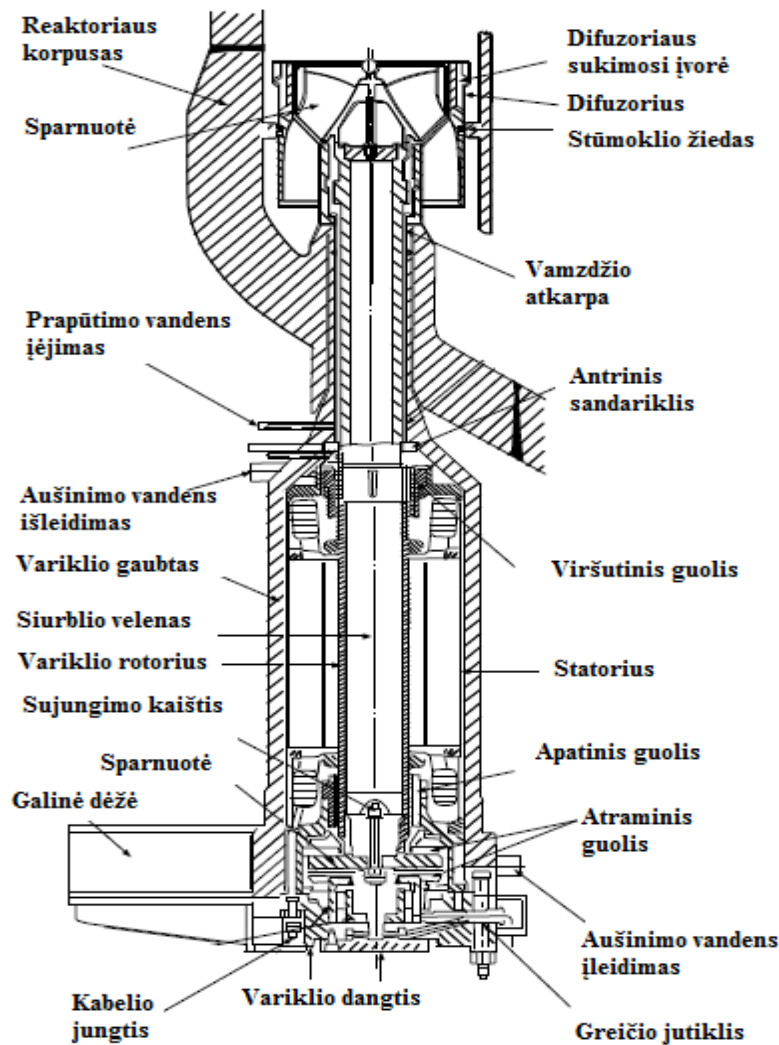
kur: W_0 – reaktoriaus, kuro rinklės ar kuro tabletės galia prieš sustabdant, t – laikas trukęs po reaktoriaus sustabdymo (s), T – laikas, kurį reaktorius dirbo iki sustabdymo (s). [2]

- Recirkuliaciniai siurbliai integruoti į reaktoriaus korpusą. Lyginant su senesnės kartos BWR, supaparastėja konstrukcija – reaktoriuose nėra naudotų didelio diametro išorinių recirkuliacijos kilpinių vamzdynų. Tai sąlygoja reaktoriaus mechanikos paprastumą, eliminavus didelio skersmens vamzdžio trūkio, sklendės nesuveikimo tikimybę - padidėjo sistemos patikimumas. Normalios reaktoriaus eksploatacijos metu dirba ne daugiau 9 siurblių, 1 visada rezerve. Kadangi ABWR tipo reaktoriuje galios valdymas gali būti atliekamas ne tik valdymo stryvais, bet ir siurblių pagalba, reguliuojant jų apsakas, todėl vienu metu gali dirbti nebūtinai visi 9 siurbliai. Esant nuo 70% iki 100% reaktoriaus darbo galiai, reaktoriaus galios valdymas atliekamas tik siurblių pagalba, keičiant aušinančio vandens srauto debitą per aktyviąją zoną. Sukimosi greitis reguliuojamas keičiant maitinimo įtampą konverteriais. Kad būtų užtikrintas tolygus aušalo padavimas į reaktorių sutrikus elektros energijos tiekimui vienoje ar keliose tiekimo linijose, siurbliai yra maitinami keturiomis nepriklausomomis elektros energijos linijomis, kurios išdėstytos simetriška schema (3, 3, 2, 2 siurbliai). Netekus išorinės elektros energijos, siurbliai maitinami avariniais dyzeliniais generatoriais. [2] Recirkuliacinių siurblių charakteristikos pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Recirkuliacinių siurblių techninės charakteristikos.

| ABWR recirkuliacinio siurblio techninės charakteristikos | |
|---|----|
| Siurblių skaičius reaktoriuje | 10 |

| ABWR recirkuliacinio siurblio techninės charakteristikos | |
|--|--------------------------------|
| Siurblių našumas | Apie 8300 m ³ /h* |
| Bendras aukštis H | Apie 46 m* |
| Siurblių greitis | Apie 1,600 min ⁻¹ * |
| Darbinė temperatūra | 302 °C |
| Darbinis slėgis | 8,62 MPa |
| *Maksimalus 120% srautas | |



Kadangi reaktoriaus temperatūra yra aukšta, todėl siurblių korpusai yra aušinami vandeniu, jis tiekiamas iš bendros valdymo strypų valdymo ir aušinimo sistemos. Siurblio korpusas taip pat pripildytas vandens, nėra sausas, rotorius sukasi vandenyje. Kad į siurblio vidų nepatektų šiukšlių iš reaktoriaus kontūro, vandens slėgis siurblyje palaikomas aukštesnis už reaktoriaus kontūro slėgį. Siurblių elektros variklius galima remontuoti ar keisti tik sustabdžius reaktorių, tačiau keitimo metu nebūtina iš reaktoriaus išleisti vandens.[2] Recirkuliacinio siurblys su sudedamosiomis dalimis pateiktas 2.5 paveiksle.

2.5 pav. Integruotas recirkuliacinis siurblys (sudaryta remiantis [30] literatūra).

- Reaktoriuje yra įrengtos net keturios viena nuo kitos nepriklausomos dubliuotos saugos sistemų loginės ir valdymo grandinės. [28]
- Drėgmei pašalinti iš garų srauto, išeinančio iš aukšto slėgio turbinos, ir perkaitinti garai ABWR reaktoriaus turbinos sistemoje įrengtas drėgmės separatorius, kitaip perkaitintuvas. Naudojant drėgmės separatorių - perkaitintuvą gaunamas apie 3,4 % didesnis ABWR reaktorių turbinos sistemos šiluminis efektyvumas lyginant su senesnio tipo BWR reaktorių turbinų sistemomis.

- Valdymo strypai sudaryti iš elektrotechninės ir hidraulinės dalies. Elektrotechninėje dalyje yra įdiegta pozicionavimo sistema, kuri normalios eksploatacijos metu strypą valdo žingsniniu elektros varikliu, perduodant jėgą per sliekinę pavarą, taip strypą galima judinti aukštyn ir žemyn. Tai leidžia tiksliau keisti reaktoriaus galią paleidimo, stabdymo, galios keitimo metu, tai taip pat leidžia sutrumpinti reaktoriaus paleidimo laiką, reikalingą pasiekti nominalų galios lygį. Esant avariniam situacijai įsijungia nepriklausoma nuo elektros maitinimo hidraulinė sistema, kuri iš papildomos linijos į strypo valdymo mechanizmą iš suslėgto vandens rezervuaro gauna vandenį, kuris atkabina strypo sliekinės pavaros sukabinimo mechanizmą, nuo srieginio strypo ir veikiant hidrauliniai jėgai per kelias sekundes strypą įstumia į aktyviąją zoną. Esant sustumtiems strypams, viršutinėje padėtyje įrengti stabdžiai, kurie neleidžia atsikabinus strypui kristi žemyn. [2]

- Reaktoriaus korpusui gaminti pasirinkta mažo anglis plienas o vidinė reaktoriaus korpuso dalis yra padengiama korozijai atspariu plieno sluoksniu, kas įtakoja reaktoriaus ilgaamžiškumą ir sumažina spinduliuotės poveikį, sklindantį iš reaktoriaus korpuso. [28]

- Siekiant sumažinti suvirinimo siūlių kiekį, atvamzdžius išeinančius iš aktyviosios zonos, korpuse žemiau aktyviosios zonos nėra nei vieno vamzdžio, kurio skersmuo būtų didesnis nei 5 cm, reaktoriaus korpuso didžioji dalis gaminama iš vientiso metalo ruošinio, kas įtakoja didesnę saugumą ir sumažina aušinančio šilumumnešio praradimo galimybę iš aktyviosios zonos.

- Po skaudžios Fukushima avarijos patirties, norint garantuoti maksimalų atsparumą seisminiam aktyvumui, apsauginis reaktoriaus kevalas su reaktoriaus korpusu sudaro vientisą integruotą, žemės drebėjimams atsparią konstrukciją. Pats kevalas yra cilindrinės formos, pagamintas iš gelžbetonio ir plieno lakštų. ABWR, skirtingai nei BWR, kaip jau buvo minėta, nėra recirkuliacinio kontūro vamzdynų, todėl kevalas yra mažesnis, atitinkamai ir pastatas yra mažesnis. Tai sumažino statybų trukmę, medžiagų kiekį, ir žinoma investicijas.

- Pastato konstrukcija statoma taip, kad esant užtvindymo atvejui, garantuotų vandens nepatekimą į vidų.

- Jeigu įvyktų sunki avarija, kurios metu pradėtų lydėtis aktyvioji zona, reaktoriaus korpuso apačioje yra suprojektuotas storas bazaltu sustiprintas gelžbetoninis padas, kuris surinktų ir sulaikytų lydalą.

- Elektrinės su ABWR tipo reaktoriumi eksploatacinė trukmė pailgėjo iki 60 metų, tuo tarpu senesnio tipo BWR ir kitų kartų reaktorių projektinė eksploataavimo trukmė buvo tik apie 30 metų.

- Naudojant baseino vandens įpurškimo sistemą, sustiprinta panaudoto branduolinio kuro aušinimo sistema. Esant nelaimingų atsitikimų atvejui, valdymo funkcionalumas yra sustiprintas naudojant išorinį vandens įpurškimą. Taip pat atsirado papildomos vandens lygio ir temperatūrų stebėjimo sistemos, esant sunkios avarijos atvejui.

- Galios savireguliacija (inherentsafety - vidinė sauga), viena iš savybių kuri būdinga ABWR ir senesnės kartos BWR tipo reaktoriams.

- Aktyvioje zonoje, lyginant su PWR tipo reaktoriumi yra gana mažas energijos išsiskyrimo tankis, apie 50 MW/m³, kai PWR reaktoriuje apie 100 MW/m³, kW/l (patvirtinama 3.2 poskyryje atliekamais skaičiavimais).

- Apsauginis kevalas evoliucionavo iš Mark II tipo reaktoriaus apsauginio kevalo. Karšto kondensato baseino patalpa skirtingai nei Mark I tipo yra stačiakampio žiedo formos, o skirtingai nei Mark II tipo yra atskirta betonine perdanga, kuri apsaugo baseiną nuo šiukšlių, kurios gali atsirasti normalios eksploatacijos ar remontu metu (apsauginio kevalo evoliucija nuo BWR iki ABWR pateikiama 2 priede). Šis patobulinimas yra svarbus tuo, kad iš kondensato baseino yra naudojamas vanduo įvykus avarijai aušinti reaktorių, o ten esančios šiukšlės kritimo metu gali sugadinti avarinio aušinimo siurblius. Apatinėje reaktoriaus zonoje, sumontuotų siurblių ir valdymo strypų aptarnavimui įrengta besisukanti platforma, šis patobulinimas pagal ALARA principą yra skirtas sumažinti apšvitos dozes darbuotojams. Perdaryta kuro iškrovimo sistema. [2]

- ABWR saugos sistemos yra paremtos apsaugos gilyn (angl. Defence in Depth – DiD) koncepcija. Šis principas įdiegtas siekiant kompensuoti galimas žmogaus klaidas ir mechanizmų gedimus. DiD pagrįstas keliais saugumo lygiais, įskaitant eilę barjerų, kurie sustabdo radioaktyvių dalelių išmetimą į aplinką. Principo esmė yra ta, kad barjerai apsaugo tiek branduolinę jėgainę nuo pažeidimų, tiek ir patys save. DiD principas taip pat turi papildomas priemones, skirtas apsaugoti gyventojus ir aplinką nuo žalos, kai šie barjerai nėra visiškai efektyvūs. [17] Šis principas yra naudojamas įvairiose srityse. TATETA yra nustačiusi penkis DiD lygius, pagal kuriuos ABWR atitinka tarptautinius standartus. ABWR apsaugos gilyn koncepcija pateikta 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Apsaugos gilyn koncepcija [17]

| Apsaugos gilyn lygiai | Tikslai | Realizacijos ABWR būdai |
|-----------------------|---|---|
| 1 lygis | Eksploatacijos klaidų ir anomalijų prevencija. | Anti-seisminėmis priemonėmis. |
| 2 lygis | Saugus reaktoriaus sustabdymas. Neįprastų eksploatacinių būsenų valdymas ir gedimų nustatymas. | Reaktoriaus saugos sistemomis. |
| 3 lygis | Reaktoriaus aušinimas ir apsauginio gaubto vientisumo užtikrinimas. Projektinių avarijų valdymas. | Avarinė reaktoriaus aušinimo sistema. Pastato konstrukcijų sandarumu Dujų valymo ir dujų mišinio sprogo kontrolės sistemos. |
| 4 lygis | Sunkių avarijų suvaldymas. | Reaktoriaus pastato erdvės inertiškumas. Sunkių avarijų suvaldymo priemonės. |

| | | |
|---------|------------------------------------|---|
| | | Post-Fokušima patobulinimai. |
| 5 lygis | Radiacinių pasekmių sušvelninimas. | Atstumo didinimas. Avarinės parengties (vietinės, regioninės) avarinių planų vykdymas. |

Apibendrinant skyrių, galima teigti, kad ABWR reaktorius yra natūralus antros kartos BWR reaktorių evoliucijos rezultatas, kuris kuriamas pagal ankstesnius Europos, Japonijos ir JAV BWR reaktorių projektus, atsižvelgiant į ilgametę šių reaktorių eksploatavimo patirtį bei skaudžias pamokas įvykusias Fukušimos avarijos metu, tokio tipo reaktorius ir technologijos yra vienintelės išbandytos praktikoje, t.y. eksploatuojamos elektrinės su ABWR reaktoriumi.

2.5. Pagrindiniai ABWR ir BWR tipo reaktorių techniniai duomenys ir jų skirtumai

Lyginant ABWR su senesnės kartos BWR, ABWR reaktorius natūraliai yra pranašesnis už savo pirmtaką. ABWR ir BWR/5 techninių parametrų palyginimas pateikiamas 2.3 lentelėje. Išsamesnis ABWR temperatūrų, slėgio, debito pasiskirstymas reaktoriuje pateikiama 3 Priede.

Pagrindinis ABWR reaktoriaus aktyviosios zonos skirtumas nuo senesnės kartos BWR reaktoriaus, tai platesnis tarpas tarp kuro rinklių šilumnešiui pratekėti, kuris turi įtakos:

- 1) Didesniam sustabdyto šalto reaktoriaus ikikritiškumui.
- 2) Didesnei ribai tarp kanalų ir valdymo organų sąveikos.
- 3) Vidutiniškam neigiamam garo reaktyvumo efektui, kas užtikrina didesnę reaktoriaus stabilumą pereinamųjų procesų metu.

2.4 lentelė. ABWR ir BWR techninių parametrų palyginimas. [15]

| Parametrai | ABWR | BWR |
|---|---|---|
| Elektrinė galia, MWe | 1350 | 1100 |
| Šiluminė galia, MWt | 3926 | 3293 |
| Slėgis reaktoriuje, MPa | 7,2 | 7,1 |
| Maitinimo vandens temperatūra, °C | 215 | 215 |
| Kuro rinklių skaičius | 872 | 764 |
| Valdymo strypų skaičius | 205 | 185 |
| Reaktoriaus korpuso skersmuo ir aukštis, m | 7,1 ir 21 | 6,4 ir 22 |
| Reaktoriaus vandens recirkuliacijos sistema | Vidiniai siurbliai (10) | Išoriniai siurbliai (2) ir inžektoriai (20) |
| Galios valdymas | Tikslaus judesio sistema | Hidraulinė judesio sistema |
| Greitas stabdymas (SCRAM) | Hidraulinis | Hidraulinis |
| Likutinės šilumos šalinimo sistema | 3 sistemos | 2 sistemos |
| Apsauginis kevalas | Sustiprinto betono vientiso tipo pastatas (4 priedas) | Mark-I arba plieninis, Mark-II kevalai |
| Pagrindinės garo turbinos | Su 2 pakopų tarpiniu garo | Be tarpinio garo pašildymo |

| | | |
|--|---|---|
| šiluminis ciklas | pašildymu | |
| Aktyviosios zonos avarinio aušinimo sistema (AZAAS) | Žemo slėgio užliejimas Aukšto slėgio užliejimas Reaktoriaus aktyviosios zonos izoliavimo aušinimo sistema Automatinė slėgio mažinimo sistema | Žemo slėgio užliejimas Žemo slėgio įpurškimas Aukšto slėgio aktyviosios zonos apipurškimo sistema Automatinė slėgio mažinimo sistema |

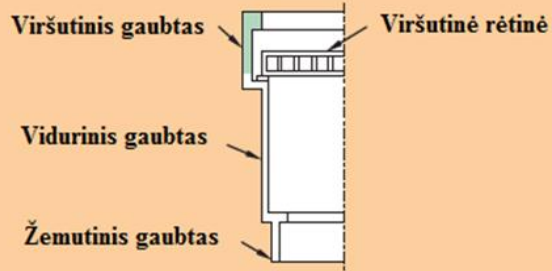
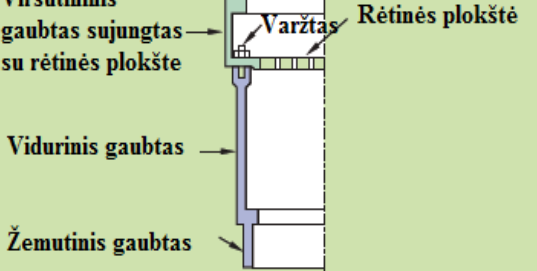
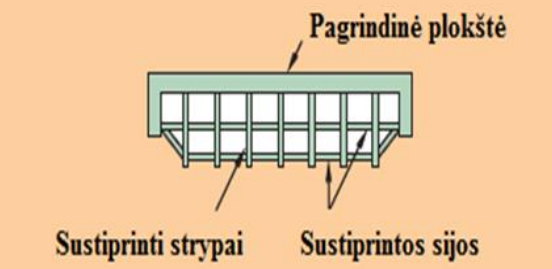
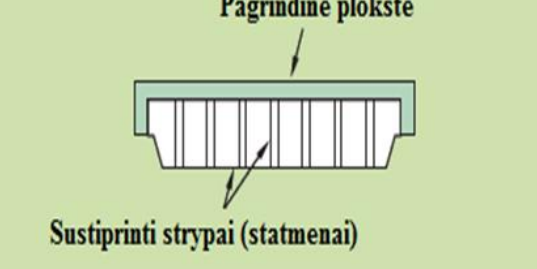
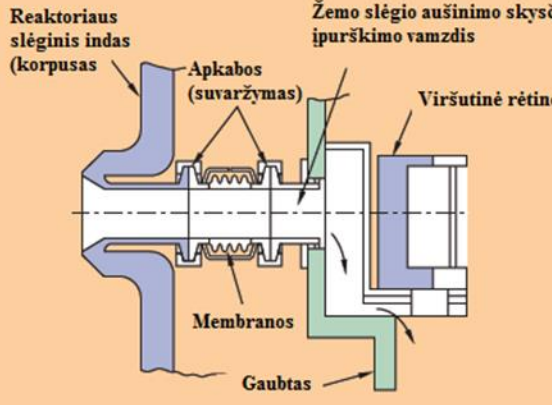
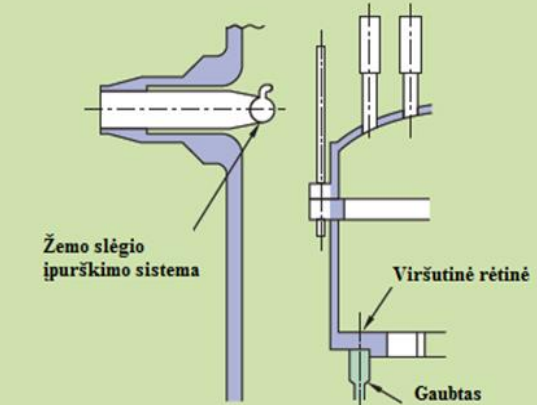
2.6. ABWR reaktoriaus vidinių komponentų analizė, palyginimas su BWR-5 reaktoriumi

ABWR reaktoriaus vidinių komponentų gamyba remiasi BWR-5 reaktoriaus komponentų projektavimu, tai yra evoliucinis komponentų gerinimas nuo BWR iki ABWR. Daugybė reaktoriaus vidinių dalių buvo modifikuoti siekiant pagerinti struktūrinį tvirtumą ir didesnę reaktoriaus našumą.

Struktūrinis reaktoriaus BWR-5 ir ABWR palyginimas pateikiamas 2.4 lentelėje.

2.5 lentelė. ABWR reaktoriaus vidinių komponentų palyginimas su BWR-5 (sudaryta remiantis [24] literatūra).

| Pasikeitimai | BWR-5 | ABWR |
|--------------|---|------|
| 1. | Garų separatoriaus pasikeitimas iš dviejų pakopų į trijų pakopų žemo slėgio nuvedimą. | |
| | | |
| 2. | Viršutinės rėtinės struktūra buvo pakeista iš atskirų sudedamųjų dalių į vientisą didelio struktūrinio stiprumo rėtinę. | |
| | | |
| 3. | Aktyviosios zonos gaubto vidinis skersmuo padidintas, kad tilptų daugiau kuro rinklių. | |

| Pasikeitimai | BWR-5 | ABWR |
|--------------|---|--|
| |  |  |
| 4. | <p>Pagrindinė plokštė. Struktūra su armavimo sijomis ir statmenais joms strypais, pakeista paliekant tik armavimo sustiprintus strypus statmenai.</p>  |  |
| 5. | <p>Žemo slėgio įpurškimo sistema. Perėjimas prie vidinių recirkuliacinių siurblių, pašalina didelio diametro vamzdžių perėjimus, užtikrinant nuolatinį aktyviosios zonos pasidengimą po vandeniu. Tai pašalina būtinybę tiekti vandenį į gaubto vidų, todėl aušinimo sistema atsiranda gaubto vidoje.</p>  |  |
| 6. | <p>Reaktoriaus recirkuliaciniai siurbliai.</p> <p>Išoriniai siurbliai</p> | <p>Vidiniai siurbliai</p> |

2.7. Verdančio vandens reaktorių uždarymo priežasčių analizė

Atominės elektrinės gali būti uždarytos dėl kelių priežasčių. Lentelėse 2.5; 2.6; 2.7 pateikiu verdančio vandens tipo reaktorių uždarymo priežastis (remiantis literatūra [21]). Verdančio vandens tipo reaktorių dėl avarių pasaulyje yra uždaryta Fukušimoje ir Vokietijoje, visi kiti uždaryti atidurbę savo pilną projektinį laiką arba tapę nenaudingi ekonomiškai, taip pat dėl politinių priežasčių.

Toliau darbe atliekama analizė, siekiant įvertinti avarių priežastis Japonijoje ir Vokietijoje, taip pat ištirti kokius techninius sprendimus įtakojo avarijas ir kokius imtasi priemonių jų išvengti.

2.6 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti po avarijų arba incidentų (sudaryta remiantis [21] literatūra).

| Valstybė | Pavadinimas | Reaktoriaus tipas | Galia, (Mwe) | Darbo laikas metais | Uždarymo data | Uždarymo priežastis |
|-----------|---------------------|-------------------|--------------|---------------------|---------------|---|
| Vokietija | Gundremming en A | BWR | 237 | 10 | 1977 01 | Trumpas jungimas aukštos įtampos linijose |
| Japonija | Fukushima Daiichi 1 | BWR/3 | 460 | 40 | 2011 03 | Reaktoriaus aktyviosios zonos lydymasis dėl aušinimo problemų |
| | Fukushima Daiichi 2 | BWR/4 | 784 | 37 | 2011 03 | |
| | Fukushima Daiichi 3 | BWR/4 | 784 | 35 | 2011 03 | |
| | Fukushima Daiichi 4 | BWR/4 | 784 | 32 | 2011 03 | Pažeistas sproguis vandeniliui |

Gudrevingeno atominėje elektrinėje 1966 – 1977 metais buvo eksploatuojamas pirmasis didelis BWR tipo reaktorius Vokietijoje. Per savo eksploatavimo laiką jis pagamino 13,800 GWh elektros energijos. 1975 metais įvyko incidentas, kurio metu žuvo du darbuotojai, tai buvo pirmasis mirtinas incidentas atominėse elektrinėse. 1977 metais, elektrinėje įvyko rimta avarija, ko pasekoja buvo prarastas reaktoriaus valdymas. Esant šaltam, drėgnam orui, dvejose aukšto įtampos linijose, tiekiamose elektrą iš reaktoriaus įvyko trumpas jungimas, kas lėmė reaktoriaus greitą stabdymą. Po maždaug dešimt minučių, reaktoriuje liko apie 3 metrai vandens ir temperatūra pakilo apie 80 laipsnių. Per klaidą į reaktorių buvo paduota per daug aušinamo vandens, ko pasekoja slėgio vožtuvai išleido nuo 200 iki 400 kubinių metrų radioaktyvaus aušinamo vandens į pastato patalpą. Vanduo, taip pat dujos vėliau buvo išleistos iš pastato. Tai buvo pirmasis ir kol kas vienintelis katastrofiškas reaktoriaus valdymo praradimas Vokietijoje [22].

Darau išvadą, kad pats reaktorius nebuvo nesaugus, saugos sistemos nebuvo tobulos ir klaidos vykdant incidento šalinimą, lėmė radioaktyvių medžiagų patekimą į aplinką. Avarijos buvo galima išvengti, jeigu prie atominės elektrinės būtų buvę pastatyti rezerviniai elektros energijos šaltiniai, kaip generatoriai. Kadangi tuo metu atominėje jėgainėje buvo statomi nauji du blokai, o esamo reaktoriaus remontas ir modernizavimas būtų kainavęs didelius pinigus, buvo nuspręsta bloko negražinti į darbą.

2011 metų kovo 11 d. Japonijoje įvyko vienas iš galingiausių žemės drebėjimų istorijoje. Fukušimos AE Blokai 4, 5 ir 6 buvo uždaryti iki žemės drebėjimo, dėl planuotos techninės priežiūros. Likusieji trys blokai buvo uždaryti automatiškai po žemės drebėjimo o likutinė šiluma, netekus vietinio energijos šaltinio, buvo aušinama su avariniais generatoriais. Po visa griaušančio cunamio, kurio bangos siekė iki 14 metrų (elektrinė buvo projektuota atlaikyti iki 5-7 metrus), buvo užpilti avariniai generatoriai skirti atvėsinti reaktorių. Sustojusiuose reaktoriuose sutriko aušinimas,

kas lėmė temperatūros ir slėgio kilimą. Netekus elektros energijos tiekimo visiškai, pradėjo veikti elektros nereikalaujančios sistemos, tačiau jų nepakako visiems blokams. Kadangi reaktoriai buvo neaušinami o likęs aušinantis vanduo pradėjo virti ir garuoti, reaktorių aktyvioji zona pradėjo lydėtis, susidaręs lydalas per apačią išbėgo į konteinmento dugną. Įkaitę vandens garai pradėjo reaguoti su rinklių, bei šiluminių elementų apvaskalų medžiaga cirkoniu, ko pasekoja susidarė daug vandenilio, kuris 1, 2 ir 3 blokuose vėliau sprogo. Sprogimas vyko konteinmentų viduje, kurie išliko, išoriniai pastatai buvo sugriauti. Išorinis elektros tiekimas buvo atstatytas, tačiau aušinimo sistemos neveikė, todėl buvo nuspręsta reaktorius aušinti jūros vandeniu.

Kadangi Japonijoje nuolatos vyksta žemės drebėjimai, kurie vėliau gali iššaukti cunamius, galiu daryti išvadą, kad viena iš pagrindinių klaidų, dėl kurių įvyko avarija yra per mažas elektrinės aukštis virš jūros lygio. Tragediją priskirčiau ne gamtos sukeltai stichijai o projektuotojams, kurie projektuodami elektrinę nepasirinko saugaus aukščio virš jūros lygio. Darau prielaidą, kad tokį pasirinkimą galėjo įtakoti šie faktoriai, tai: 1. žemiau stovinti elektrinė nereikalauja labai galingų siurblių, kurie galėtų tiekti vandenį aušinimo sistemos; 2. elektrinės iškėlimas reikalautų papildomo kiekio medžiagų (betonas, armatūra ir kt.) kas būtų įtakoją daug didesnę elektrinės kainą. Kita vertus, elektrinė buvo pradėta statyti 1967 m., apskritai pirmoji komercinė jėgainė pradėjo veikti 1954 m., [23] patirtis eksploatuoti atominės elektrines buvo dar labai maža, šiais laikais patikrinami visi įmanomi rizikos faktoriai ir tokios klaidos yra negalimos. Karti patirtis Japonijoje, dar labiau sugriežtino saugumo kriterijus naujai projektuojamoms ir statomos elektrinėms. Viena iš pagrindinių pamokų, tai papildomo elektros energijos šaltinio svarba, netekus išorinio tiekimo.

Taigi, jeigu Lietuvoje būtų statoma naujoji elektrinė su ABWR tipo reaktoriumi, po Fukušimos avarijos, įvertinus skaudžias pamokas, ji būtų dar saugesnė.

2.7 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti dėl politinių ir kitų priežasčių (sudaryta remiantis [21] literatūra).

| Valstybė | Pavadinimas | Reaktoriaus tipas | Galia, (Mwe) | Darbo laikas metais | Uždarymo data | Uždarymo priežastis |
|----------|---------------------|-------------------|--------------|---------------------|---------------|---|
| Italija | Caorso | BWR | 860 | 12 | 1987 | Politinė |
| Švedija | Barsebakas 1 | BWR | 600 | 24 | 1999 | Politinė |
| | Barsebakas 2 | BWR | 600 | 28 | 2005 | Politinė |
| JAV | Šorehamas | BWR | 820 | 3 | 1989 | Politinė |
| | Vallecito | BWR/1 | - | 6 | 1963 | Pirmoji privati eksploatuojama parodomoji atominė elektrinė |
| Japonija | Fukushima Daiichi 5 | ABWR | 1380 | - | - | Statybos sustabdytos po Fukušimos avarijos, siekiant |

| | | | | | | |
|----------|---------------------|------|------|---|---|--|
| | | | | | | įvertinti priežastis ir įdiegti patobulinimus |
| Japonija | Fukushima Daiichi 6 | ABWR | 1380 | - | - | Statybos sustabdytos po Fukušimos avarijos, siekiant įvertinti priežastis ir įdiegti patobulinimus |

2.8 lentelė. BWR reaktoriai uždaryti po pilno savo atidirbimo laiko, arba buvę nenaudingi ekonomiškai (sudaryta remiantis [21] literatūra).

| Valstybė | Pavadinimas | Reaktoriaus tipas | Galia, MWe | Pradėtas eksploatuoti, m | Darbo laikas metais | Uždarymo metai |
|-------------|-----------------------|--------------------|------------|--------------------------|---------------------|----------------|
| Vokietija | Kahl VAK | Eksp BWR | 15 | 1961 | 24 | 1985 |
| | Grosvelzamo | Prot BWR | 25 | 1969 | 2 | 1971 |
| | Lingeno | Prot BWR/1 | 268 | 1968 | 10 | 1979 |
| | Vurgaseno | BWR | 670 | 1972 | 22 | 1994 |
| | Gundremingeno | BWR/1 | 250 | 1966 | 11 | 1971 |
| Italija | Garigliano | BWR | 150 | 1964 | 18 | 1982 |
| Japonija | Hamaoka 1 | BWR | 515 | 1974 | 26 | 2011 |
| | Hamaoka 2 | BWR | 806 | 1978 | 25 | 2004 |
| | JPDR | Prot BWR | 12 | 1963 | 13 | 1976 |
| Olandija | Dodevardo | BWR | 55 | 1968 | 28 | 1997 |
| Rusija | Melekeso VK50 | Prot BWR | 50 | 1964 | 24 | 1988 |
| JAV | Big Rock Point | BWR | 67 | 1962 | 35 | 1997 |
| | Bonus | Demonstracinis BWR | 17 | 1964 | 4 | 1968 |
| | Dresdenas 1 | Demonstracinis BWR | 197 | 1960 | 18 | 1978 |
| | Elk River | BWR | 22 | 1963 | 5 | 1968 |
| | Humboldt Bay | BWR | 63 | 1963 | 13 | 1976 |
| | Lacrosse | BWR | 48 | 1968 | 19 | 1987 |
| | Millstone 1 | BWR | 641 | 1970 | 28 | 1998 |
| | Pathfinder | Prot BWR | 59 | 1966 | 1 | 1967 |
| Ispanija | Santa Maria de Garona | BWR/3 | 466 | 1971 | 41 | 2012 |
| Nyderlandai | Dodevardo | BWR/1 | 58 | 1969 | 28 | 1997 |

Pasaulyje verdančio vandens tipo reaktorių yra uždaryta daugiausiai, bet tai nereiškia, kad šie reaktoriai yra nepatikimi ar nesaugūs, kadangi dauguma uždaryti pasibaigus eksploatavimo trukmei, arba dėl politinių priežasčių. Dėl patobulėjusių technologinių sprendimų šie reaktoriai turi užleisti vietą dabartiniams pažangiems verdančiojo vandens tipo reaktoriams ABWR.

3. AKTYVIOSIOS ZONOS SKAIČIAVIMAI

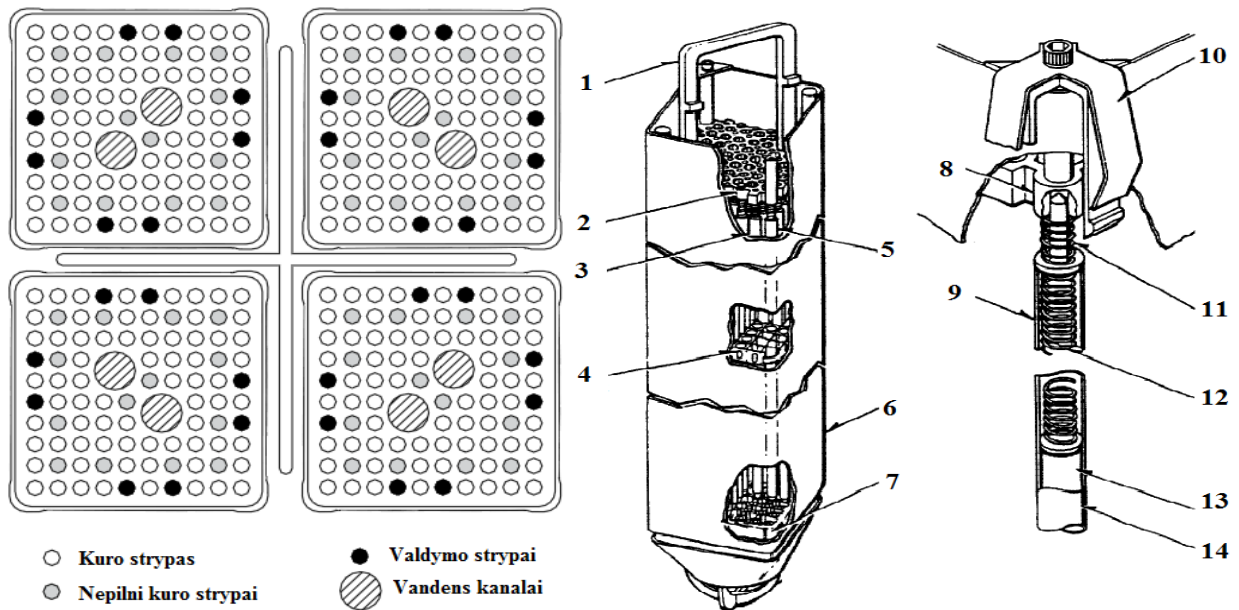
Pagrindinį vaidmenį branduolinėje energetikoje atlieka reaktoriaus aktyvioji zona ir branduolinis kuras, todėl analizuojant ABWR reaktorių, atliekami aktyviosios zonos skaičiavimai.

Prieš pradėdant reaktoriaus skaičiavimą, susirandų pradinis duomenis, kurie bus naudojami tolimesniems skaičiavimams, pasirenku šiluminių elementų konstrukciją, bei matmenis, taip pat jų skaičių, pasirenku gardelės žingsnį (žr. 3.1 pav.). Pažangaus verdančio vandens reaktoriaus aktyviosios zonos parametrai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. ABWR 1350 reaktoriaus duomenys

| Parametras | Reikšmė |
|---|---|
| Lėtiklis | Lengvasis vanduo |
| Šilumnešis | Lengvasis vanduo |
| Vandens slėgis | $p = 7,2 \text{ Mpa}$. |
| Vidutinis vandens tankis | $\gamma_{H_2O} = 831 \text{ kg/m}^3$ |
| Įeinančio vandens temperatūra | $t_{\text{įėjimo}} = 215,6 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Išeinančio vandens temperatūra | $t_{\text{išėjimo}} = 255,6 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Vidutinė vandens temperatūra | $t_{H_2O} = 235,6 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Šiluminiai elementai | Strypo pavidalo su išoriniu aušinimu |
| Išmatavimai: | $r_1 = 0,42 \text{ cm}$ |
| Išmatavimai: | $r_2 = 0,49 \text{ cm}$ |
| Išmatavimai: | $r_3 = 0,51 \text{ cm}$ |
| Šiluminių elementų skersmuo | $\delta''' = 1,026 \text{ cm}$ |
| Rinklės bei šiluminių elementų apvaskalų medžiaga | cirkonis – 2 |
| Prisodrinimo laipsnis | $x = 3,6\%$ |
| Urano dioksido tankis | $\gamma_{UO_2} = 10,97 \text{ g/cm}^3$ |
| Šiluminė galia | $N = 3926 \text{ MW}$ |
| Vidutinis šiluminis srautas šiluminių elementų paviršiuje | $q = 0,0335 \text{ MW/m}^2$ |
| Kiekvienoje rinklėje yra kuro elementų | $n = 92$ |
| Reaktoriaus rinklių kiekis | 872 |
| Gardelės žingsnis | $a'' = 1,8 \text{ cm}$ |
| Kasetės plotis | $a' = 15,24 \text{ cm}$ |
| Kasetės apvaskalo storis | $\delta = 0,5 \text{ cm}$ |
| Kasetės žingsnis | $a = 14,25 \text{ cm}$ |
| Tarpelio plotis | $\delta = 1,34 \text{ cm}$ |

| Parametras | Reikšmė |
|---------------------------|--------------|
| Aktyviosios zonos aukštis | $m = 3,71$ m |



3.1 pav. ABWR reaktoriaus kuro rinklė (GE-14) ir šiluminis elementas [30]: (1) - Kuro rinklės rankena; (2) - Viršutinė jungiamoji plokštė; (3) - Kuro paketas; (4) – Rėtinė; (5) - Šiluminis elementas; (6) - Rinklės gaubtas; (7) - Apatinė atraminė plokštė; (8) - Viršutinė jungiamoji plokštė; (9) - Kuro apvalkalas; (10) - Šiluminio elemento tvirtinimo surinkimas; (11) - Plėtimosi spyruoklė; (12) - Slėginė spyruoklė; (13) - Kuro tabletė; (14) - Kuro strypas.

3.1. Preliminarus šiluminis reaktoriaus skaičiavimas

Skaičiavimai atliekami naudojantis literatūros [3] metodika. Žinant vidutinį šilumos srautą, tenkantį šiluminių elementų paviršiaus ploto vienetui ir rinklės pjūvio plotą, galima apsiskaičiuoti vidutinę energetinę aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrovą, pagal formulę 3.1:

$$\bar{N}_0 = \frac{\bar{q} \times \pi_0 \times n}{V_0}, \text{ (MW/m}^3\text{)}; \quad (3.1)$$

čia: n – kuro rinklių skaičius, q - vidutinis šilumos srautas, tenkantis šiluminių elementų paviršiaus ploto vienetui.

Prieš apskaičiuojant vidutinę energetinę aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrovą, randamas rinklės pjūvio plotas:

$$\begin{aligned} V_{rinkles} &= a^2, \text{ cm}^2; \\ V_{rinkles} &= 15,24^2 = 232,26 \text{ cm}^2. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Apskaičiuojama vieno šiluminio elemento šilumą išskiriančio paviršiaus perimetras:

$$\begin{aligned} \pi_{\text{šiel'o}} &= 2 \times \pi \times r_q; \\ \pi_{\text{šiel'o}} &= 2 \times 3,14 \times 0,51 = 3,203 \text{ (cm)}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Randama vidutinė energetinė aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrova:

$$\bar{N}_0 = \frac{0,0335 \times 3,203 \times 10^{-2} \times 872}{232,26 \times 10^{-4}} = 47,74 \text{ (MW/m}^3\text{)}. \quad (3.4)$$

Tokia vidutinė aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrova, kartu su šiuolaikinėmis kuro rinklių technologijomis, o taip pat plačiu šilumnešio srauto reguliavimo diapazonu, ABWR reaktoriui garantuoja mažiausią branduolinio kuro poreikį, lyginant su verdančio vandens tipo reaktoriais.

Koeficientą, įvertinantį aktyviosios zonos tūrio padidėjimą dėl to, kad jo zonoje montuojami reguliavimo strypai, reikšmė priimama $\eta = 1$ ir apskaičiuojamas aktyviosios zonos tūris:

$$V_{\text{aktyviosios-zonos}} = \frac{N_{\text{šil}}}{\bar{N}_0} \times \eta; \quad (3.5)$$

$$V_{\text{aktyviosios-zonos}} = \frac{3926}{47,74} \times 1 = 85,21 \text{ m}^3.$$

Aktyviosios zonos skersmuo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D_{\text{aktyviosios-zonos}} = \left(\frac{4 \times V_{a.z.}}{\pi \times m} \right)^{0.333}$$

$$D_{\text{aktyviosios-zonos}} = \left(\frac{4 \times 85,21}{3,14 \times 0,85} \right)^{0.333} \quad (3.6)$$

$$D_{\text{aktyviosios-zonos}} = 4,51 \text{ m}.$$

čia: m – zonos aukščio ir skersmens santykis, priimu $m = 0,85$ (iš literatūros [3]).

Apskaičiuojama aktyviosios zonos plotas:

$$S_{\text{aktyviosios-zonos}} = \frac{\pi \times D_{a.z.}^2}{4} = \frac{\pi \times 4,51^2}{4} = 15,980 \text{ (m}^2\text{)} = 15980 \text{ (cm}^2\text{)}. \quad (3.7)$$

Apskaičiuojama aktyviosios zonos aukštis:

$$H_{\text{aktyviosios-zonos}} = m \times D_{\text{aktyviosios-zonos}};$$

$$H_{\text{aktyviosios-zonos}} = 0,85 \times 4,51 = 3,8 \text{ m}. \quad (3.8)$$

Projektinis ABWR aktyviosios zonos aukštis 3,71 m, galima teigti, kad skaičiavimai atlikti teisingai.

Toliau apskaičiuojamas šilumnešio greitis erdvėje tarp šiluminių elementų, prieš atliekant skaičiavimus surandamas šilumnešio užimamas rinklės pjūvio plotas, tenkantis vienam šiluminiam elementui:

$$f_0 = \frac{(a'-2\delta)^2 - n \times \pi \times r_q^2 - n' \times \pi \times r_q^2}{n}; \quad (3.9)$$

$$f_0 = \frac{(15,24 - 2 \times 1,34)^2 - 872 \times 3,14 \times 0,51^2 - 92 \times 3,14 \times 0,51^2}{872} = 1,0437 \text{ cm}^2.$$

Apskaičiuojama šilumnešio entalpijų skirtumas:

$$\Delta h = c_p (t_{isej.} - t_{iej.}); \quad (3.10)$$

$$\Delta h = 4,69 \times (255,6 - 215,6) = 187,6 \text{ kJ / (kgK)}.$$

Iš literatūros [3], radialinio šilumos išsiskyrimo netolygumo koeficientas priimamas $k_z \approx 1,4$.

Tada apskaičiuojamas maksimalus šilumnešio greitis viduriniame reaktoriaus pjūvyje:

$$w = \frac{\bar{q} \times \pi_0 \times H}{k_z \times f_0 \times \bar{\gamma}_{H_2O} \times \Delta h}; \quad (3.11)$$

$$w = \frac{0,335 \times 10^6 \times 3,203 \times 10^{-2} \times 3,8}{1,4 \times 1,0437 \times 10^{-4} \times 831 \times 187,6 \times 10^3} = 1,79 \text{ m/s}.$$

Maksimalus šilumnešio greitis bus: $w = 1,79 \text{ m/s}$.

3.2. ABWR aktyviosios zonos šiluminių savybių skaičiavimas, palyginimas su PWR

Reaktoriaus aktyviosios zonos charakteristikos gali būti apibūdinamos dviem parametrais, tai galios tankis Q ir specifinė galia. Atskirose literatūrose galios tankis įvardijamas skirtingai, mat prieš tai atliktuose skaičiavimuose, naudojantis [3] literatūros metodika ir skaičiuojant preliminarius šiluminius reaktoriaus skaičiavimus, šis parametras skamba kaip vidutinė energetinė aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrova. Galios tankį galime apibūdinti, kaip energijos kiekį tenkantį aktyviosios zonos tūrio vienetai. Kadangi reaktoriaus dydis ir kapitalo išlaidų dydis yra nominaliai susijęs su aktyviosios zonos dydžiu, galios tankis yra kapitalo sąnaudų rodiklis. Projektuojant reaktorius, jų dydis ir svoris yra papildomos išlaidos, todėl galios tankis yra svarbus parametras. Skaičiavimams pasirenkama kitokia metodika, siekiant įvertinti jų tikslingumą. Norint palyginti ABWR su PWR tipo reaktoriumi, atliekami analogiški skaičiavimai, remiantis literatūra [20].

Galios tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q''' = \frac{q'}{p^2}; \quad (3.12)$$

čia: q' - vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyviojoje zonoje, iš literatūros [20] randama p (strypo žingsnis) reikšmė, kuri lygi 16,2 mm.

Iš formulės 2 išsireiškia vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyviojoje zonoje:

$$Q' = q' \times L \times m; \quad (3.13)$$

čia: q' - vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyvioje zonoje, Q' - šiluminė reaktoriaus galia, m - aktyviosios zonos aukštis, N - rinklių kiekis su šiluminiais elementais jose, tada:

$$q' = \frac{Q'}{L \times m} ; \quad (3.14)$$

$$q' = \frac{3926}{3,71 \times (872 \times 92)} = 0,01319 = 13,19 \frac{\text{kW}}{\text{m}}.$$

Tada, galiu apskaičiuoti galios tankį, pagal 3.12 formulę:

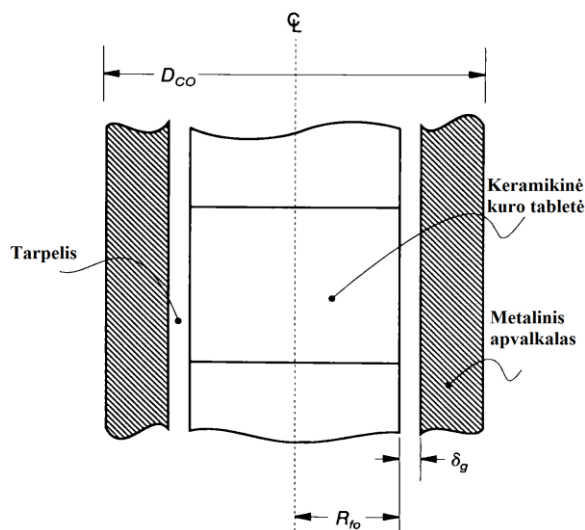
$$Q''' = \frac{13,19}{(16,2 \times 10^{-3})^2} = 0,050 \times 10^6 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} = 50 \frac{\text{kW}}{\text{L}} \text{ arba } \frac{\text{MW}}{\text{m}^3}.$$

Naudojantis skirtinga metodika, reikšmės gaunamos beveik vienodos, o taip pat literatūroje [19] randama, kad ABWR galios tankis $\sim 50 \text{ MW/m}^3$, todėl galima teigti, kad skaičiavimai atlikti teisingai.

Specifinė galia yra rodiklis, rodantis kiek kuro masės vienetą sukuria energijos. Paprastai specifinė energija yra išreikšta watais į gramą sunkiųjų atomų. Šis parametras yra tiesiogiai susijęs su branduolinio kuro ciklu ir pagrindiniais atsargų reikalavimais. Tipinė branduolinių reaktorių kuro tabletė pavaizduota 3.2 paveiksle, specifinė galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$\text{Specifinė galia} = \frac{Q}{\text{Sunkiųjų atomų masė}} = \frac{q'}{\pi \times R^2 \times \rho_{\text{tabletės}} \times f} \quad (3.15)$$

čia: R - kuro tabletės skersmuo, ρ - kuro tabletės tankis, q' - vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyvioje zonoje, f - masės dalis.



3.2 pav. Tipinis branduolinių reaktorių kuras

Kadangi nėra žinoma UO_2 masės dalis, todėl prieš skaičiuojant specifinę galią, apsiskaičiuojama f_{UO_2} . Skaičiavimai atliekami pagal 3.16 lygtį, urano įsodrinimo laipsnis priimamas 3,6%.

$$f_{UO_2} = \frac{rM_{sk} + (1-r)M_{nsk}}{rM_{sk} + (1-r)M_{nsk} + M_{O_2}} ; \quad (3.16)$$

čia: r – atomų masės dalis %, M_{sk} – skylančių atomų molekulinė masė, M_{nsk} – neskylančių atomų molekulinė masė.

$$f_{UO_2} = \frac{0,036 \times 235,0439 + 0,964 \times 238,0508}{0,036 \times 235,0439 + 0,964 \times 238,0508 + 2 \times 15,9944} = 0,8814 .$$

Priimama, kad kuro tablečių teorinis tankis 95 %, urano dioksido teorinis tankis $10,97 \text{ g/cm}^3$ ir kuro tabletės skersmuo 10,26 mm, tada pagal formulę 3.15 galima pasiskaičiuoti specifinę galią:

$$\text{Specifinė galia} = \frac{1,319 \times 10^4 \frac{W}{m}}{3,14 \left(\frac{10,26 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \times \left(\frac{0,95 \times 10,97}{10^{-6}} \right) m^2 \frac{g}{m^3}} \times 0,8814 = 17,38 \frac{W}{g \text{ kuro}}$$

Analogiškai atliekami skaičiavimai PWR tipo reaktoriui, siekiant palyginti reaktorių parametrus.

Užsидуodami tokie PWR reaktoriaus pradiniai duomenys: kuro tabletės diametras 8,2 mm, kuro įsodrinimo laipsnis – 2,6%, šiluminė galia – 3411 MWt, kuro kiekis vienam pilnam reaktoriaus užkrovimui 101 t, aktyviosios zonos aukštis – 3,66 m, kuro rinklių skaičius – 193, šiluminių elementų skaičius rinklėje – 264. Gautieji rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje, PWR skaičiavimų variantas pateikiamas 5 Priede.

3.2 lentelė. Gauti rezultatai

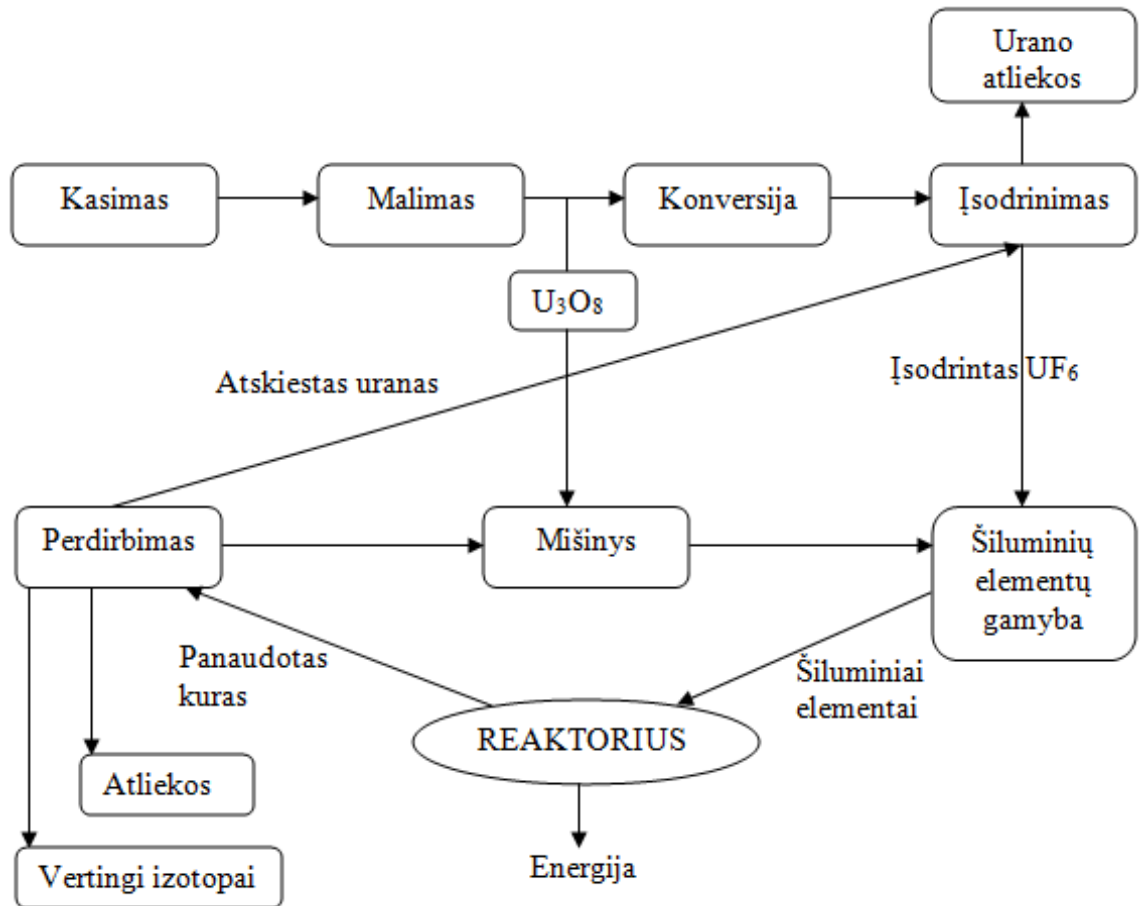
| Eil. Nr. | Parametras | ABWR | PWR |
|----------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. | Galios tankis Q''' | $50 \frac{MW}{m^3}$ | $112 \frac{MW}{m^3}$ |
| 2. | Vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyvioje zonoje q' | $13,19 \frac{kW}{m}$ | $17,8 \frac{kW}{m}$ |
| 3. | Atomų masės dalis f | 0,8814 | 0,8815 |
| 4. | Specifinė galia | $17,38 \frac{W}{g \text{ kuro}}$ | $36,70 \frac{W}{g \text{ kuro}}$ |
| 5. | Kuro kiekis, reikalingas pilnam reaktoriaus užkrovimui | 159,58 t | 101,00 t |

Atlikus skaičiavimus ir palyginimus su PWR, pastarojo galios tankis yra didesnis. Esant panašioms šiluminėms galioms, ABWR reaktoriaus korpusas bus gerokai didesnis nei PWR, tačiau mažiau veikiamas slėgio ir mažesnės temperatūros eksploatacijos metu.

4. ABWR REAKTORIAUS BRANDUOLINIO KURO CIKLO SKAIČIAVIMAS

4.1. Branduolinio kuro ciklo balanso skaičiavimas

Branduolinio kuro ciklas 4.1 pav. – tai visas branduolinio kuro kelias, kuris prasideda nuo urano rūdos telkinių paieškos iki panaudoto kuro laidojimo.



4.1 pav. Branduolinio kuro ciklas (sudaryta autoriaus remiantis literatūra [16])

Pasinaudojant pasaulinės informacinės energetikos tarnybos sukurta skaičiuokle, pavadinimu „The WISE Uranium Project“, darbe atliekami ABWR reaktoriaus branduolinio kuro ciklo skaičiavimai. Skaičiuoklės pagalba atliekami branduolinio kuro ciklo skaičiavimai, pasirenkant ABWR tipo reaktorių. Skaičiavimai atliekami branduolinio kuro ciklo etapams, nuo urano rūdos iškasimo iki per metus pagamintos elektros energijos kiekio.

Toliau atliekami branduolinio kuro ciklo balanso skaičiavimai. Užsiduodami pradiniai ABWR reaktoriaus parametrai, kurie pateikti 4.1 lentelėje. Užsiduodami pradiniai duomenys, tokie kaip – atominės elektrinės efektyvumas (kiek pagamintos šiluminės energijos paverčiama į elektros energiją), branduolinio kuro išdegimo lygis, kuro įsodrinimo laipsnis, reaktoriaus galia.

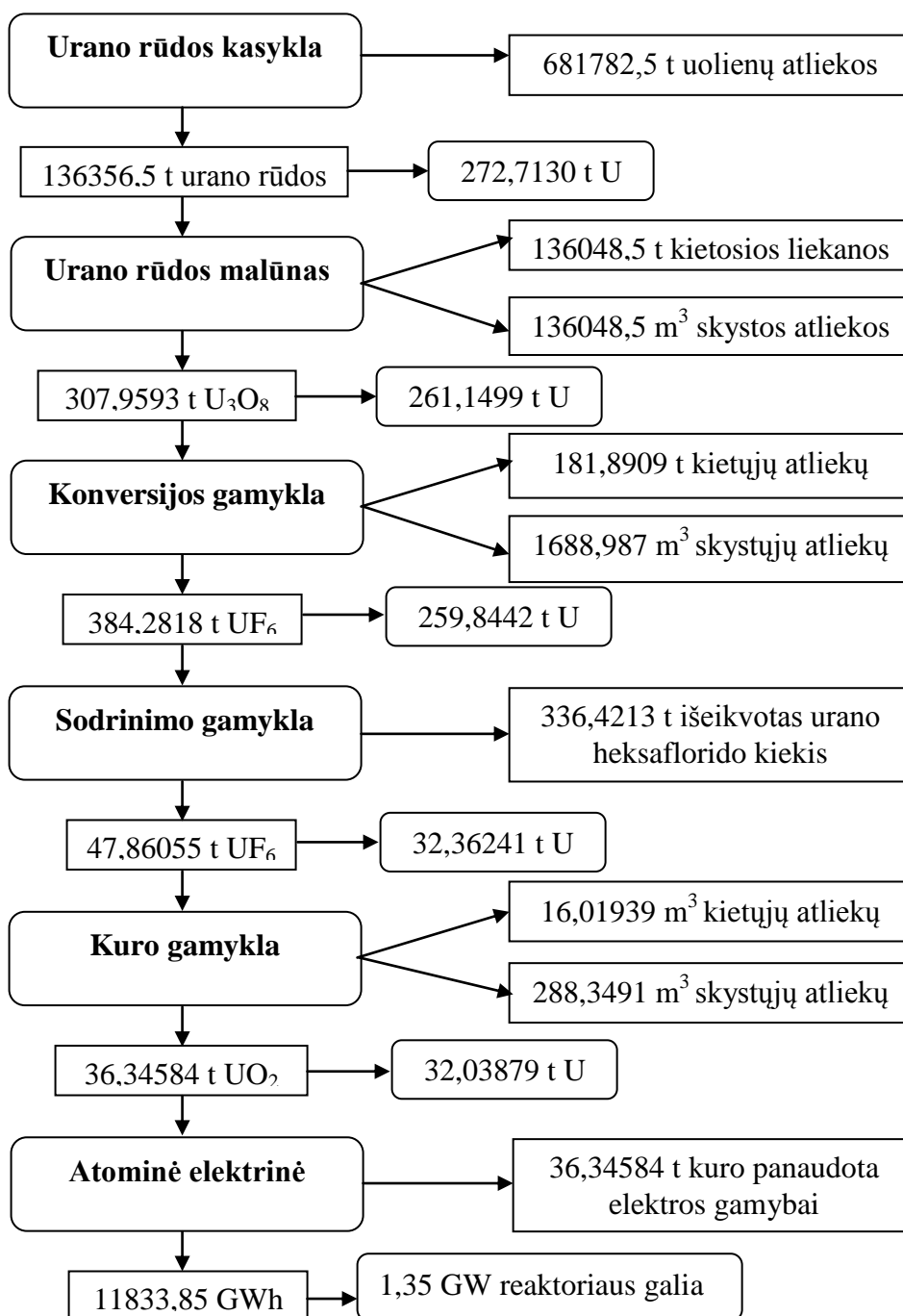
Kuro išdegimas, tai atominėje elektrinėje pagaminta terminė energija iš vienos metrinės tonos sodrinto urano, esančio kuro rinklėse. GWd – giga vatai per dieną. 1GWd = 24 milijonai kilovatvalandžių.

4.1 lentelė. Pradiniai duomenys

| | |
|---|---------------|
| Branduolinio kuro išdegimas | 45 GWparų/tU* |
| Atominės elektrinės naudingumo koeficientas | 34,2 % |
| Reaktoriaus galia (ABWR) | 1350 MW |
| Įsodrinimas | 3,6 % |

* Kuro išdegimo tobulinimo evoliucija iki 45 GWparų/tU pateikiama 6 Priede.

Gautieji rezultatai, eiliškumo tvarka, su tam tikrame ciklo etape susidarantiomis atliekomis ir į kitą etapą keliaujančiu gaminiu kiekiu pateikiami 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Branduolinio kuro ciklas iki atominės elektrinės (sudaryta autoriaus remiantis gautais rezultatais [12])

Gauti rezultatai apibendrinami ir pateikiami 4.2 lentelėje. Lentelėje apibendrinama branduolinio kuro ciklo eiga, nuo urano rūdos kasimo iki per metus pagamintos elektros energijos kiekio. Matomi kiekiai, kokiuose procesuose ir kiek nuostolių yra patiriama, kiek pagaminama produkto tinkančio kitam perdirdimo etapui, kokie atliekų kiekiai susidaro kiekviename etape.

4.2 lentelė. Skaičiavimų rezultatai

| | |
|--|-------------------------|
| 1. Urano rūdos kasimas. Atliekant skaičiavimus daroma prielaida, kad urano rūda yra iškasama atvirose arba požeminėse kasyklose, gaunama: | |
| • Uolienos atliekų | 681782,5 t |
| • Urano rūdos | 136356,5 t |
| • Urano kiekis | 272,7130 t |
| 2. Urano malūne, urano rūda turi būti sukonzentruojama iki U_3O_8 – kitaip dar žinomo geltonojo kekso pavadinimu. Urano rūda sutrupinama ir paverčiama milteliais, kurie vėliau kepinami, siekiant pašalinti organines medžiagas (anglis). Vėliau apdorojama šarminio išplovimo, joninių mainų ar tirpiklio ekstrakcijos būdu [16]. Šio proceso metu susidaro šios atliekos: | |
| • Kietojo pavidalo atliekų | 136048,5 t |
| • Urano koncentruotų miltelių U_3O_8 | 307,9593 t |
| • Urano kiekis | 261,1499 t |
| 3. Urano izotopų separacijos procesuose, kaip žaliavinė medžiaga naudojamas urano heksafluoridas, todėl prieš sodrinant uraną, geltonasis keksas (U_3O_8) turi būti paverstas į urano heksafluoridą (UF_6). Kambario temperatūroje UF_6 yra kietos būsenos. Urano konversija galima atlikti dvejais būdais, kuomet naudojamas sausas arba šlapias U_3O_8 [16]. Šio proceso problema yra ta, kad pasaulyje yra tik keli konversijos paslaugų tiekėjai, todėl nesklaidumai vienoje gamykloje sukeltų didelę riziką tiekimo užtikrinimui [17]. Proceso metu atliekant perdirdimą, gaunama: | |
| • Kietųjų atliekų | 181,8909 t |
| • Skystųjų atliekų | 1688,987 m ³ |
| • Urano heksaflorido | UF_6 384,2818 t |
| • Urano kiekis | 259,8442 t |
| 4. Uranas sodrinamas pasirinktu technologiniu metodu iki reikiamos U_{235} koncentracijos. Šiuo atveju iki 3,6%. Urano sodrinimo metu, naudojamas dujinis urano heksafluoridas, kuris turi tik vieną stabilų izotopą F_{919} . Fluoro atominė masė palyginti yra nedidelė, tai jis beveik neturi įtakos urano molekulių difuzijos procesui. Taip pat, UF_6 pasižymi labai svarbia technologine savybe – jis, priklausomai nuo temperatūros ir slėgio, gali būti kietas, skystas arba dujinis. Jo trilypis taškas atitinka 64°C temperatūrą ir ~ 0,15 MPa garų slėgį [16]. Sodrinimo proceso metu, po urano sodrinimo, gaunama: | |
| • Išseiktas urano heksaflorido kiekis | 336,4213 t |
| • Tame kiekyje išseikvota urano | 227,4818 t |
| • Jau prisodrintas urano heksaflorido kiekis | 47,86055 t |
| • Urano kiekis | 32,36241 t |
| 5. Gaminant šiluminius elementus, kaip ir kituose etapuose, šiame etape taip pat netenkama kuro. Urano heksafluoridas paverčiamas urano dioksidu (UO_2) o vėliau gaminami šiluminiai elementai. Imant konkrečiai “Hitachi-GE” ABWR reaktorių, jam kuras gali būti gaminamas Ispanijoje, JAV arba Japonijoje. Tačiau visada galima licenzijuoti ir pradėti naudoti trečiųjų šalių branduolinį kurą, kuris gaminamas bendrovių “AREVA” arba “Westinghouse” gamyklose [17]. Kuro gamykloje liekantys kiekiai: | |
| • Kietųjų atliekų | 16,01939 m ³ |
| • Skystųjų atliekų | 288,3491 m ³ |

| | |
|--|--------------|
| • Urano dioksido, UO ₂ | 36,34584 t |
| • Urano kiekis | 32,03879 t |
| 6. Pagamintos energijos kiekis priklauso nuo reaktoriaus technologijų efektyvumo, urano išdegimo lygio. Gaunama kiek reikės sunaudoti kuro, kad pagaminti tam tikrą kiekį energijos, pagal ABWR reaktoriaus galią: | |
| • Kuro panaudota elektros gamybai | 36,34584 t |
| • Reaktoriaus galia | 1,35 GW |
| • Elektros energijos pagamins per metus | 11833,85 GWh |

Turint šiuos duomenis nesunkiai galima apskaičiuoti kiek UO₂ įsodrinto iki 3,6 % reikės elektros gamybai per vieną ABWR reaktoriaus projektinį kampanijos laiką, kuris trunka 2 metus;

$$\text{Kampanijos laikas} = \text{kuras reikalingas per metus} * 2 \quad (4.1)$$

$$\text{Kampanijos laikas} = 36,34584 * 2 = 72,69168 \text{ t.}$$

Toliau apskaičiuojama koks kiekis būtų panaudotas kuro, elektros gamybai, jeigu reaktorius dirbtų visą deklaruojamą projektinį laiką, tai yra 60 metų:

$$\text{Projektinis laikas}_{60\text{metų}} = 60 * 72,69168 / 2 = 2180,7504 \text{ t.}$$

Analogiškai atliekami skaičiavimai ir visiems likusiems etapams, gauti rezultatai pateikiami 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Gauti rezultatai (sudaryta autoriaus)

| Medžiagos | Per kampanijos laiką | Per projektinį laiką (60 metų) |
|--|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Urano rūdos kasimas | | |
| • Uolienos atliekų | 1363565 t | 40906950 t |
| • Urano rūdos | 272713 t | 8181390 t |
| • Urano kiekis | 545,426 t | 16362,78 t |
| 2. Urano malimas | | |
| • Kietojo pavidalo atliekų | 272097 t | 8162910 t |
| • Urano koncentruotų miltelių | 615,9186 t | 18477,558 t |
| • Urano kiekis | 522,2998 t | 15668,994 t |
| 3. Urano konversija | | |
| • Kietųjų atliekų | 363,7818 t | 10913,454 t |
| • Skystųjų atliekų | 3377,974 m ³ | 101339,22 m ³ |
| • Urano heksaflorido | 768,5636 t | 23056,908 t |
| • Urano kiekis | 519,6884 t | 15590,652 t |
| 4. Uranas sodrinamas | | |
| • Išseiktas urano heksaflorido kiekis | 672,8426 t | 20185,278 t |
| • Tame kiekyje išseiktas urano | 454,9636 t | 13648,908 t |
| • Jau prisodrintas urano heksaflorido kiekis | 95,7211 t | 2871,633 t |
| • Urano kiekis | 64,72482 t | 1941,7446 t |
| 5. Šiluminių elementų gamyba | | |
| • Kietųjų atliekų | 32,03878 m ³ | 961,1634 m ³ |

| | | |
|---|--------------------------|--------------------------|
| • Skystųjų atliekų | 576,6982 m ³ | 17300,946 m ³ |
| • Urano dioksido, UO ₂ | 72,69168 t | 2180,7504 t |
| • Urano kiekis | 64,07758 t | 1922,3274 t |
| 6. Pagamintos energijos ir kuro kiekis | | |
| • Kuro panaudota elektros gamybai | 72,69168 t | 2180,7504 t |
| • Pagamins elektros energijos | 23667,7 GWh _e | 710031 GWh _e |

4.2. Energijos suvartojimo ir CO₂ dujų išmetimo į aplinką balanso skaičiavimas

Toliau atliekami skaičiavimai siekiant išsiaiškinti kokie energijos kiekiai yra reikalingi kiekvienam branduolinio kuro ciklo etapui, taip pat kokie CO₂ teršalų kiekiai yra išmetami į aplinką. Tai išplėstiniai pirmoje dalyje atliktų branduolinio kuro medžiagų balanso skaičiavimai. Skaičiuoklė, kaip ir ankstesniame skaičiavime naudoja šias prielaidas, kad uranas yra išgaunamas atviruoju (karjeriniu) arba požeminiu (šaktiniu) būdu. 4.4. lentelėje pateikti gautieji duomenys, kiek suvartojama energijos branduolinio kuro gamybai, pradedant nuo urano rūdos iškasimo ir baigiant šiluminių elementų gamyba. Taip pat pateikiami gautieji CO₂ dujų išmetimo į aplinką kiekiai, kiekvienam procesui, bei kokie bendri. Norint pagaminti 11833,85 GWh elektros energijos per metus AE su ABWR, branduolinio kuro ciklo etapuose yra sunaudojama gana daug iškastinio kuro (dyzelio, gamtinių dujų).

4.4 lentelė. Energijos suvartojimas ir CO₂ išmetimas į aplinką kiekvieno proceso metu.

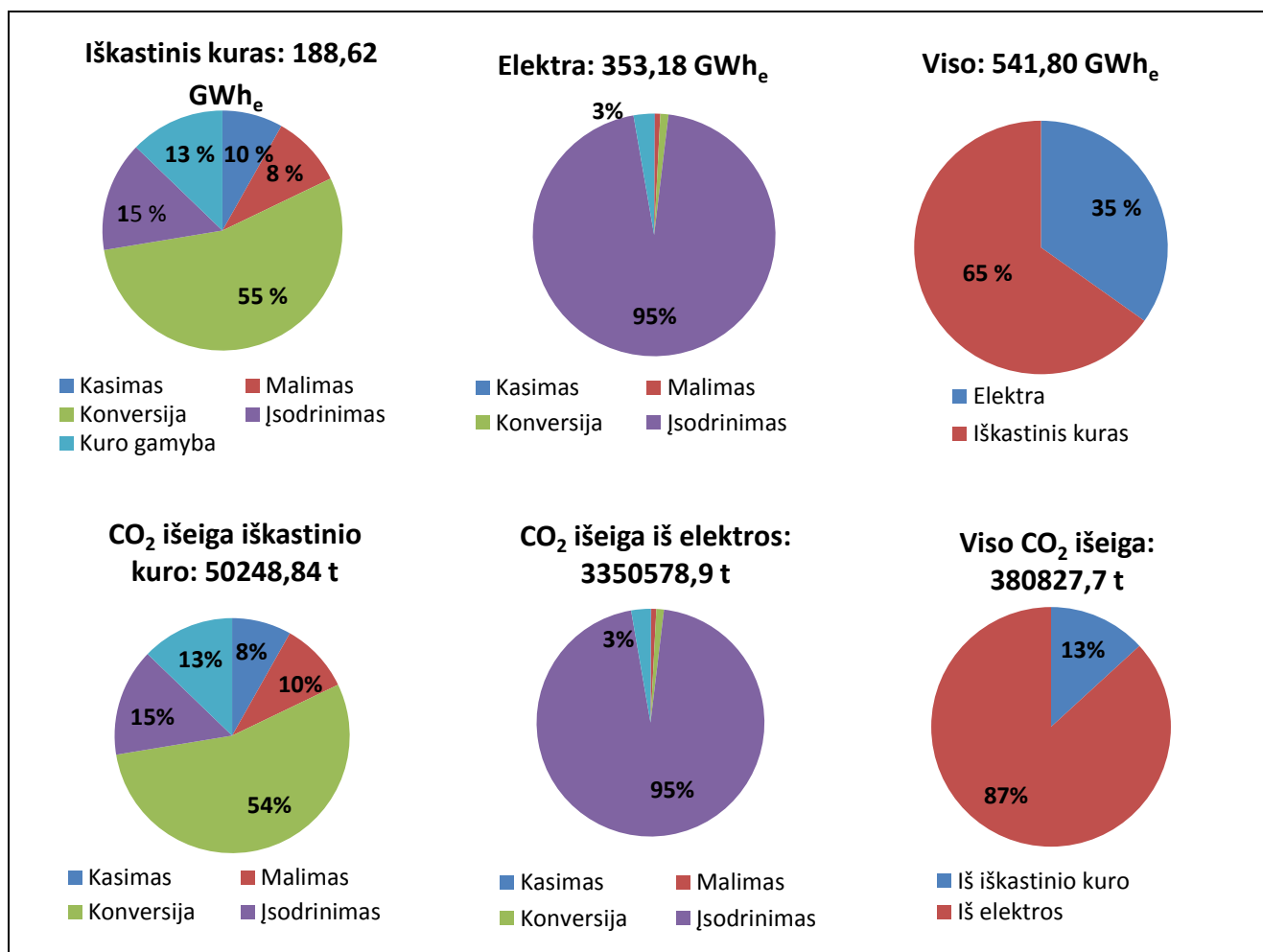
| Branduolinio ciklo etapas | Energijos suvartojimas | | | CO ₂ išmetimas | | |
|---------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|-------------|----------|
| | Iškastinis kuras | | Elektra | Iš iškastinio kuro | Iš elektros | Iš viso |
| | [TJ] | =[GWh _e] | [GWh _e] | [t] | [t] | [t] |
| Kasimas | 55,49 | 15,41 | 0,36 | 4106,78 | 342,05 | 4448,83 |
| Malimas | 65,86 | 18,29 | 2,54 | 4873,65 | 2373,91 | 7247,56 |
| Konversija | 370,28 | 102,85 | 3,81 | 27400,57 | 3565,52 | 30966,09 |
| Sodrinimas | 100,61 | 27,95 | 336,83 | 7445,14 | 315273,9 | 322719,1 |
| Kuro gamyba | 86,79 | 24,11 | 9,64 | 6422,69 | 9023,48 | 15446,17 |
| Viso: | 679,04 | 188,62 | 353,18 | 50248,84 | 330578,9 | 380827,7 |

Gauti duomenys apibendrinami ir pateikiami medžiagų balanso srauto diagramose (4.3 pav). Analizuojant gautus duomenis, matyti, kad didžiausias iškastinio kuro kiekis (dyzelis, gamtinės dujos) yra sunaudojamas urano rūdos konversijos proceso metu, o elektros energijos - sodrinimo metu, analogiškai pasiskirsto ir CO₂ išmetimas į aplinką.

Taip yra, nes konversijos procese naudojami įvairūs chemikalai ir šiluminė energija, todėl sunaudojama daug iškastinio kuro šiluminiai energijai gaminti, ko pasekoje į aplinką išmetamas didžiausias kiekis CO₂ su išmetamais dūmais.

Urano heksofluorido sodrinimas yra gana sunkus mokslinis ir inžinerinis uždavinys, įprastiniai cheminiai izotopų atskyrimo metodai uranui yra netinkami, todėl esant sudėtingoms

sąlygomis, proceso metu sunaudojama daugiausiai elektros energijos lyginant su kitais branduolinio kuro ciklo etapais. [16]



4.3 pav. Medžiagų balanso srauto diagrama

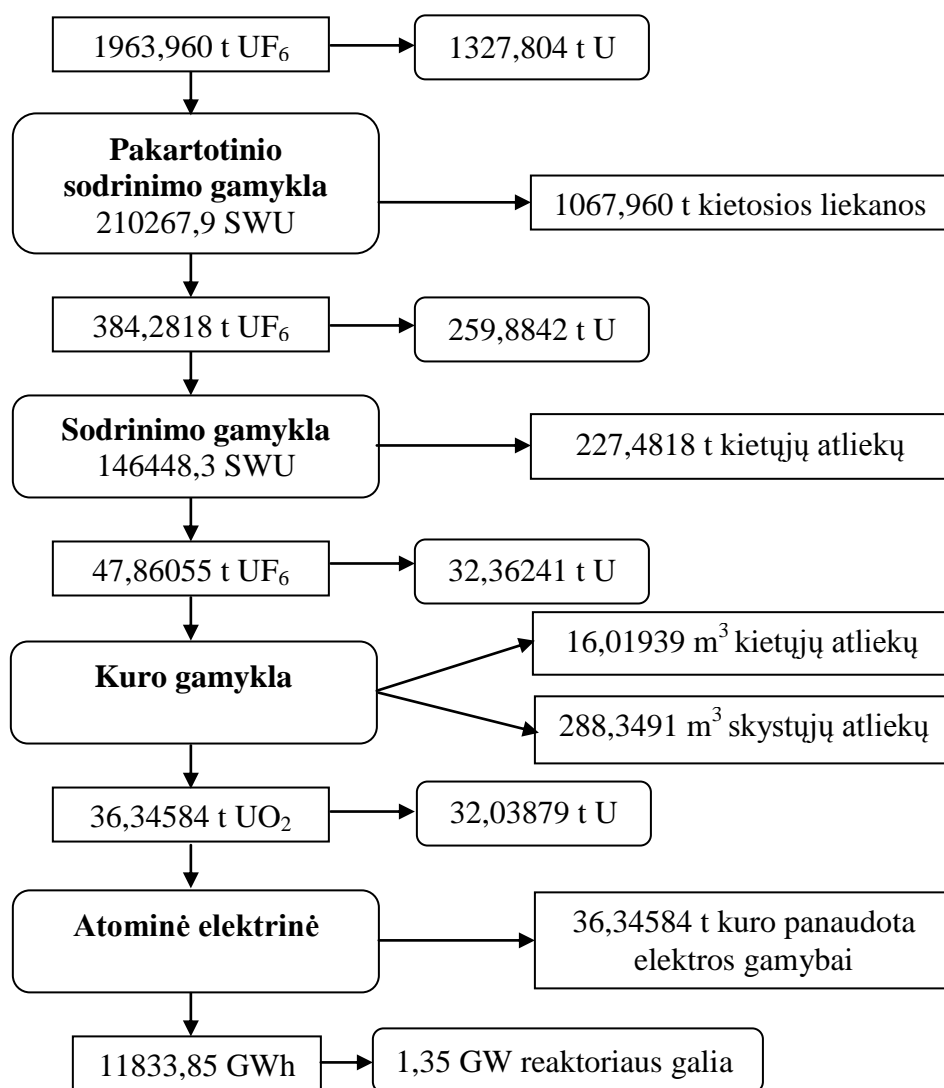
Branduolinėje energetikoje CO₂ teršalų išmetimas į aplinką, galima sakyti, vyksta tik branduolinio kuro išgavimo ir gamybos etapuose, kadangi procesams yra reikalingas papildomas iškastinis kuras ir elektra. Pati atominė elektrinė beveik neišskiria CO₂ dujų, todėl statant Lietuvoje atominę elektrinę su ABWR tipo reaktoriumi, būtų galima pasiekti aukštus Europos sąjungos keliamus aplinkos apsaugos reikalavimus.

4.3. Energijos suvartojimo iš pakartotinai sodrinant nuskurdinto UF₆ ir CO₂ išmetimo į aplinką balanso skaičiavimas

Sekančiu branduolinio kuro ciklo skaičiavimu, skaičiuoklės pagalba, apskaičiuojama kokie energijos kiekiai yra reikalingi tokio pat tipo ABWR reaktoriui, darant prielaidą, kad panaudotas uranas iš naujo yra sodrinamas, taip pat kokie CO₂ kiekiai išmetami į aplinką. Apskaičiuojama kiek gaunama natūraliam tolygaus urano, geltonojo kekso, kiek susidaro skystųjų ir kietųjų atliekų skirtinguose etapuose, kiek galutinai pagaminama kuro, kurį galima naudoji atominėje elektrinėje, gauti rezultatai schematiškai pateikiami 4.4 paveiksle.

Pakartotinio sodrinimo metu, gaunamas natūraliam tolygus uranas angl. (natural – equivalent uranium), kuris vėliau yra sodrinamas ir naudojamas lengvojo vandens reaktoriuose, tokiuose kaip verdančio ar suslėgto vandens reaktoriuose.

Skirtingiems branduolinio ciklo etapams, specifinis elektros energijos suvartojimas yra įvertinamas naudojant separavimo darbo vienetus (Separative Work Unit - SWU). Separavimo darbas - separavimų skaičius sodrinimo procese, tai yra funkcija priklausanti nuo maitinimo linija tiekiamo urano koncentracijos, sodrinimo išėigos ir nuskurdintų atliekų. Separavimo darbas nėra energija. Tokia pati separavimo darbo suma, gali sunaudoti skirtingus energijos kiekius, priklausomai nuo separavimo technologijos efektyvumo.



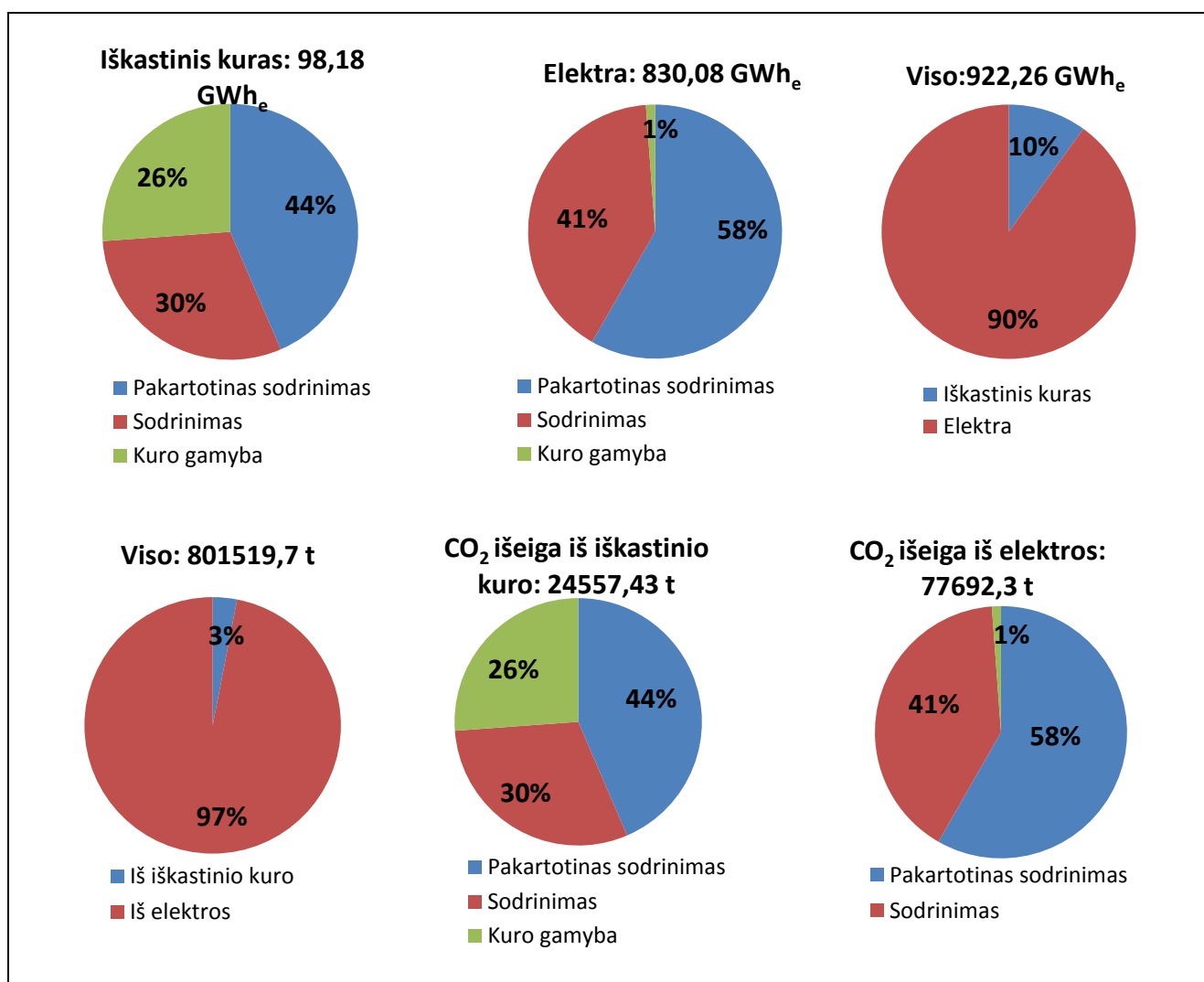
4.4 pav. Branduolinio kuro ciklas pakartotinai sodrinant uraną (sudaryta autoriaus remiantis gautais rezultatais [12])

4.5 lentelėje pateikti duomenys, kiek suvartojama energijos kuro gamybai, kuomet kuro ciklas prasideda nuo pakartotino sodrinimo. Taip pat pateikiama kokia CO₂ išėiga, kiekvieno proceso metu, bei kokia bendra.

4.5 lentelė. Energijos suvartojimas pakartotinai sodrinant uraną ir CO₂ išeiga kiekvieno proceso metu.

| Branduolinio ciklo etapas | Energijos suvartojimas | | | CO ₂ išmetimas | | |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|-------------|-----------|
| | Iškastinis kuras | | Elektra | Iš iškastinio kuro | Iš elektros | Iš viso |
| | [TJ] | =[GWh _{th}] | [GWh _e] | [t] | [t] | [t] |
| Pakartotinis sodrinimas | 144,45 | 40,13 | 483,62 | 10689,6 | 452664,8 | 4633554,4 |
| Sodrinimas | 400,61 | 27,94 | 336,83 | 7445,14 | 315273,9 | 322719,1 |
| Kuro gamyba | 86,79 | 24,11 | 9,64 | 6422,69 | 9023,48 | 15446,17 |
| Iš viso: | 331,85 | 92,18 | 830,08 | 24557,43 | 776962,3 | 801519,7 |

Duomenys susistemunami ir apdorojami MS „Excel“, sudaromos diagramos 4.6 pav. Pakartotinio sodrinimo metu ciklas prasideda nuo pakartotinio sodrinimo, šiame procese ir yra išnaudojama didžiausias kiekis iškastinio kuro ir elektros energijos. Analogiškai pasiskirsto ir CO₂ teršalų išmetimas į aplinką.



4.5 pav. Medžiagų balanso srauto diagrama

4.4. Branduolinio kuro kainos apskaičiavimas

Toliau naudojantis skaičiuokle, atliekami branduolinio kuro kainos skaičiavimai, norint sužinoti kiek kainuos kuras vienai kilovatvalandei pagaminti. Užsiduodami analogiškai pradiniai parametrai, kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose. Gauti kainos duomenys toliau bus naudojami 5 skyriuje.

Skaičiuoklė atlieka branduolinio kuro kainos skaičiavimus, įvertinant branduolinio kuro rinkos ir būsimo atliekų tvarkymo kainas. Kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose, šiame etape, taip pat, skaičiuoklė naudoja tam tikras prielaidas:

1. Praturtintas uranas perkamas rinkoje, kuris skirtas naudoti lengvojo vandens reaktoriams, tai suslėgto arba verdančio vandens reaktoriui.
2. Šiems reaktoriams skirtas kuras gaminamas iš gamtinio urano.
3. Panaudotas branduolinis kuras konservuojamas arba laidojamas kapinynuose, skaičiuoklė neskaičiuoja, kad kuras gali būti perdirbamas.

Sekantys parametrai, kuriuos reikia užsiduoti, tai branduolinio kuro ciklo etapų kainos (4.6 lentelė). Skaičiavimuose naudojamos kainos, kurios yra atnaujintos 2015 m. sausio 1 dieną.

4.6 lentelė. Branduolinio kuro ciklo kainos parametrai

| Branduolinio ciklo etapas | Rinkos kaina € | Būsimoji atliekų tvarkymo kaina € |
|-------------------------------|----------------------|--|
| Natūralus uranas | 73,92 už kg U_3O_8 | 18,96 už kg pagaminto U_3O_8 |
| Konversija | 7,58 už kg U | 0 |
| Sodrinimas | 83,40 už SWU | 9,48 už kg likutinio U |
| Kuro gamyba | 435,94 už kg U | 0 |
| Panaudotas kuras | 0 | 0 |
| Panaudotas branduolinis kuras | 0 | 796,06 už kg panaudoto branduolinio kuro |

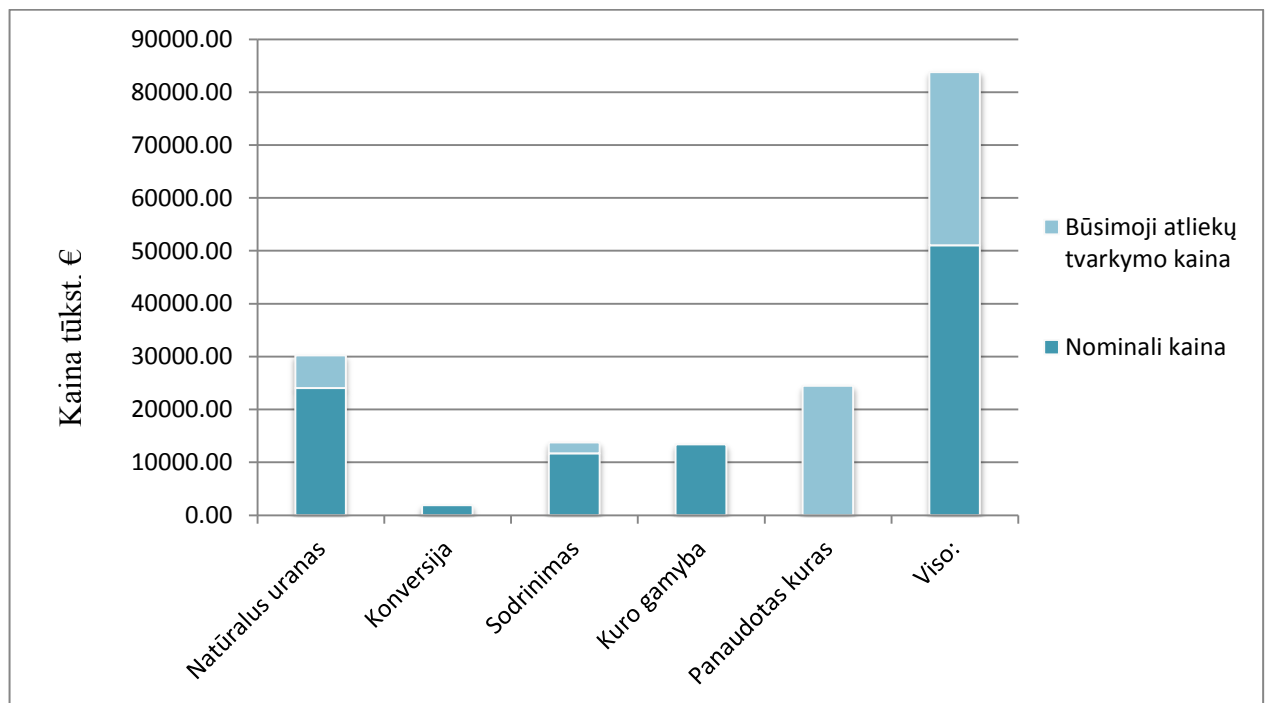
Rezultatuose pateikiama kaina, kurioje matomos išlaidos ne tik kuro ruošimui, bet ir išlaidos patiriamos dėl panaudoto kuro saugojimo ir galiausiai laidojimo, kurios reikalingos 1350 MW reaktoriui, pagaminti 11833,85 GWh elektros energijos per metus (4.7 lentelė).

4.7 lentelė. Branduolinio kuro ruošimo kainos visuose branduolinio kuro ciklo etapuose

| Branduolinio ciklo etapas | Rinkos kaina tūkst. € | Būsimo atliekų tvarkymo kaina tūkst. € | Viso tūkst. €: |
|---------------------------|-----------------------|--|----------------|
| Natūralus uranas | 24071,43 | 6172,16 | 30243,59 |
| Konversija | 1899,27 | 0 | 1899,27 |
| Sodrinimas | 11715,86 | 2068,02 | 13783,88 |
| Kuro gamyba | 13398,04 | 0 | 13398,04 |
| Tarpinė suma | 51084,60 | 8240,18 | 59324,78 |
| Panaudotas kuras | 0 | 24465,98 | 24465,98 |

| Branduolinio ciklo etapas | Rinkos kaina tūkst. € | Būsimo atliekų tvarkymo kaina tūkst. € | Viso tūkst. €: |
|---------------------------|-----------------------|--|----------------|
| Viso: | 51084,60 | 32706,16 | 83790,76 |

Apibendrinant skaičiavimus pateikiama sudėtinės kainos diagrama 4.7 pav., kurioje matyti būsimoji atliekų tvarkymo kaina, kuri susidarys ne visuose branduolinio kuro ciklo etapuose ir branduolinio kuro rinkos kaina atskiruose etapuose. Diagramoje nurodyti branduolinio kuro ciklo etapai, kuriuose gaunama branduolinių atliekų t.y. gavyba, konversija, išodrinimas, kuro gamyba, kuro saugojimas.



4.6 pav. Sudėtinės kainos diagrama (sudaryta autoriaus remiantis gautais rezultatais [12])

Analizuojant gautus duomenis, galima daryti išvadą, kad panaudoto branduolinio kuro saugojimo išlaidos sudaro apie trečdali bendros branduolinio kuro ciklo kainos. Konversijos ir kuro gamybos etapuose, nesusidaro atliekų, kurios turėtų būti saugomos ir joms reikėtų papildomų kaštų. Branduolinio kuro ciklo brangiausias etapas yra natūralaus urano išgavimas (U_{nat}).

5. AE SU ABWR EKONOMINIAI SKAIČIAVIMAI

Branduolinė energetika, lyginant su kitomis energetikos sritimis, pasižymi didelėmis pradinėmis kapitalinėmis investicijomis, gana ne trumpu statybos terminu ir šiais laikais labai ilgu, iki 60 metų reaktoriaus eksploataciniu laikotarpiu. Atominių elektrinių statybos kainą daugiausiai lemia pasirinktas reaktorius ir jo technologija, tai pat atominės elektrinės projekto individualumas. Gaminamos elektros energijos kainą atominėse elektrinėse, daugiausiai nulemia branduolinio kuro, priežiūros ir eksploataavimo kainos. Kaip matyti iš 4.4 poskyryje atliktų branduolinio kuro ciklo

kainos skaičiavimų, į kuro kainą įskaičiuojama pradinių etapų (urano išgavimo, smulkinimo, konversijos, sodrinimo, kuro gamybos) ir galutinių kuro etapų (panaudoto kuro transportavimo, saugojimo, perdirbimo, laidojimo) sąnaudos.

Darbe atliekami ekonominiai skaičiavimai, kad preliminariai būtų galima įvertinti pilną atominės elektrinės su ABWR reaktoriumi statybos kainą Lietuvoje, bei kitus ekonominius parametrus. Pradiniai duomenys pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Pradiniai duomenys

| | |
|--|--------------|
| 1 kW statybos kaina | 2896,20 €/kW |
| Reaktoriaus elektrinė galia | 1350 MW |
| UO ₂ kiekis rinklėje (įsodrinimas 3,6%) | 183 kg |

Toliau atliekami skaičiavimai, siekiant sužinoti kokia bus bendra atominės elektrinės statybos kaina, €.

ABWR reaktoriaus projektinė elektrinė galia 1350 MW = 1350000 kW. Remiantis Japonijoje vykdytais ABWR ir US-AP1000 projektais [27], galima daryti prielaidą, kad vieno jėgainės kilovato momentiniai statybos kaštai turėtų būti apie 2896,20 €/kW. Tuomet šios jėgainės su ABWR prognozuojama statybų kaina bus:

$$K_{statybos} = kW \cdot el. \text{ galia} ; \quad (5.1)$$

$$K_{statybos} = 2896,20 \cdot 1350000 = 39 \cdot 10^8 = 3,9 \text{ mlrd./€}.$$

Toks skaičiavimas yra paremtas dviejų blokų statybos rezultatais, kas gali sąlygoti iki 20 proc. [27] mažesnius bendrus kaštus per instaliuotą galios kilovatą, lyginant su vieno reaktoriaus projektais. Taigi, patikslinus skaičiavimus, vieno bloko ABWR projektui, gaunama:

$$K_{statybos} = 3475,44 \cdot 1350000 = 47 \cdot 10^8 = 4,7 \text{ mlrd./€}$$

Gauta statybos kaina palyginama su „Visagino atominės elektrinės projekto pagrįstumo vertinimu“ [31], kurią atliko Ūkio ministerija (trys nepriklausomi oponentai atliko atominės elektrinės kainos vertinimą, kurių kainos svyruoja nuo 4,9 mlrd. € iki 6,0 mlrd. €), gauta kaina yra artima kitų šaltinių atliktiems skaičiavimams.

Apskaičiuojama kiek elektros energijos reaktorių pagamins per vieną parą, priimama, kad 95 % (optimistinis scenarijus) laiko paroje, reaktorių dirbs pastoviu maksimaliu režimu:

$$E_{paros} = 24 \cdot P \cdot 0,95 = 24 \cdot 1350000 \cdot 0,95 = 30,78 \text{ GWh}. \quad (5.2)$$

Per pilną deklaruojamą ABWR eksploatacijos laikotarpį (60 metų) pagamins elektros energijos (60 metų turi 21915 dienų):

$$E_{pagamins}^{60} = E_{paros} \cdot 21915 = 30,78 \cdot 21915 = 674543,7 \text{ GWh}. \quad (5.3)$$

Per vienerius metus vidutiniškas pagamintos elektros kiekis (kWh), bus:

$$E_{metinis} = P \cdot T; \quad (5.4)$$

kur: P – pagamintas elektros energijos kiekis, kW; T – metinis reaktoriaus darbo laikas valandomis, h .

Reaktoriaus darbo faktoriui didžiausią įtaką turi jo veikimo laikas iki kuro perkrovimo, bei pati perkrovimo trukmė. ABWR perkrovimo periodas siekia nuo 18 iki 24 mėn., per vieną reaktoriaus kuro perkrovimą jis stovės nuo 2 iki 3 savaitių, todėl daroma prielaida, kad 95% (optimistinis scenarijus) laiko metuose reaktorius dirbs pastoviu maksimaliu režimu, o tai sudarytų 8322 valandas. Tai yra optimistinės prognozės, kadangi reaktoriaus mažesnį darbo faktorių gali lemti įvairūs gedimai, (pavyzdžiui gedimai šilumokaičiuose ar pačiame reaktoriaus viduje) ko pasekoje bus mažinama reaktoriaus galia.

Apskaičiuojamas metinis ABWR pagamintos elektros energijos kiekis:

$$E_{metinis} = 1350000 \cdot 8322 = 11234700000 \text{ kWh} = 11234,70 \text{ GWh} = 11,23 \text{ TWh}. \quad (5.5)$$

Ketvirtoje dalyje atlikus skaičiavimus su „The Wise uranium Project calculator“ skaičiuokle gauta, kad metinė elektros energijos gamyba bus 11833,85 GWh. Nesutapimai gaunami, nes skaičiuoklė atliko skaičiavimus darydama prielaidą, kad 100% laiko metuose reaktorius dirbs pastoviu maksimaliu režimu, t.y., 8760 valandų per metus. Taigi, darant prielaidą su „The wise uranium Project calculator“ atliktiems skaičiavimams, kad reaktorius taip pat dirbs 95% (optimistinis scenarijus) laiko metuose pastoviu maksimaliu režimu, gaunama: $11833,85 \cdot 95\% = 11242,15 \text{ GWh} = 11,24 \text{ TWh}$. Galima teigti, kad skaičiavimai atlikti teisingai.

Priimama, kad vidutinė elektros rinkos kaina 10 €/kWh [33].

Tuomet, per 60 metų, jei kaina nekis, elektrinė už parduodamą elektros energiją uždirbs:

$$uždirbs_{60} = 0,1 \cdot 674,54(\text{TWh}) = 67,45 \text{ mlrd. €} \quad (5.6)$$

Per metus parduodama elektros energiją jėgainė uždirbs:

$$uždirbs_{metinis} = \frac{674,54 \text{ mlrd}}{60} = 1,124 \text{ mlrd. €} \quad (5.7)$$

Prieš atliekant kuro kainos skaičiavimus, atliekami skaičiavimai siekiant sužinoti koks kuro kiekis yra reikalingas pilnam reaktoriaus užkrovimui.

$$M_{pilnas užkrovimas} = N_{rinkl} \times UO_2 \text{ kiekis rinklėje (kg);} \quad (5.8)$$

$$M_{pilnas užkrovimas} = 872 \cdot 183 = 159576 \text{ kg} = 159,58 \text{ t}.$$

Taigi, bendras kuro kiekis pilnam reaktoriaus užkrovimui, bus 159,58 t, per metus reikalingas kuro kiekis bus 79,79 t = 79790 kg.

Apskaičiuojama kuro kaina per vienerius metus, €:

$$S_{kurokaina} = M_{met.} \cdot K_{kuro}; \quad (5.9)$$

$$S_{kurokaina} = 79790 \cdot 1676,60 = 133775914,3.$$

čia: M_{met} – sudegintas kuro kiekis, (kg) per vienerius metus; K_{kuro} – kuro kaina (vieno kg kaina priimama 1676,60 € remiantis šaltiniu [12]).

Per projektinius 60 metų, jei kuro rinkos kaina nepasikeis, AE su ABWR kuras kainuos, €:

$$S_{kuro}^{60} = S_{kurokaina} \cdot 60; \quad (5.10)$$

$$S_{kuro}^{60} = 133775914,3 \cdot 60 = 8026554858.$$

Toliau atliekami skaičiavimai, siekiant apskaičiuoti metinę išlaidų dalį, priklausančią nuo pradinių kapitalinių kaštų, €.

$$S_k = (p_a + p_{rem.} + p_{kitos}) \cdot K_{statybos} = p_{koef.} \cdot K_{statybos}; \quad (5.11)$$

čia: p_a – koeficientas įvertina amortizacinius atskaitymus pilnam objekto atstatymui pasibaigus tarnavimo laikui ir kapitalinius remontus, $p_a = 0,07$; $p_{rem.} = 0,02$ išlaidos smulkiems remontams; $p_{kitos} = 0,025$ papildomos - nenumatytos išlaidos, kurios gali atsirasti eksploatuojant elektrinę, tokios kaip naujų įrenginių pirkimas ar senų modernizavimas.

$$P_{koef.} = P_a + P_{rem.} + P_{kitos}; \quad (5.12)$$

$$P_{koef.} = 0,07 + 0,02 + 0,025 = 0,115.$$

$$S_k = 0,115 \cdot 47 \cdot 10^8 = 540500000$$

Apskaičiuojamas reikalingas personalo kiekis elektrinėje:

$$darbuotojai = 1350 \text{ MW} \cdot 0,25 \frac{\text{žmogus}}{\text{MW}} = 337,5 \approx 338.$$

Reikalinga metinių išlaidų dalis eksploataciniam personalui, €/per metus:

$$S_{atlyginimai} = darbuotojai \cdot A_{vidutinis} \cdot m; \quad (5.13)$$

$$S_{atlyginimai} = 338 \cdot 868,86 \cdot 12 = 3524096,16.$$

čia: $A_{vidutinis}$ – vidutinis darbuotojų darbo užmokestis (priimama, kad atominėje elektrinėje vidutinė žmogaus alga yra 868,86 €), m – mėnesių skaičius metuose.

Įvertinama kitos išlaidos personalui, tokios kaip premijos, kvalifikacijos kėlimo kursai, profesinis parengimas ir t.t.

$$S_{personalui} = (1 + 0,27) \cdot S_{atlyginimai} ; \quad (5.14)$$

čia: p_{pers} – koeficientas įvertinantis kitas išlaidas personalui (priimama 0,27).

$$S_{personalui} = (1 + 0,27) \cdot 3524296,16 = 4475602,123 \text{ €/metai.} \quad (5.15)$$

Taigi, suminės metinės išlaidos bus, €:

$$S_{metinės} = S_{kurokaina} + S_k + S_{personalui} ; \quad (5.16)$$

$$S_{metinės} = 133775914,3 + 540500000 + 4475602,123 = 678751516,4.$$

Apskaičiuojama kokia bus elektros energijos savikaina, ct/kWh

$$S_{savikaina} = \frac{S_{metinės}}{E_{metinės}} ; \quad (5.17)$$

$$S_{savikaina} = \frac{678751516,4}{11234700000} = 0,060 \text{ €/kWh} \approx 6 \text{ ct/kWh}$$

Remiantis šaltiniu [26], atominės elektrinės gaminamos elektros savikaina Lietuvoje turėtų būti 5,21 €ct/KWh.

Apskaičiuojama, koks metinis prieaugis prie paskolos, kai diskonto norma lygi 5% ir 10%.

Kai diskonto norma 5%:

$$suma^{5\%} = 100 \cdot \frac{K_{statybos} + S_{metinės}}{95} ; \quad (5.18)$$

$$suma^{5\%} = 100 \cdot \frac{4,7 \text{ mlrd} + 678,752 \text{ mln}}{95} = 5,662 \text{ mlrd} / \text{€}.$$

Apskaičiuojamas metinis prieaugis:

$$prieaugis^{5\%} = suma^{5\%} - K_{statybos} ; \quad (5.19)$$

$$prieaugis^{5\%} = 5,662 - 4,7 = 961,8 \text{ mln} / \text{€}.$$

Apskaičiuojama palūkanų normą:

$$palukanos^{5\%} = \frac{suma^{5\%} - K_{statybos}}{K_{statybos}} \cdot 100 = 20,46\% . \quad (5.20)$$

Kai diskonto norma 10%:

$$suma^{10\%} = 100 \cdot \frac{K_{statybos} + S_{metinės}}{90} ; \quad (5.21)$$

$$suma^{10\%} = 100 \cdot \frac{4,7 \text{ mlrd} + 678,752 \text{ mln}}{90} = 5,976 \text{ mlrd} / \text{€}.$$

Metinis prieaugis:

$$prieaugis^{10\%} = suma^{10\%} - K_{statybos}; \quad (5.22)$$

$$prieaugis^{10\%} = 5,519 - 4,7 = 1,276 \text{ mlrd. / €}.$$

Palūkanų norma:

$$palukanos^{10\%} = \frac{suma^{10\%} - K_{statybos}}{K_{statybos}} \cdot 100 = 27,15\%. \quad (5.23)$$

Deklaruojama AE statybos trukmė su ABWR reaktoriumi 39 mėnesiai, tačiau priimama, kad elektrinės statybos trukmė bus 48 mėnesiai – 4 metai (įvertinama statybos vėlavimas), taigi tik pradėjus eksploatuoti elektrinę, jiniai pradės atsipirkinėti. Atliekami skaičiavimai siekiant sužinoti per kiek laiko atsipirks elektrinė. Atsipirkimo laikotarpis skaičiuojamas priartėjimo būdu „Microsoft Excel“ programoje. Gaunama, kai diskonto norma 5%, AE pradės atsipirkinėti 19 metais, kai diskonto norma 10%, AE pradės atsipirkinėti 45 metais.

5.2 lentelė. Gauti rezultatai

| Parametras | Rezultatai |
|---|------------------------------------|
| Pilna atominės elektrinės statybos kaina | 47*10 ⁸ € (4,7 mlrd. €) |
| Kuro kaina vieneriems metams | 133775914 € (133,78 mln. €) |
| Kuro kaina projektiniam laikotarpiui | 8026554858 € (8,02 mlrd. €) |
| Metinių išlaidų dalis, priklausanti nuo pradinių kapitalinių įdėjimų | 540500000 € (540,50 mln. €) |
| Metinių išlaidų dalis eksploataciniam personalui | 3524096,16€/metai |
| Kitos išlaidos personalui (premijos, profesinis parengimas, kvalifikacijos kėlimas) | 4475602,123 €/metai |
| Suminės metinės išlaidos | 678751516,4 € (678,75 mln. €) |
| Metinė elektros energijos gamyba | 11234700000 kWh=11234,70 GWh |
| Vienos paros elektros energijos gamyba | 30, 78 GWh |
| Per 60 metų elektros energijos gamyba | 674543,7 GWh |
| Per 60 metų elektrinė uždirbs | 67,45 mlrd. € |
| Per metus elektrinė uždirbs | 1,124 mlrd. € |
| Elektros energijos savikaina | 6ct/kWh |

Analizuojant „Visagino atominės elektrinės verslo planą“ [27] išryškėjo, kad lyginant su galimomis alternatyvomis, nauja atominė elektrinė Lietuvoje yra geriausias pasirinkimas elektros energijai gaminti, nes:

1. Atominės elektrinės elektros energijos savikaina būtų gerokai mažesnė, lyginant su valstybės remiamais elektros energijos gamintojais, gaminant elektrą iš atsinaujinančių elektros energijos šaltinių (vėjo ~ 7,8 €ct / KWh, saulės ~ 33 €ct / KWh [26]).

2. Atominė elektrinė sumažintų didelę priklausomybę nuo importuojamos elektros energijos ir importuojamų dujų elektros energijai gaminti vietiniame energetikos sektoriuje.

3. Elektrinė sumažintų elektros kainos svyravimus, taip pat nebūtų priklausoma nuo vieno kuro tiekėjo.

4. Branduolinė energetika yra patikimas bazinis elektros energijos gamybos šaltinis.

5. Branduolinė elektrinė beveik neteršia aplinkos, t.y., išskiria labai mažai CO₂ dujų. Kaip nustatyta ketvirtame skyriuje, didžiausi CO₂ dujų išmetimai į aplinką vyksta branduolinio kuro ciklo etapuose, o tai nėra labai aktualu Lietuvai.

6. IŠVADOS

1. Mokslinės literatūros pagrindu analizuojant ABWR reaktoriaus technologinius ir saugos parametrus, išryškėjo kad pagrindinius technologijų pasikeitimus įtakojo natūrali BWR reaktoriaus evoliucija ir nuolatiniai tobulinimai. Taip pat didelę įtaką padarė Fukushimoje įvykusi avarija, po kurios didelė saugumo svarba buvo sutelkta į pasyvias aušinimo sistemas ir papildomas – išorinius elektros energijos šaltinius.

2. Siekiant pagerinti BWR reaktoriaus aktyviosios zonos struktūrinį tvirtumą ir didesnę reaktoriaus našumą, buvo atlikta daugybė reaktoriaus vidinių komponentų patobulinimų, kurie supaprastino esamas konstrukcijas.

3. Atlikus verdančio vandens reaktorių uždarymo priežasčių analizę, paaiškėjo, kad dauguma tokio tipo reaktorių buvo uždaryti atidirbę visą projektinį laiką, arba dėl politinių priežasčių. Analizuojant vieninteleles avarijas įvykusias Vokietijoje ir Japonijoje, išryškėjo, kad avarijos įvyko dėl projektinių klaidų ir saugos įrenginių netobulumo, skaudžios pamokos turėjo teigiamos įtakos naujiems ABWR reaktoriams.

4. Pasinaudojant metodika atliktas ABWR reaktoriaus šiluminis skaičiavimas, kuris patvirtina deklaruojamus projektinius tokio tipo reaktoriaus parametrus. Gauta vidutinė aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrovos reikšmė, kartu su šiuolaikinėmis kuro rinklių konstrukcijomis, o taip pat plačiu šilumnešio srauto reguliavimo diapazonu, ABWR reaktoriui garantuoja mažiausią branduolinio kuro poreikį, lyginant su verdančio vandens tipo reaktorais.

5. Išsiaiškinus, jog reaktoriaus aktyviosios zonos charakteristikos gali būti apibūdinamos dviem pagrindiniais parametrais, tai galios tankiu Q ir specifine galia, atlikti skaičiavimai ir palyginimai su PWR tipo reaktoriumi, gauti duomenys: ABWR galios tankis $50 \frac{MW}{m^3}$, PWR galios tankis $112 \frac{MW}{m^3}$. Padaryta išvada, jog esant panašioms šiluminėms galioms, ABWR reaktoriaus korpusas bus gerokai didesnis nei PWR, tačiau mažiau veikiamas slėgio ir mažesnės temperatūros eksploatacijos metu. Atlikti skaičiavimai patvirtina projektinius duomenis.

6. Atlikus ABWR branduolinio kuro ciklo analizę, paaiškėjo, kad visuose branduolinio kuro ciklo etapuose susidaro tam tikras atliekų kiekis. Tokio tipo reaktoriui iškasus 136356,5 t urano rūdos, jau pirmame branduolinio ciklo etape susidaro 681782,5 t uolienos atliekų. 1,35 GW galios reaktorių per metus pagamins 11833,85 GWh elektros energijos, atliekant 5 dalyje ekonominius skaičiavimus, elektros energijos gamybos kiekis gaunamas labai artimas. Atlikus branduolinio kuro kainos skaičiavimus, paaiškėjo, kad brangiausi etapai yra šiluminių elementų gamyba, tai 435,94 € už kg U o būsimosios atliekų tvarkymo brangiausias etapas - panaudoto branduolinio kuro saugojimas: 796,06 € už kg.

7. Atlikus preliminarius ekonominius skaičiavimus, paaiškėjo, kad preliminari jėgainės kaina su ABWR reaktoriumi bus 4,7 mlrd. € (neįvertinant diskonto normos), elektros energijos savikaina bus 6ct/kWh. Per projektinį laikotarpį, t.y., 60 metų, reaktorius turėtų pagaminti 67454,37 GWh elektros energijos (optimistinis scenarijus). AE atsipirkimas turėtų svyruoti nuo 18 iki 45 metų. Lyginant elektros energijos savikainą su atsinaujinančiais elektros energijos šaltiniais (vėjo ~ 7,8 €ct / kWh, saulės ~ 33 €ct / kWh [26]), AE gaminama elektros energijos savikaina yra gerokai mažesnė, be to branduolinė elektrinė beveik neteršia aplinkos, t.y., išskiria labai mažai CO₂ dujų.

7. LITERATŪROS SĄRAŠAS

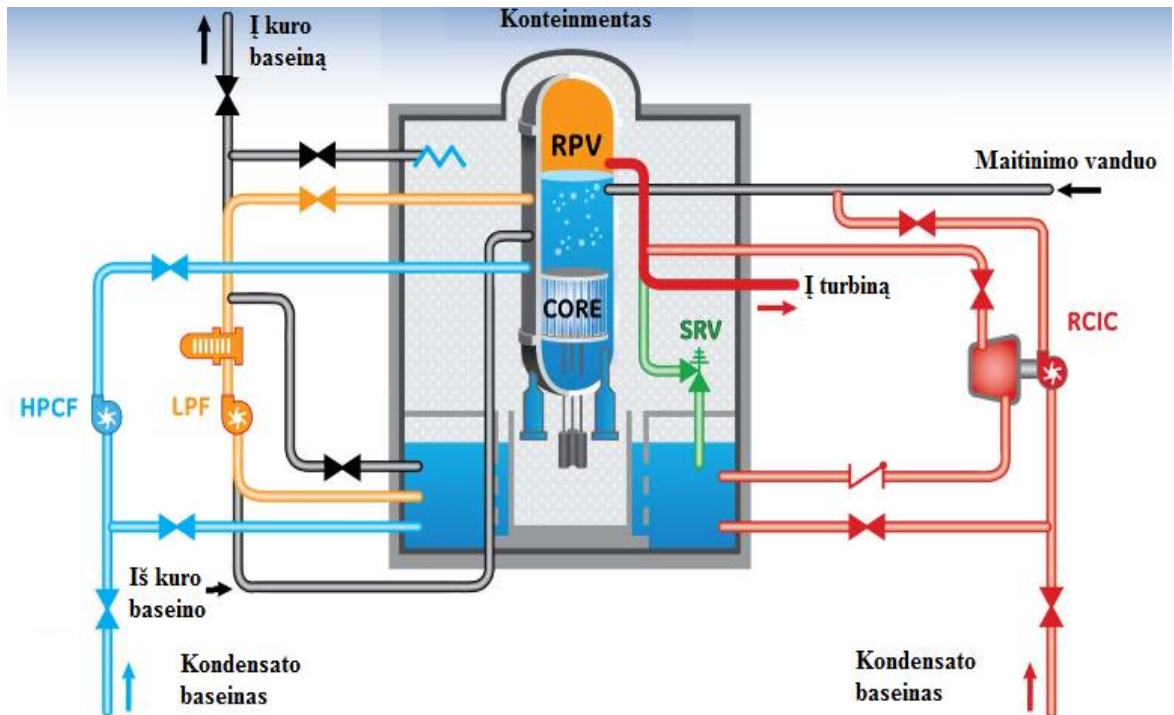
1. ABWR reaktorius, prieiga per internetą: http://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/abwr-ge-hitachi.aspx
2. ABWR reaktoriaus technologijos, prieiga per internetą: http://www.jek.lt/2011/11/ketvirtoji-jek-paskaita-abwr_01.html
3. J. Gylys, Branduolinės inžinerijos įvadas, Kaunas: Technologija, 1997 – 293p.
4. G. Gimbutis, K. Kajutis, V. Krukonis ir kt. Šiluminė technika, Vilnius: Mokslas, 1993 – 333p.
5. A. Drobavičius, J. Garbaravičius, G. Gimbutis, K. Kajutis ir kt. Bendroji šiluminė technika, Vilnius: Mintis, 1974 – 561p.
6. Reactor safety, prieiga per internetą: <http://www.hitachi-hgne-uk-abwr.co.uk/reactor-safety.html>
7. Boiling Water Reactor Power Plant, prieiga per internetą: <http://atominfo.ru/files/fukus/npp2.pdf>
8. Issued Design Certification - Advanced Boiling-Water Reactor (ABWR), prieiga per internetą: <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/abwr.html>
9. Advanced boiling water reactor, prieiga per internetą: <http://www.hitachi-hgne.co.jp/en/download/abwr.pdf>
10. Genesis of ABWR design, prieiga per internetą: http://www.hitachi-hgne-uk-abwr.co.uk/downloads/UKABWR-GA91-9901-0034-00001-REVA_C2a_Public.pdf
11. Benchmark Problem Suite for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels, prieiga per internetą: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/18811248.2002.9715275>
12. „The wise uranium Project calculator”. Prieiga per internetą: <http://www.wise-uranium.org/calc.html>.
13. Gediminas A. Adlis ir d. Adlienė, Branduolinė ir alternatyvi energetika, Kaunas, Technologija, 2013, prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1083/branduoline-ir-alternatyvi-energetika/>
14. ABWR reaktoriaus technologijos, vaizdinė medžiaga, prieiga per internetą: http://www.jek.lt/2011/11/ketvirtoji-jek-paskaita-abwr_01.html
15. Advanced boiling water reactor (ABWR) prieiga per internetą: <http://nusantarabangan.blogspot.com/2010/10/advanced-boiling-water-reactor-abwr.html>
16. J. Gylys, Branduolinio kuro ciklas, Kaunas: Technologija, 1999 – 394p.
17. Visagino atominės elektrinės projektas, prieiga per internetą: http://www.vae.lt/lt/pages/projekto_prielaidos
18. Visagino AE technologija – pažangusis verdančio vandens reaktorius ABWR, prieiga per internetą: http://www.vae.lt/files/apie_visagino_ae_tehnologija.pdf
19. Boiling water reactor power plant, prieiga per internetą: <http://atominfo.ru/files/fukus/npp2.pdf>
20. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, Nuclear systems I thermal hydraulic fundamentals.

21. List of boiling water reactor, prieiga per internetą:
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_boiling_water_reactors
22. Gudremmingen nuclear power plant, prieiga per internetą:
http://en.wikipedia.org/wiki/Gudremmingen_Nuclear_Power_Plant
23. Branduolinė jėgainė, prieiga per internetą:
http://lt.wikipedia.org/wiki/Branduolin%C4%97_j%C4%97gain%C4%97
24. Advanced boiling water reactor, the only generation III + reactor in operation today, prieiga per internetą: <http://www.hitachi-hgne.co.jp/en/download/abwr.pdf>
25. Visagino atominės elektrinės referendumas, prieiga per internetą:
http://www.enmin.lt/lt/activity/veiklos_kryptys/strateginiai_projektai/vae.php?clear_cache=Y_referendumas
26. Svarbiausi faktai ir informacija apie Visagino atominę elektrinę, prieiga per internetą:
http://www.vae.lt/faktai#!/pigisne_savikaina
27. Visagino atominės elektrinės verslo planas, prieiga per internetą:
http://www.vae.lt/files/Visagino_AE_projekto_verslo_planas.pdf
28. Pasirinkta Visagino AE technologija – pažangusis ABWR reaktorius, prieiga per internetą:
<http://www.mokslasirtechnika.lt/mokslo-naujienos/pasirinkta-visagino-ae-technologija-pazangusis-abwr-reaktorius.html>
29. Reaktorių gamybos kartos, prieiga per internetą:
http://www.vae.lt/lt/pages/pagal_reaktoriu_gamybos_kartas
30. ABWR design control document, prieiga per internetą:
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1112/ML11126A105.pdf>
31. Visagino atominės elektrinės projekto pagrįstumo vertinimas, prieiga per internetą:
<http://www.ukmin.lt/uploads/documents/VAE/Visagino%20atomin%C4%97s%20elektrin%C4%97s%20projekto%20pagr%C4%AFstumo%20vertinimas%20%C5%AAkio%20ministerija.pdf>
32. Safety, constructability, and operational performance of the ABWR and ESBWR designs, prieiga per internetą: http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-06-24-06-28-TM-NPTD/17-ge_hitachi.pdf
33. Elektros energijos tarifai, prieiga per internetą: <http://www.lesto.lt/lt/privatiems/elektros-energijos-kainos-ir-tarifu-planai/elektros-energijos-kainos-eurais-2015.html>
34. Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2011 m. gegužės 25 d. Nutarimas Nr. 591 dėl Nacionalinės energetikos (energetinės nepriklausomybės), prieiga per internetą: <http://www.enmin.lt/lt/nes/2.pdf>
35. Ištrauka iš Konsorciumo Poyry Energy Oy – Lietuvos energetikos institutas atlikto darbo „Nauja atominė elektrinė Lietuvoje – Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita, prieiga per internetą:
<http://www.elektroklubas.lt/archyvas/pdf/2008/AE%20reaktoriu%20apzv.pdf>

36. H. Soneda, Y. Iwata, M. Ebisuya, BWR Core and Fuel Development for Highly-economical Power Generation, prieiga per internet: http://www.hitachi.com/rev/pdf/2009/r2009_02_104.pdf

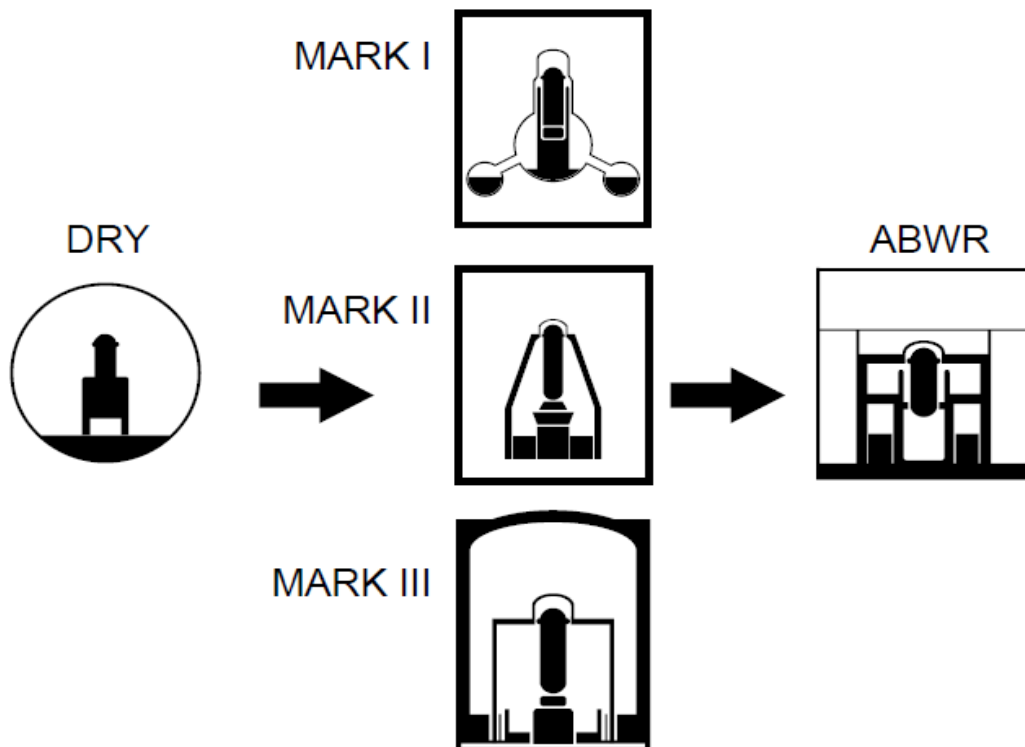
8. PRIEDAI

8.1. 1 Priedas



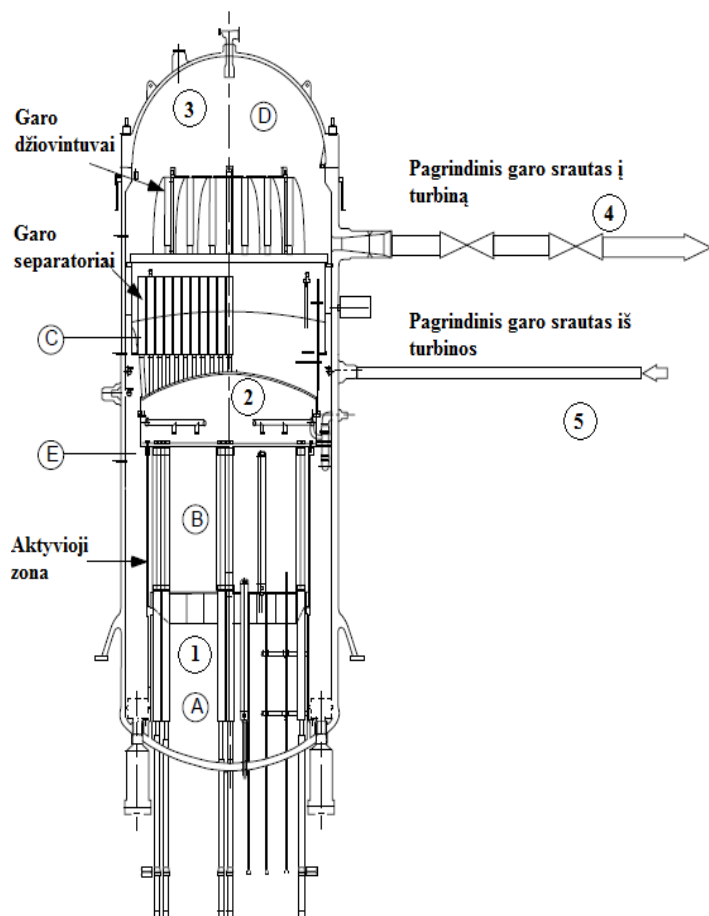
8.1 pav. Reaktoriaus avarinio aušinimo sistema [32].

8.2. 2 Priedas



8.2 pav. BWR reaktoriaus apsauginio kevalo evoliucija iki ABWR [24].

8.3. 3 Priedas

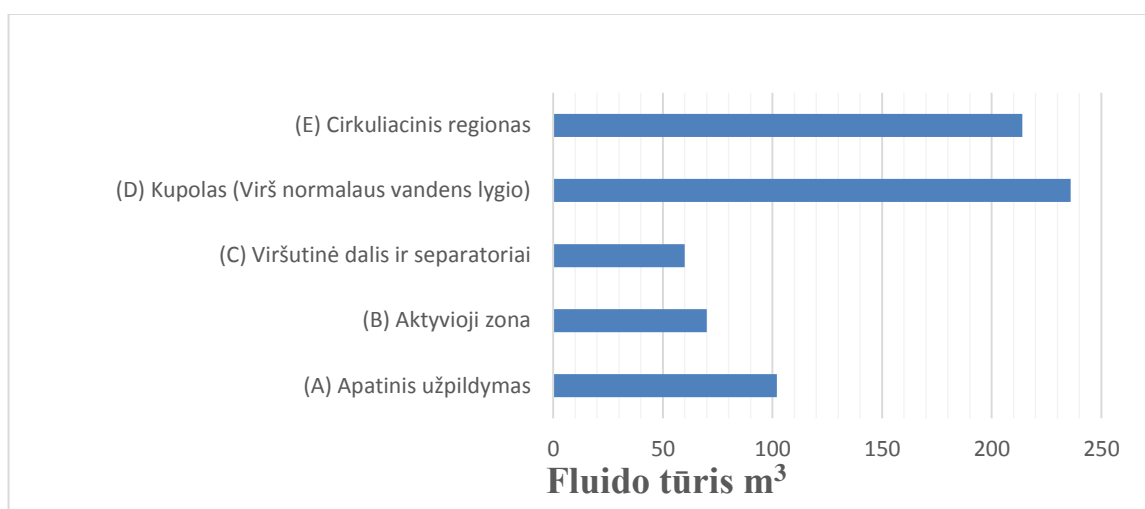


8.3 pav. ABWR reaktoriaus schema [30]

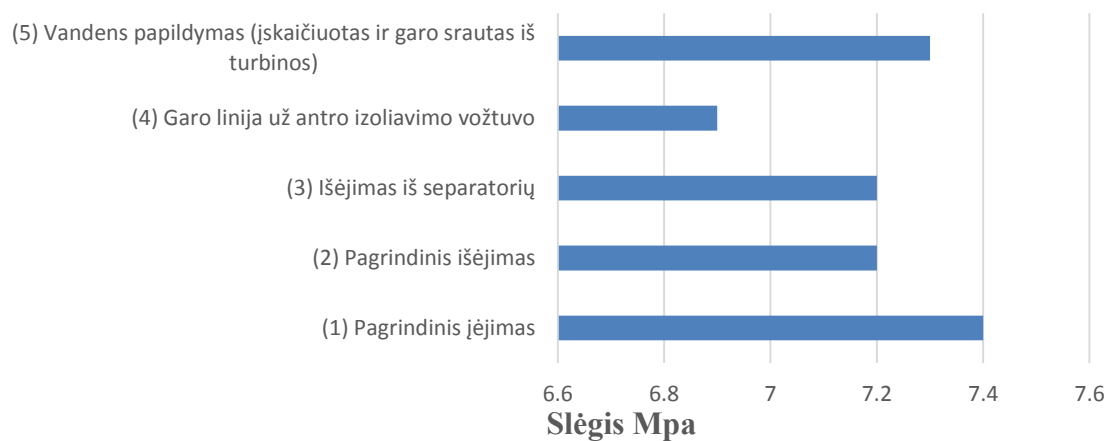
8.1. lentelė. ABWR fluído, slėgio, debito, temperatūros, entalpijos pasiskirstymas reaktoriuje, nominaliomis veikimo sąlygomis [30]

| ABWR aušinimo apimtys | | Nominalios ABWR veikimo sąlygos | | | | |
|--|--------------------------------|-------------------------------------|--------------|----------------------|------------------|-------------------|
| | Fluído tūris (m ³) | | Slėgis (Mpa) | Debitas (kg/h) | Temperatūra (°C) | Entalpija (kJ/kg) |
| (A) Apatinis užpildymas | 102 | (1) Pagrindinis įėjimas | 7,4 | 52,2x10 ⁶ | 278 | 1227 |
| (B) Aktyvioji zona | 70 | (2) Pagrindinis išėjimas | 7,2 | 52,2x10 ⁶ | 288 | 1500 |
| (C) Viršutinė dalis ir separatoriai | 60 | (3) Išėjimas iš separatorių | 7,2 | 7,64x10 ⁶ | 287 | 2770 |
| (D) Kupolas (Virš normalaus vandens lygio) | 236 | (4) Garo linija už antro izoliavimo | 6,9 | 7,64x10 ⁶ | 285 | 2770 |

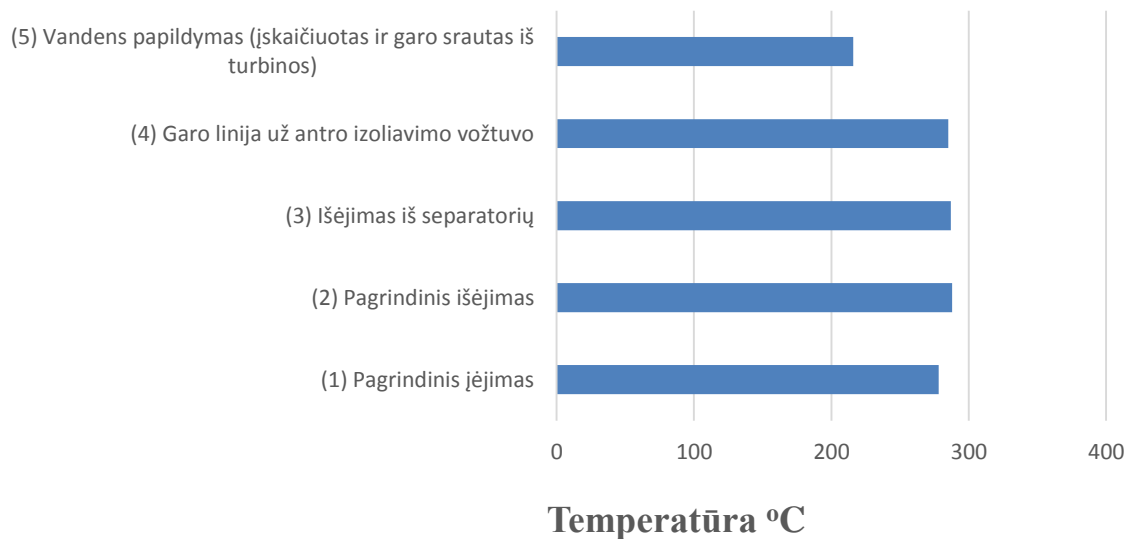
| ABWR aušinimo apimtys | | Nominalios ABWR veikimo sąlygos | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---|--------------|----------------------|------------------|-------------------|
| | Fluido tūris (m ³) | | Slėgis (Mpa) | Debitas (kg/h) | Temperatūra (°C) | Entalpija (kJ/kg) |
| | | vožtuvo | | | | |
| (E) Cirkuliacinis regionas | 214 | (5) Vandens papildymas (įskaičiuotas ir garo srautas iš turbinos) | 7,3 | 7,78x10 ⁶ | 215 | 926 |



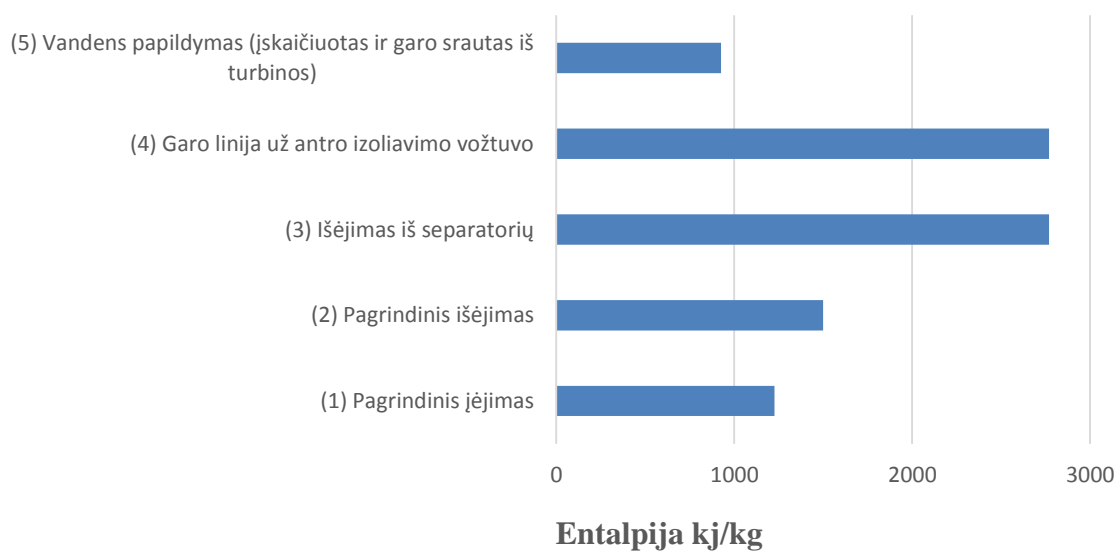
8.4 pav. Reaktoriaus aušinimo apimtys (sudaryta autoriaus remiantis 8.1 lentele)



8.5 pav. Slėgio pasiskirstymas reaktoriuje nominaliomis veikimo sąlygomis (sudaryta autoriaus remiantis 8.1 lentele)

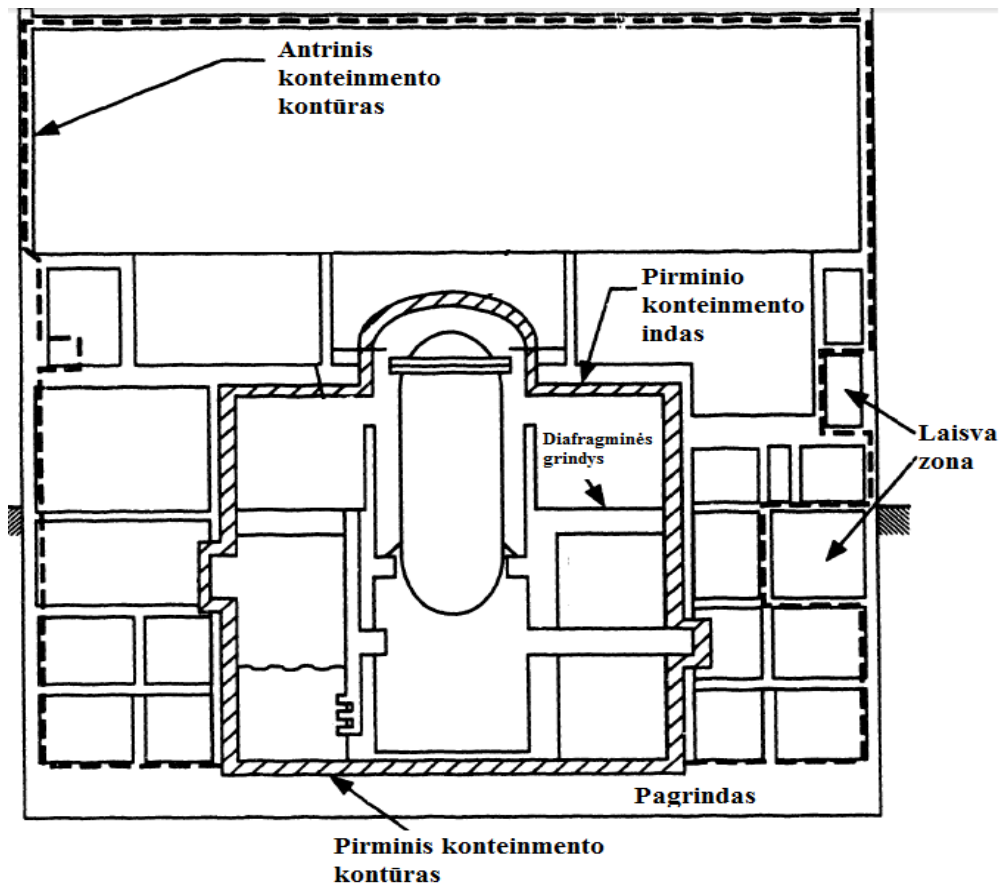


8.6 pav. Temperatūrų pasiskirstymas reaktoriuje nominaliomis veikimo sąlygomis (sudaryta autoriaus remiantis 8.1 lentele)



8.7 pav. Entalpijų pasiskirstymas reaktoriuje nominaliomis veikimo sąlygomis (sudaryta autoriaus remiantis 8.1 lentele)

8.4. 4 Priedas



8.8 pav. Konteimentas ir reaktoriaus pastatas

8.5. 5 Priedas

PWR reaktoriaus šiluminių savybių skaičiavimas [20]

Galios tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q''' = \frac{q'}{p^2} \quad (1)$$

čia: q' - vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyvioje zonoje 17,8 kW/m, $p = 12,6$ mm.

Apskaičiuojamas galios tankis, pagal 1 formulę:

$$Q''' = \frac{17,8}{(12,6 \times 10^{-3})^2} = 0,112 \times 10^6 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} = 112 \frac{\text{kW}}{\text{L}} \text{ arba } \frac{\text{MW}}{\text{m}^3}. \quad (2)$$

Specifinė galia apskaičiuojama:

$$\text{Specifinė galia} = \frac{Q}{\text{Sunkiųjų atomų masė}} = \frac{q'}{\pi \times R^2 \times \rho_{\text{tabletės}} \times f} \quad (3)$$

čia: R – kuro tabletės skersmuo, ρ - kuro tabletės tankis, q' - vidutinis šilumos išsiskyrimas aktyvioje zonoje, f – masės dalis.

Kadangi nėra žinoma UO_2 masės dalis, todėl prieš skaičiuojant specifinę galią, apsiskaičiuojama f_{UO_2} . Skaičiavimas atliekamas pagal 4 lygtį, urano įsodrinimo laipsnis 2,6%.

$$f_{UO_2} = \frac{rM_{sk} + (1-r)M_{nsk}}{rM_{sk} + (1-r)M_{nsk} + M_{O_2}} ; \quad (4)$$

čia: r – atomų masės dalis %, M_{sk} – skylančių atomų molekulinė masė, M_{nsk} – neskylančių atomų molekulinė masė.

$$f_{UO_2} = \frac{0,026 \times 235,0439 + 0,974 \times 238,0508}{0,026 \times 235,0439 + 0,974 \times 238,0508 + 2 \times 15,9944} = 0,8815 . \quad (5)$$

Priimamas kuro tablečių teorinis tankis 95 %, urano dioksido teorinis tankis $10,97 \text{ g/cm}^3$, kuro tabletės skersmuo 8,2 mm, kuro kiekis priimamas 101 t, apskaičiuojama specifinė galia:

$$\text{Specifinė galia} = \frac{1,78 \times 10^4 \frac{W}{m}}{3,14 \left(\frac{8,2 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \times \left(\frac{0,95 \times 10,97}{10^{-6}} \right) \times 0,8815 \text{ m}^2 \frac{g}{m^3}} = 36,70 \frac{W}{g \text{ kuro}} \quad (6)$$

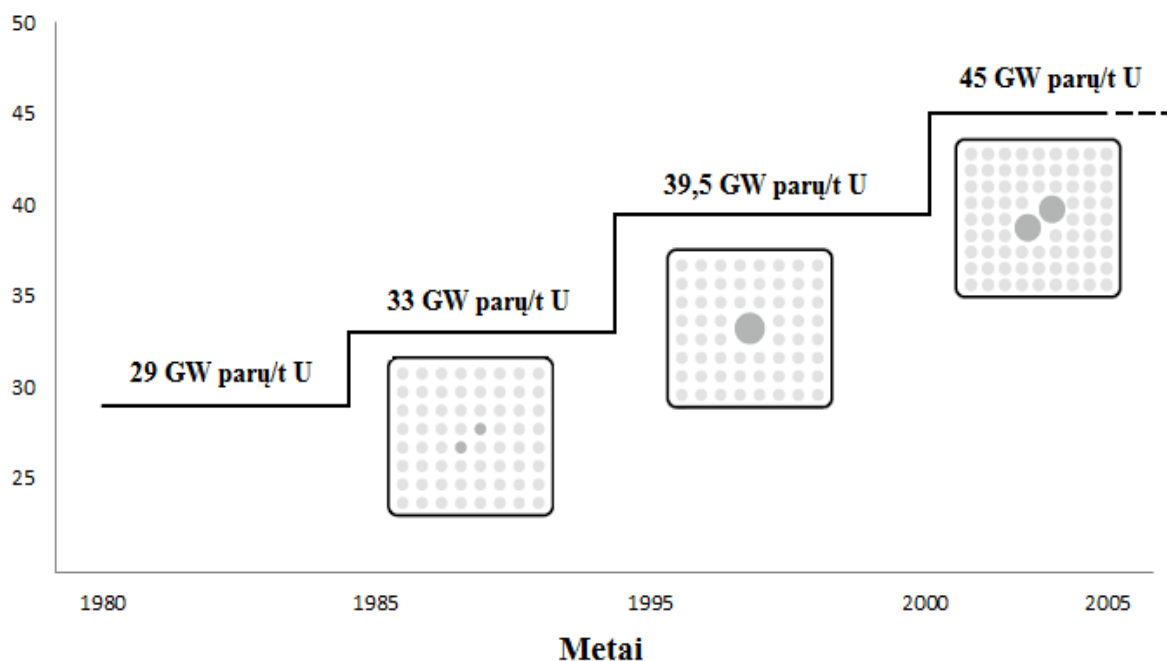
Specifinę reaktoriaus galią, taip pat galima apskaičiuoti pagal 7 formulę:

$$\text{Specifinė galia} = \frac{\text{šiluminė galia}}{\text{kuro pakrovimas}} = \frac{Q}{fM} ; \quad (7)$$

$$\text{Specifinė galia} = \frac{3319 \text{ MWt}}{0,8815 \times 101 \times 10^3 \text{ kg}} = 37,28 \frac{W}{g \text{ kuro}} . \quad (8)$$

8.6. 6 Priedas

Geresnė kuro ekonomika, buvo pasiekta žingsnis po žingsnio, didinant kuro išdegimo laipsnį (žr. 8.6. pav.). Padidintas kuro išdegimo laipsnis sumažino branduolinio ciklo kainas.



8.9 pav. Urano išdegimo laipsnio didinimo evoliucija (sudaryta remiantis literatūra [36]).