



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

Soojusenergeetika õppetool

MSE40LT

Henry Rebane

Tulevikureaktorid ja nende ohutus

Bakalaureusetöö

Autor taotleb

tehnikateaduste bakalaureuse

akadeemilist kraadi

Tallinn

2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis professor Aadu Paist juhendamisel

“.....”.....2015 a.

Töö autor: Henry Rebane

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....2015 a.

Juhendaja: Aadu Paist

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

Andres Siirde õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....2015 a.

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Henry Rebane 123942

Õppekava: MASB02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: professor Aadu Paist

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Tulevikureaktorid ja nende ohutus

The future of nuclear reactors and their safety

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Lõputöö teema ja juhendaja valik	17.02.15
2.	Ideede genereerimine ja lõplik valik	25.02.15
3.	Üldise kontseptsiooni määramine	10.03.15
4.	Materjalide kogumine ja analüüsimine	1.04.15
5.	Seletuskirja vormistamine	20.05.15

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Üliõpilane: Henry Rebane

Juhendaja: Aadu Paist

Kontakt: E-mail: aadu.paist@ttu.ee

Töö esitamise tähtaeg

/allkiri/ kuupäev.....

/allkiri/ kuupäev.....

SISUKORD

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE	3
SELEDE LOETELU	6
TABELITE LOETELU.....	7
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. ÜLEVAADE TUUMAENERGEETIKAST	11
1.1. Tuumareaktorite liigitus	11
1.1.1. Homogeenne ja heterogeenne reaktor	11
1.1.2. Soojuslikel neutronitel töötavad reaktorid	12
1.1.3. Kiiretel neutronitel töötavad reaktorid	12
1.1.4. Vahepealse energiaga neutronitel töötavad reaktorid.....	12
1.2 Reaktorite materjalid	13
1.2.1. Konstruksioonimaterjalid	13
1.2.2 Soojuskandjad	13
1.2.3. Aeglustid	14
1.3. Tuumkütused ning nende tootmine reaktoritele	15
1.3.1. Tuumkütused	15
1.3.2. Reaktoritele tuumkütuse tootmine	16
2. PRAEGUSEL HETKEL ENIMKASUTATAVAD REAKTORID	18
2.1. Surveveereaktorid (PWR).....	19
2.1.1. Euroopa surveveereaktor.....	21
2.2. Keevaveereaktorid (BWR)	22
2.2.1. Täiustatud keevaveereaktor	23
2.3. Raskeveereaktorid (PHWR)	23
2.3.1. CANDU reaktor.....	24
3. TULEVIKUREAKTORITE EELISED	26
3.1. Keskkonnamõju	26
3.2. Majandus ja usaldusväärsus	27
3.3. Jätksuutlikkus	29
3.4. Efektiivsus	30
3.5. Vesiniku tootmine	31

4. TULEVIKUREAKTORITE TEHNOLOOGIAD	32
4.1. Sulasoolareaktor (MSR).....	33
4.2. Ülekriitilise veega jahutatav reaktor (SCWR)	35
4.3. Ülikõrgtemperatuurne gaasjahutusega reaktor (VHTR)	37
4.4. Gaasjahutusega kiire reaktor (GFR)	39
4.5. Naatriumjahutusega kiire reaktor (SFR).....	40
4.6. Plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor (LFR)	42
5. TULEVIKUREAKTORITE OHUTUS	43
5.1 Ohutussüsteemid	44
5.1.1. Reaktori seiskamine	45
5.1.2. Reaktori jahutamine	47
5.1.3. Radioaktiivse kiirguse tõkestamine	52
5.2 Radioaktiivsed jäätmed	56
5.3 Avariid	59
KOKKUVÕTE	62
SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUS	68

SELEDE LOETELU

Sele 1.1 Tuumreaktorid maailmas [12].	11
Sele 1.2 Uraani lõhustumine [26].	15
Sele 1.3 Tuumkütuse tsükkel [16].	17
Sele 2.1 Levinumad reaktoritüübid [12].	18
Sele 2.2 Surveveereaktori tööpõhimõte [27].	21
Sele 2.3 Keevaveereaktori tööpõhimõte [17].	23
Sele 2.4 Raskeveereaktori tööpõhimõte [32].	24
Sele 4.1 Sulasoolareaktor [1].	35
Sele 4.2 Ülekriitilise veega jahutatav reaktor [1].	37
Sele 4.3 Ülikõrgtemperatuurne gaasjahutusega reaktor [1].	39
Sele 4.4 Gaasjahutusega kiire reaktor [1].	40
Sele 4.5 Naatriumjahutusega kiire reaktor [1].	41
Sele 4.6 Plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor [1].	42
Sele 5.1 Turvaelemendid ja süsteemid [26].	44
Sele 5.2 Reaktori seiskamise süsteemid [13].	46
Sele 5.3 Soojuse eraldus reaktori seiskamisel [19].	47
Sele 5.4 Reaktori tuuma jahutussüsteem Olkiluoto 3 näitel [14].	48
Sele 5.5 Eelsurvestatud mahuti südamiku jahutamiseks [23].	49
Sele 5.6 Loomuliku ringlusega mahuti südamiku jahutamiseks [23].	50
Sele 5.0.7 Jääksoojuse eemaldamine kasutades passiivselt jahutatud aurugeneraatorit [23].	50
Sele 5.8 Korpuse jahutamine ja rõhu summutamine kasutades passiivset korpuse pihustamist ja loomuliku tõmbega õhku [23].	51
Sele 5.9 Reaktori ristlõige [14].	53
Sele 5.10 Kaitsebarjäärid kiirguse tõkestamiseks [26].	54
Sele 5.11 Sulanud tuumakütuse mahuti EPR reaktori näitel [25].	55
Sele 5.12 Suletud tsükkel [18].	56
Sele 5.13 Kasutatud tuumkütuse bassein [31].	58
Sele 5.14 Kasutatud tuumkütuse kuiv hoiustamise kamber [16].	58
Sele 5.15 Loodusliku kiirguse ja inimtegevusest tingitud kiirguse võrdlus [29].	59
Sele 5.16 Suurimad õnnetused kõikide reaktoriaastate jooksul [10].	60

TABELITE LOETELU

Tabel 2.1 Kõige enam kasutatavate reaktorisüdamike omadused [1].....	19
Tabel 3.1 Keskmise CO ₂ emissioon erinevatel energiaallikatel [21].....	27
Tabel 3.2 Erinevate kütuste energiatihedus [18].....	28
Tabel 3.3 IV põlvkonna reaktorite üldisloomustus. [2].....	31
Tabel 4.1 IV põlvkonna reaktorite parameetrid [1].....	33
Tabel 4.2 Sulasoolareaktorite arendused [1].	34
Tabel 4.3 Ülekriitilise veega jahutatavate reaktorite arendused [2].....	36
Tabel 4.4 Ülikõrgtemperatuursete gaasreaktorite arendused. [2].....	38
Tabel 4.5 Gaasjahutusega kiired reaktorid [1].	40

EESSÕNA

Varasemalt teadsin, et plaanin oma lõputöö kirjutada tuumaenergeetikast, kuna antud valdkond pakub mulle suurt huvi. Lõpliku teema pakkus välja professor Aadu Paist, kelle ma valisin ühtlasi ka oma juhendajaks. Ta pakkus mulle asjakohast kirjandust ning soovitas erinevaid materjale, kust ma vajalikku informatsiooni võiksin leida. Samuti toimus pidev arutelu selle üle, millest täpselt lõputöös kirjutada ja kuidas see peatükkideks jaotada. Küsimuste tekkimise korral oli võimalus käia konsultatsioonides ja juhendajalt nõu küsida.

Täna professor Aadu Paistu, kes oli mulle lõputöö koostamisel suureks abiks.

SISSEJUHATUS

Tuumaenergiat on kasutatud elektri tootmiseks üle viiekümne aasta. Viimastel aastatel on see muutunud üha enam aktuaalseks. Juhtivad riigid, kes tegelevad tuumaenergeetika arendustööga ja tuumaenergia tootmisega on USA, Prantsusmaa ja Venemaa. Üha enam soovitakse kasutada tuumaenergiat, et vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest ja saavutada energeetiline sõltumatus. Töö eesmärk on teha uurimus tuumareaktoritest - milliseid reaktoreid on praegusel hetkel levinud, mille poolest erineb tuumaenergia fossiilsete kütuste kasutamisest, kuidas on tagatud nii olemasolevate kui ka tuleviku tuumareaktorite ohutus ja turvalisus ning milliseid reaktoreid tulevikuks plaanitakse ja mis on nendega kaasnevad peamised muutused.

Tänapäeva ühiskonnas pakub kõige enam kõneainet tuumareaktorite ohutus. Suurtes tööstusriikides on tuumaenergia välja kujunenud, kui usaldusväärne energiaallikas. Tulevikus, kui jätkub kasvuhoonegaaside pidev tõus, suureneb tõenäoliselt tuumaenergia roll, kuna see ei saasta keskkonda kahjulike gaasidega, lendtuha ega aerosoolidega. Praegusel hetkel kasutatavad tuumareaktorid ei rahulda tulevikus vajalikke tingimusi, seega on väljatöötamisel IV põlvkonna reaktorid ehk tulevikureaktorid, mille ühiseks arendamiseks loodi 2001. aastal rahvusvaheline foorum. IV-põlvkonna reaktoreid iseloomustab suurem ohutus, säästlikkus, jätkusuutlikkus, pikk tööiga, usaldatavus, soojuskandja kõrged parameetrid ja suur kasutegur.

Tulevikureaktorite arendamise peamine eesmärk on tagada nende laiem ülemaailmne kasutuselevõtt. Uute reaktorite arendustööga loodetakse lõpule jõuda enne 2030. aastat. Praegusega võrreldes laienevad tuumaenergeetika rakendused. Uutes reaktorites on võimalik oluliselt vähendada kasutatud tuumkütuse aktiiniidide kogust, kasutada tuumalõhkepeade plutooniumi ning rakendada tuumareaktori kõrgtemperatuuset soojust vesiniku termokeemiliseks tootmiseks. Mõned arendatavad reaktorid sobivad isegi soojuse tootmiseks kaugküttesse ning vee magestamiseks.

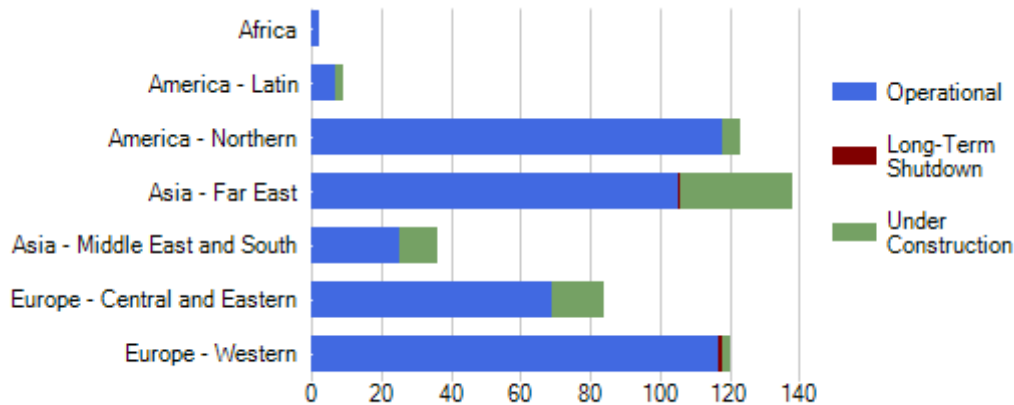
Ohutus on tuumajaamade rajamisel olnud alati väga tähtsal kohal. Ehkki juba praegu kasutusel olevad tuumareaktorid on suure ohutusega, toimub siiski pidev olemasolevate tuumareaktorite arendustöö, et tagada tulevikus veelgi suurem ohutus ja turvalisus. Aina kasvavad ohutusnormid ja standardid kindlustavad selle, et tuumaenergia ohutu ja usaldusväärne kasutamine jätkub. Turvasüsteemidele kulub ligikaudu veerand kõikidest kapitalikuludest.

Järjest enam pööratakse rõhku kliima soojenemisele ja erinevate energiaallikate kahjulikkusele ning nende mõjust keskkonnale. Fossiilsete kütuste kasutamise alternatiiviks on tuumaenergia. Samuti on tuumkütusevarud maailmas suuremad, kui fossiilsete kütuste varud ning tuumkütusest vabanev energia on ligikaudu miljon korda suurem, kui traditsioonilisest energiaallikast. Tuumaenergia alternatiiviks omakorda on taastuv energia, kuid antud viisil suure hulga energia tootmine on majanduslikult kallis. Taastuv energia sobib pigem väiksemaks tootmiseks.

Lõputöö esimeses peatükis seletatakse lahti, mille alusel on tuumareaktorid liigitatud, mis on põhilised reaktorite materjalid ja mis kütust kasutatakse tuumareaktorites ning kuidas toimub selle tootmine. Teises osas tuuakse välja praegusel hetkel enimkasutatavad tuumareaktorid, nende tööpõhimõtted ning senised arendustööd. See on oluline, kuna antud reaktorid mõjutavad meie elukeskkonda ja turvalisust veel vähemalt seni, kuni jõutakse uute reaktorite ehitamiseni. Kolmandas peatükis on välja toodud põhjused, miks tuleks tuumaenergiat kasutada ja mis on tulevikureaktorite kasutamisega kaasnevad eelised. Neljandas osas räägitakse täpsemalt tulevikureaktoritest ning tuuakse välja nende tööpõhimõtted. Viimases peatükis on juttu tulevikureaktorite ohutusest - milliseid ohutussüsteeme kasutatakse, mis tehakse radioaktiivsete jäätmetega ning suurimatest avariidest, mis on tuumareaktorite kasutamisaja jooksul toimunud.

1. ÜLEVAADE TUUMAENERGEETIKAST

2015. aasta aprilli seisuga töötab maailmas 30 erinevas riigis kokku 443 tuumareaktorit koguvõimsusega 381359 MWe. Ehitamisel on 66 reaktorit 15 erinevas riigis. 2014. aastal toodeti 13 riigis vähemalt veerand kogu riigi elektrienergiast kasutades tuumareaktoreid.[15]



Sele 1.1 Tuumreaktorid maailmas [12].

1.1. Tuumareaktorite liigitus

1.1.1. Homogeenne ja heterogeenne reaktor

Homogeense reaktori südamik on lihtsa ehitusega silindriline korpus, mis on täidetud homogeense seguga. Homogeenseks seguks on uraanisoolade lahused, uraanioksiidide suspensioonid harilikus vees või raskevees või uraaniga immutatud tahke aeglusti. Reaktori aeglustis on kütus jaotunud ühtlaselt. Sellised reaktorid ei ole levinud, kuna neil on mitmeid negatiivseid omadusi. [1]

Heterogeenses reaktoris on tuumkütus eraldatud aeglustist ja asub kütusevarrastes. Tuumkütusena kasutatakse tavaliselt UO_2 , mis asub hermeetilises torus. Võrreldes homogeense reaktoriga on esimese kontuuri aktiivsus mitu korda väiksem. Kütusevardad on aeglustisse paigutatud kassetidena, moodustades ruumilise võre. Kütusevardad on toru- või plaadikujulised ning nendest eraldub 90% soojusest. Ülejäänud lõhustumisenergia eraldub aeglustis. [1]

1.1.2. Soojuslikel neutronitel töötavad reaktorid

Soojuslikel neutronitel töötava reaktori südamik koosneb aeglustist, tuumkütusest, soojuskandjast ja konstruktsioonimaterjalidest. Tuumkütuse koguse vähendamiseks kasutatakse väikese neutronite radiatsiooniharde ristlõikega konstruktsioonimaterjale. Tuumalõhustumisel vabanevad neutronid energiaga 0,1-10 MeV, keskmiselt 2 MeV. Enamus neutroneid aeglustatakse soojusliku liikumise energiani ja siis neelduvad. Soojusenergigaga neutronitel töötavates reaktorites neelavad neutronid üsna oluliselt lõhustumissaadused. Uut tuumkütust tuleb lisada enne igat reaktorikampaania algust. [1]

1.1.3. Kiiretel neutronitel töötavad reaktorid

Kiiretel neutronitel töötavad reaktorid töötavad kõrgematel temperatuuridel, kui tavalised reaktorid ning võimalik on taaskasutada uraani ning tuumarelvadest pärit plutooniumi. Hetkel on arendamisel uued kiiretel neutronitel töötavad reaktorid, mis kuuluvad neljandasse põlvkonda. Väidetakse, et antud reaktorid on säästlikumad, vältides suures koguses tuumajäätmete teket. Nende funktsioonid on paranenud, kuid ülalpidamine on kulukam, kuna neid on keerulisem hooldada ja remontida. [20] Kiiretel neutronitel töötavas reaktoris saab toota lõhustumisprotsessist ülejäänud neutronite abil uut tuumkütust. Reaktorsüdamikus olev aeglustikogus viiakse miinimumini ning aeglusti satub reaktoris tuumkütusega. Enne neelamist jõuavad neutronid mitteelastse hajumisega rasketel tuumadel aeglustuda keskmise energiani 0,1-0,4 MeV. Lõhustumisreaktsiooni toimumise tõenäosus kiiretel neutronitel ei ületa 2 barni, mistõttu on südamikus vajalik lõhustuva aine suur kontsentratsioon. [1]

1.1.4. Vahepealse energiaga neutronitel töötavad reaktorid

Vahepealse energiaga töötavas reaktoris aeglustuvad kiired neutronid enne neeldumist energiani 1-1000 eV. Selliseid reaktoreid ei kasutata energiareaktoritena, kuna see pole majanduslikult kuigi kasulik. Antud reaktorid nõuavad suurema rikastusega tuumkütust ning neid pole võimalik toota uut tuumkütust. Seda tüüpi reaktorid on levinud uurimisreaktoritena, kuna neis on võimalik saavutada neutronvoogude suurt tihedust. [1]

1.2 Reaktorite materjalid

1.2.1. Konstruksioonimaterjalid

Konstruksioonimaterjalidena kasutatakse väikese neutronite neelamisvõimega materjale. Kvaliteetseid katematerjale on võimalik kasutada kõrgetel temperatuuridel, need on mehaaniliselt vastupidavad ega korrodeeru soojuskandjas, ei neela neutroneid, valmistamine on odav ning kate on läbitungimatu lõhustamissaadustele. Konstruksioonimaterjalidena on levinud alumiinium, magneesium, tsirkoonium ja roostevaba teras. [1]

Alumiiniumsulamid on oma omaduste poolest väga head. Need on odavad, hästitöödeldavad, plastilised, neelavad vähe neutroneid ja on lõhustamisele läbitungimatud. Kasutamist piiravad kehvad mehaanilised omadused temperatuuridel üle 250 °C ja korrosioon enamikes soojuskandjais. Magneesium on kõige kergem hästitöödeldav konstruksioonimetall, mis on oma omadustelt üsna sarnane alumiiniumile. Puhas magneesium ja selle sulamid ei pea vees korrosioonile vastu, kuid seda kasutatakse süsihappegaasjahutusega reaktorites kütusevarraste kattena. Tsirkooniumsulameid kasutatakse kütusevarraste kattena vesiaeglustiga reaktoreis temperatuuriga 350 °C ning kanaltüüpi reaktorite kanalite tootmiseks. Suurimaks puuduseks on kõrge hind. Roostevaba terast kasutatakse kiiretel neutronitel töötavates naatriumsoojuskandjaga reaktortites. See peab vastu kõrgetel temperatuuridel korrosioonile nii vesi- kui ka naatriumjahutusega reaktoreis ning sel on head tugevusomadused. [1]

1.2.2 Soojuskandjad

Soojuskanda eesmärk on transportida reaktorisüdamikus eralduv soojus kas otse turbiini või vahesoojusvahetisse. Soojuskandjaks võib olla vedelik, vedelik-aur või gaas. [1]

Kõige levinum soojuskandja on vesi. See on odav, heade soojusülekandeomadustega, ei korrodeeri kütusevarraste katetena kasutatavaid tsirkooniumsulameid ega ka reaktori ning torustike materjalidena kasutatavaid ferriit –ja austeniitraseid. Looduslik vesi sisaldab 0,017% raskevett, mitmesuguseid lisandeid ja lahustunud gaase. Enne soojuskandjana kasutamist puhastatakse vesi lisandeist ja deaereeritakse. Vee puuduseks on madal keemistemperatuur ja suur neutronite neelamisristlõige. Raskevesi erineb tavalisest veest

vähe, kuid neutronite madala neelamise tõttu võimaldab see siiski raskeveeaeglustis kütusena kasutada rikastamata uraani. [1]

Vedelmetall-soojuskandjatest kasutatakse kõige rohkem naatriumi ja naatrium-kaalium-eutektikumi. Vedelmetalle kasutatakse kiiretel neutronitel töötavates reaktorites soojuskandjana. Eeliseks on väga head soojusülekandeomadused ja kõrge keemistemperatuur. Vedelmetallide puudusteks on ühtesobimatus vee ja õhuga, suhteliselt suur neutronite neelamine, kõrge sulamistemperatuur ning pikaajaline aktiivsus pärast seiskamist. [1]

Gaassoojuskandjatena kasutatakse süsihappegaasi ja heeliumi. Muude gaasidega võrreldes on neil suurem tihedus ja erisoojus. Süsihappegaas on suhteliselt odav ning selle korrosiooniaktiivsus sõltub hapnikusisaldusest ja temperatuurist. Kasutamine soojuskandjana põhjustab reaktorisüdamiku pumpamisel suuri kulutusi, eriti selle suure võimsustiheduse tõttu. Heeliumil on head soojusfüüsikalised ja radioloogilised omadused. Seda on võimalik kasutada grafiitaeglustiga reaktorites temperatuuridel üle 1000 °C, ilma, et toimuks reaktsioon grafiidiga. Puuduseks on kõrge hind ja suured käituskulud. Heeliumis nähakse potentsiaali tulevikureaktoritele sobiva soojuskandjana. [1]

1.2.3. Aeglustid

Enamus praegu kasutatavaid energiareaktoreid töötavad aeglastel neutronitel. Tuumalõhustumisel vabanevate kiirete neutronite energia vähendamiseks tuleb kasutada aeglusteid. Mida väiksem on aatommass ja mida suurem tihedus, seda efektiivsem on aeglusti. [1]

Aeglustitena võib kasutada vett, raskevett, grafiiti või berülliumi, kuid levinum neist on tavaline vesi. Vesi on odav ning tal on head füüsikalised omadused. Looduslik grafiit aeglustiks ei sobi, seega toodetakse reaktorgrafiiti kunstlikult naftakoksist ja kivisöetõrvast. Berüllium on üks parimaid aeglusteid, kui mitte arvestada tema maksumust. Sel on kõrge sulamistemperatuur, hea soojusjuhtivus, sobib süsihappegaasi, vee, õhu ja mõnede vedelmetallidega. [1]

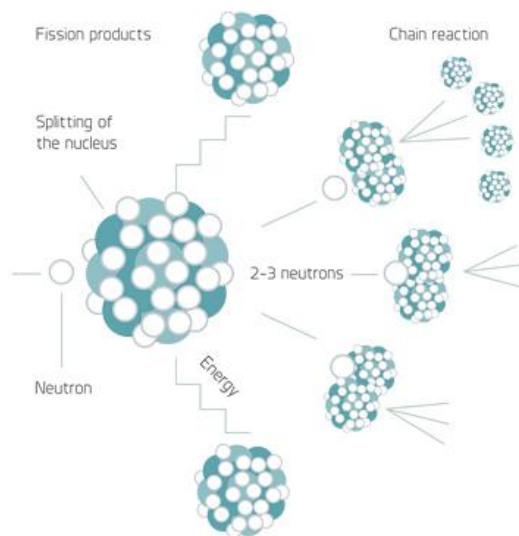
1.3. Tuumkütused ning nende tootmine reaktoritele

1.3.1. Tuumkütused

Tuumkütuseid eelistatakse fossiilkütustele nende madala omahinna tõttu. Samuti puuduvad tuumkütuse kasutamisel nii gaasilised kui ka tahked heitmed väliskeskkonda. Tuumkütused on ained, mille tuumad neutronite toimel lõhustuvad ja eraldavad energiat. Tuumalõhustumisel vabanevate neutronite keskmine energia on 2 MeV. [1]

Tuumaenergeetika põhiliseks toormaterjaliks on uraan. Maailmas on teadaolevad uraanivarud üle viie miljoni tonni. Seda leidub nii maakoos, kui ka ookeanides. Viimasel kümnendil on uute loodusvarade avastamise tõttu uraani varud suurenenud vähemalt veerandi võrra. [10]

Värvuselt on tegemist hõbevalge läikiva raskemetalliga, mis kattub õhu käes aeglaselt musta oksiidikihi. Looduses leidub uraani ainult ühendeis, isotoopide U-234 (0,006%), U-235 (0,72%) ja U-238 (99,274%) seguna. U-235 tuum on võimeline neelama neutroneid ja lõhenema mitmeteks osadeks, millega kaasneb väga suure energiakoguse vabanemine. [1]



Sele 1.2 Uraani lõhustumine [26].

Kolmandik maailmas toodetavast tuumaenergiast pärineb plutooniumist. [10] Ehkki plutooniumit leidub ka looduses, siis peamiseks allikaks on U-238 teisendumine. Plutooniumit liigitatakse metallide hulka, kuid selle soojus- ja elektrijuhtivustegurid on väga väikesed võrreldes tavaliste metallidega. [1] Plutooniumit tuleb käsitseda hoolikalt, et vähendada sellega seotud riske. Peamist ohtu kujutab inimestele sissehingamisel või siis, kui see satub lahtistele haavadele. [10]

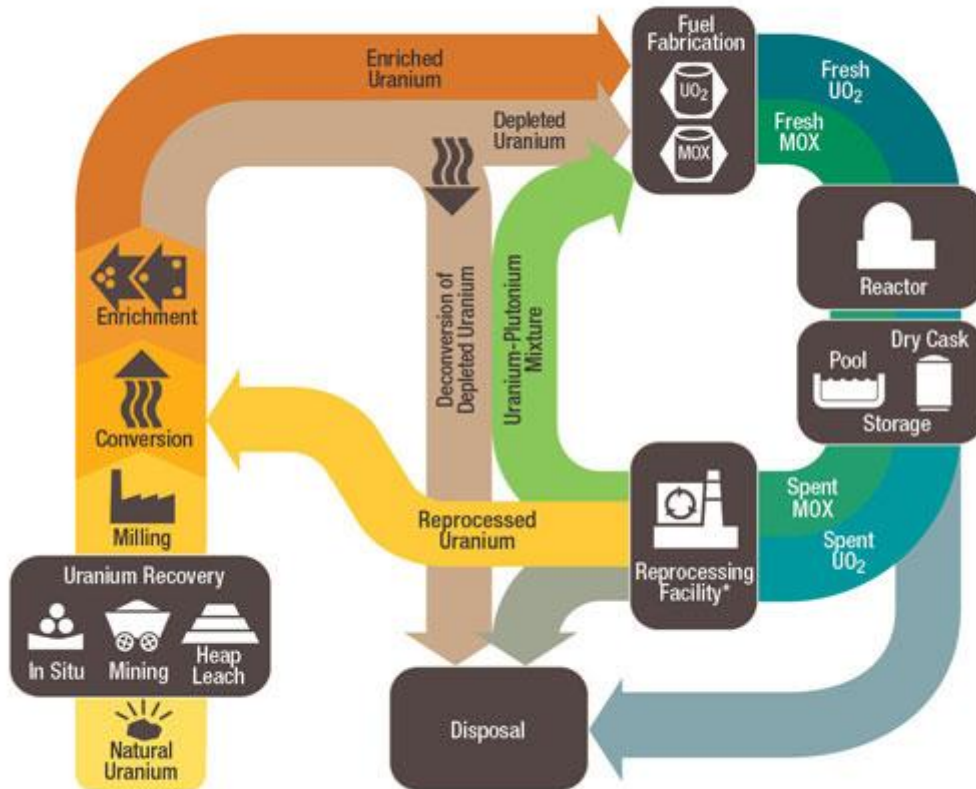
Tooriumi looduslikud varud on küllaltki suured, ületades isegi uraani varud. Uuringud näitavad, et maailmas on üle kuue miljoni tonni tooriumit. Suur osa varudest esineb monatsiitliivadena, mida leidub suurel hulgal Indias, Brasiilias, Madagaskaril ja USA-s. Tooriumi kaevandamise eesmärgiks on seda kasutada tuumkütusena. Praegu on maailma tuumkütuse tootmine ja areng keskendunud tooriumi asemel peamiselt uraani-plutooniumitsüklile, tingituna hinnast ja kättesaadavusest. Tooriumist tuumkütuse tootmise kõrge hinna üheks põhjuseks on U-233 suur radioaktiivsus. [10]

1.3.2. Reaktoritele tuumkütuse tootmine

Uraankütuse tootmine ei erine millegi poolest muude maakide kaevandamisest. Kaevandatud maak purustatakse, muudetakse lobriks ja sellest eraldatakse tugevas happe- või leelilahuses uraan. Lahusest sadestatakse välja uraanoksiidi peroksiidikontsentratsioon (U_3O_8), mis kuivatatakse, kuumutatakse ja pakendatakse. Tegemist on väheradioaktiivse ja üle 80% uraani sisaldava uraanperoksiidiga ning sellisel kujul kaevandused seda ka kaubastavad. Enne tuumareaktorites kasutamist ja rikastamist tuleb kaubanduslikku peroksiidi puhastada märg- või kuivprotsessi teel. [1]

Üheks oluliseks protsessiks on rikastamine. Rikastamise käigus suurendatakse lõhustumiseks võimelise põhiisotoobi U-235 osakaalu teise isotoobi U-238 suhtes. Reaktorites kasutatakse väherikastatud uraani 3,5–5% U-235. Tuumkütuse rikastamiseks kasutatakse peamiselt gaasdifusioon- ja tsentrifugaalmeetodit. Gaasdifusioonmeetodi korral läbib rõhu all olev uraanheksafluoriid tervet hulka poorseid membraane või diafragmasid. Tsentrifugaalprotsessis kasutatakse uraanheksafluoriidi ning protsess põhineb isotoopide massierinevusel. [1] Tulevikus on suure potentsiaaliga laserrikastamine, kuna see nõuab vähem ruumi ja energiat, kui tavapärased meetodid. [20]

The Nuclear Fuel Cycle

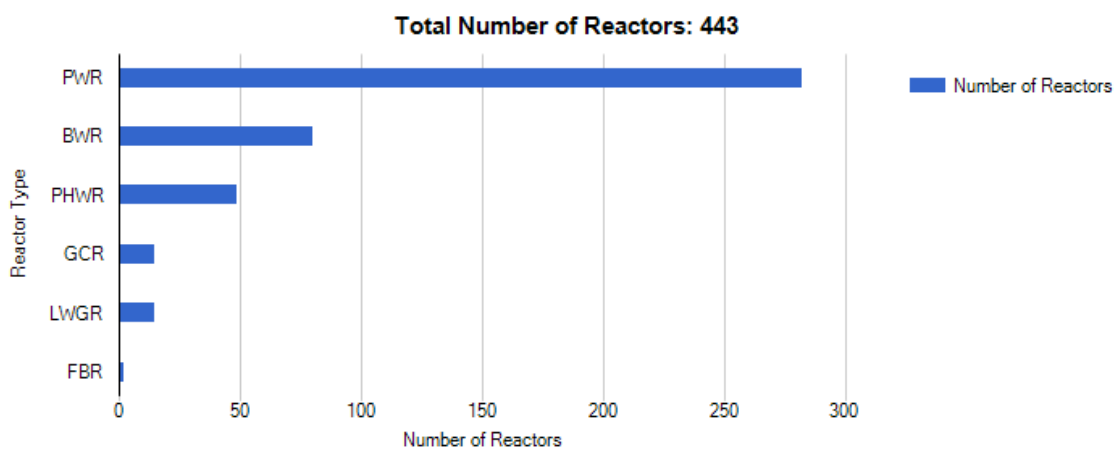


* Reprocessing of spent nuclear fuel including MOX is not practiced in the U.S.
 Note: The NRC has no regulatory role in mining uranium.

Sele 1.3 Tuumkütuse tsükkel [16].

2. PRAEGUSEL HETKEL ENIMKASUTATAVAD REAKTORID

Levinumad tuumareaktorid tänapäeva energeetikas kuuluvad II põlvkonda. Arendatud on väga erinevaid reaktoritüüpe, kuid mitte kõik ei ole ennast praktikas õigustanud. Maailmas on 443 tuumareaktorit, millest levinuimad on surveveereaktorid (64%), keevaveereaktorid (18%) ja raskeveereaktorid (11%). [12] Antud reaktorite tüübid on levinud mitmel põhjusel, kuid peamiselt sellepärast, et nad töötavad edukalt ning on ökonoomsed. [9]



Sele 2.1 Levinumad reaktoritüübid [12].

Praegusel hetkel töötavad enamused reaktoreid aeglastel ehk soojuslikel neutronitel. Antud reaktorid kasutavad tuumkütusena väherikastatud uraani. Vajadusel sobib ka hävitavatest tuumarelvadest pärit plutoonium või reaktori töötamisel tekkiv plutoonium. Olenemata sellest, et kiiretel neutronitel töötavates reaktorites kasutatakse uraani palju tõhusamalt ning tekitatakse vähem jäätmeid, ei ole need siiski veel konkurentsivõimelised. [8]

Tähtsal kohal on tuumajaamade rajamisel alati olnud ohutus. Pidevalt karmistuvate turvanõuete tõttu on kallinenud tuumajaamade ehituskulud, kuid uraani odav hind on suutnud turgu tasakaalustada. Iga järgnev tuumareaktorite põlvkond on endaga kaasa toonud ohutussüsteemide arengu, pikema eluea, parema kütusekasutuse ja minimaalsema keskkonnamõju. [1]

Tabel 2.1 Kõige enam kasutatavate reaktorisüdamike omadused [1].

	Surveveereaktor (PWR)	Keevaveereaktor (BWR)	Raskeveereaktor (PHWR)
Keskmine lineaarne soojuseraldus, kW/m	17,5	20,7	24,7
$V_{\text{aegl}}/V_{\text{kütus}}$ suhe	1,95	2,78	17
Mahuline soojuseraldus, MW/m ³	102	56	7,7
Soojuskandja	Harilik vesi	Harilik vesi	Raskevesi
Südamiku paiknemine	Terasanum	Terasanum	Kanalid
3000 MW _s reaktori südamiku maht, m ³	29,4	53,7	390
Soojuskandja maksimaalne temperatuur, °C	300-330	280-300	290-310
Reaktori ja turbiini vaheliste kontuuride arv	2	1	2
Tüüpiline küttekasutegur, GWööp/t	40-50	30-45	8-10
Kütuse rikastus, %	4,2	4,2	0,7

2.1. Surveveereaktorid (PWR)

Vesi-vesisurveveereaktorid on 279 töötava energiareaktoriga enimkasutatav reaktoritüüp maailmas. [12] Antud reaktorite elektriline võimsus võib varieeruda vahemikus 300–1500 MW_e. Oma olemuselt on tegemist kahekontuurilise reaktoriga. Esimeses kontuuris on küllastusrõhust kõrgemal rõhul vesi, mis annab oma reaktorisüdamikus saadud soojuse aurugeneraatoris üle teise kontuuri auruturbiini minevale küllastunud aurule. Turbiinis toimub auru paisumine, mille tagajärjel muutub soojusenergia esialgu mehaaniliseks energiaks ja siis generaatoris elektrienergiaks. Paisunud aur annab oma aurustussoojuse üle kondensaatori kolmanda kontuuri jahutusveele, kus omakorda pumbatakse aurukondensaat läbi regeneratiivsete soojusvahetite tagasi aurugeneraatorisse. [8]

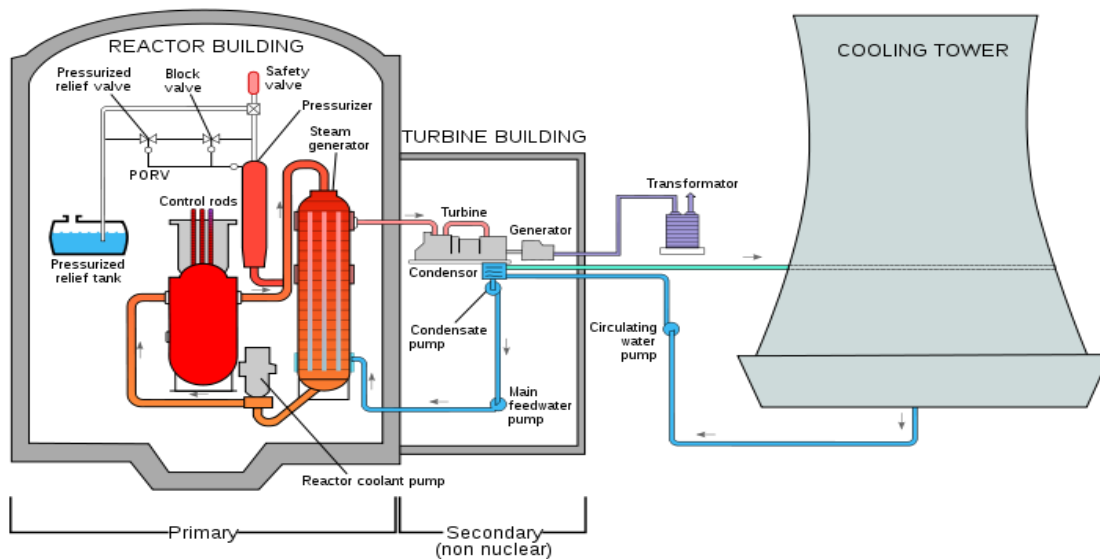
Vesi-vesireaktorite eelistamiseks on mitmesuguseid põhjuseid. Vesi on reaktori aeglusti ja soojuskandjana kõige sobivamaks aineks, sest see on odav, kättesaadav ning tema omadused on põhjalikult uuritud. Sel on parimad aeglustavad omadused, mistõttu antud reaktorid on küllaltki kompaktsed. [2]

Olenemata paljudest positiivsetest omadustest, ilmneb selle kasutamisel reaktoris ka mitmeid takistusi. Suur neutronite neelamisvõime mõjub negatiivselt südamiku neutrontasakaalule. Seetõttu tuleb kasutada rikastatud uraani, mis omakorda vähendab tuumkütuse taastootmistegurit. Kiire neutronite aeglustumine vees võib põhjustada lokaalse energiaeralduse suurt ebahütlust ning seega peab alati tagama vee ühtlase jaotuse südamikus. [1]

Sisemise ohutuse tõttu eelistatakse just paljudes riikides surveveereaktoreid. Positiivseks omaduseks peetakse seda, et teine jahutuskontuur ei saastu radioaktiivselt, mis esimeses kontuuris paratamatult ilmneb. Olulisemaks elemendiks on rõhule vastupidav monoliitne korpus, kuna reaktoris võib rõhk tõusta kuni 17MPa. Korpus valmistatakse kuumuskindlast süsinikterasest ja seestpoolt kaetakse 10–20 mm austeniiterase kihiga. [1]

Reaktorisüdamik koosneb kuusnurksetest või nelinurksetest kütusevardakoostudest. Kütusekoostud erinevad kütuse rikastusastme poolest. Kütusekassettide ümbris ja distantsvõred on perforeeritud, mis võimaldab soojuskandjal ristisuunas vabalt voolata. See on vajalik just südamiku keskmises, suure soojuskoormusega, osas. Vesiaeglustiga reaktorisüdamikule on iseloomulik „tihe võre“, vee ja kütuse mahtude suhe on umbes 2. Tihe paigutus on tingitud vee omadustest – suur soojuslike neutronite neelamisvõime ja hea aeglustusvõime. [1]

Kütusekoostude asendamine ja ümbertõstmine on töömahukas protsess. Veerand kuni kolmandik kütusest uuendatakse 1,5 – 2 aasta järel, mistõttu läheb vaja suurt hulka kompensatsioonivardaid, et tagada liigse reaktiivsuse allasurumine. Kütust lisatakse ja paigutatakse ümber pärast koormuse täielikku langetamist ja reaktori seiskamist. Reaktori seiskamisel lisatakse veele boori, mis käivitamisel osaliselt eemaldatakse. [8]



Sele 2.2 Surveveereaktori tööpõhimõte [27].

2.1.1. Euroopa surveveereaktor

Euroopa surveveereaktor EPR on surveveereaktori III põlvkonna esindaja. Elektrilise võimsusega 1600 MW_e. Uudne konstruktsioon on saavutatud aastatepikkuse uurimise ja arendustöö tulemusena. EPR-is on kasutatud end praktikas pikaajaliselt õigustanud PWR-reaktortüübi omadusi, mida on oluliselt parandatud ja täiustatud. [8]

Antud reaktori arendamisel pandi suurt rõhku turvalisusele. Kõik olulised seadmed on paigutatud eraldi ehitistesse. Reaktori ümber on hermeetiline konteiner. Lisaks ümbritseb reaktorit kahekihilisest raudbetoonist 2,6 m paksusega kaitsekest. Sisesein on omakorda eelpingestatud raudbetoonist, mis peab vastu survele kuni 5,5 baari. Nimetatud reaktor peab vastu mistahes välisohule. Juhul, kui vähetõenäoline avari peaks juhtuma, tagavad turvalisuse ja väikese keskkonnamõju reaktori ehituse aktiivsed ja passiivsed meetmed. [8]

Suure tõenäosusega kujuneb sellest reaktorist üks peamisi vanade reaktorite asendajaid. III põlvkonna reaktorite loomisel lähtuti kindlatest eesmärkidest. Reaktoritel on parandatud kütusekasutus ja pikk 60- aastane tööiga. Suurenenud on majanduslik konkurentsivõimekus ning vähenenud on perioodiliste hoolduste aeg ja keskkonnamõju. [1]

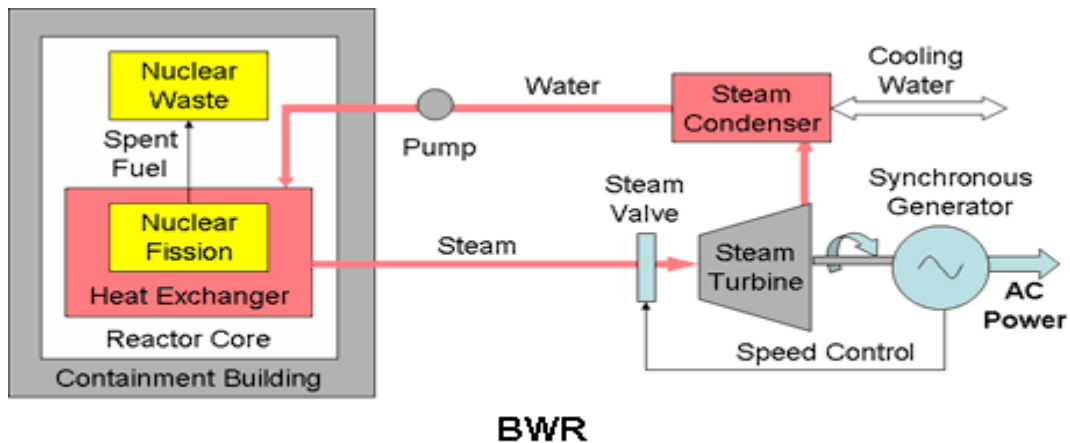
2.2. Keevaveereaktorid (BWR)

Keevaveereaktorid 78 reaktoriga levikult maailmas teisel kohal. [12] Nende elektriline võimsus võib olla kuni 1300 MW_e. Võrreldes surveveereaktoriga on keevaveereaktori jahutuskontuur kuni kaks korda madalama veerõhuga, mis on osutunud küllaltki otstabekaks. Keevaveereaktori suurimaks iseärasuseks võib pidada auru peasiibri sulgumisel tekkivat järsku rõhu tõusu, mis vähendab südamikus aurukogust. Seetõttu suureneb neutronite aeglustamine ja reaktori võimsus. [2]

BWR-reaktorid on oma ehituselt 6-7-meetrise läbimõõduga paksuseinaliste korpustega. Suure läbimõõdu tõttu on seinapaksus võrreldav PWR-reaktoriga, kuigi tööõhk on ligi poole väiksem. Madalam rõhk lihtsustab reaktorikorpuste, torustike ja muude seadmete valmistamist. Keevaveereaktoritel puudub suure küttepinnaga aurugeneraator ja mahukompensaator. Antud omadused muudavad odavamaks nii seadme ise kui ka selle eksploatatsiooni. Seepärast ongi keevaveereaktorid maailmas laialt levinud. [1]

Olenevalt reaktori võimsusest mahutab reaktor korraga maksimaalselt 140 tonni tuumkütust. Tuumkütusena kasutatakse U-235 suhtes rikastatud uraanoksiidi. Reaktori tsentris on väiksema rikastusega ja ääres suurema rikastusega kütus ning uut kütust lisatakse ja paigutatakse ümber kord aastas nagu ka surveveereaktoris. Võimsust reguleeritakse südamikku läbiva veevookoguse muutmisega. II põlvkonna keevatel reaktoritel toimub ringlus väljaspool reaktoranumat olevate pumpade abil. [1]

Konstruksioonilt on surveveereaktor ühe jahutuskontuuriga. See on küll muutnud reaktori oma olemuselt lihtsaks, kuid selle ülalpidamise mitte tingimata odavamaks. Kuna reaktorit läbinud aur jõuab lõpuks koos vees sisalduvate reaktiivsete lisanditega turbogeneraatorisse, vajab turbiin kiirusvarjestust. [2]



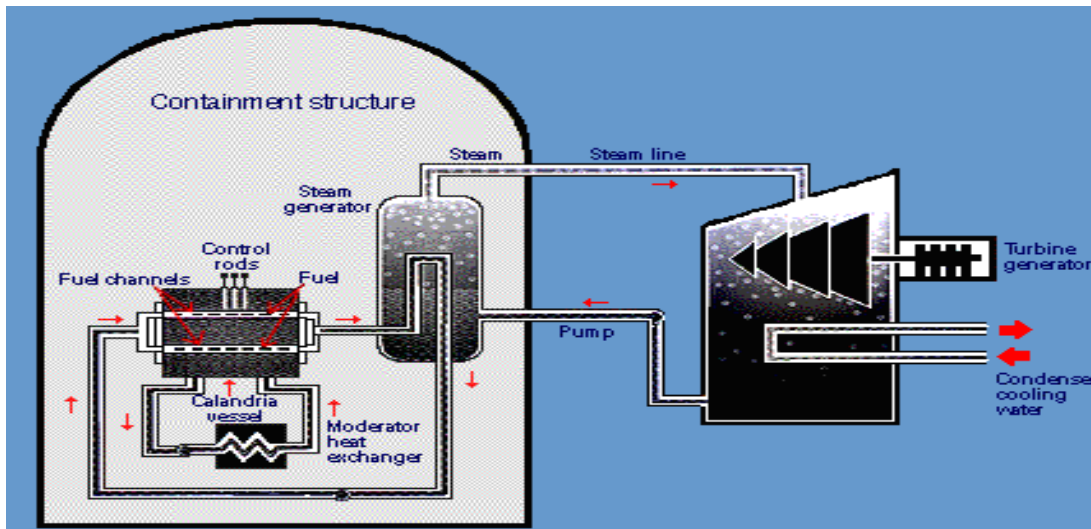
Sele 2.3 Keevaveereaktori tööpõhimõte [17].

2.2.1. Täiustatud keevaveereaktor

Täiustatud keevaveereaktor ABWR on III põlvkonna reaktor võimsusega 1300-1600 MW_e. Võrreldes II põlvkonna keevaveereaktoritega on suurimaks uuenduseks reaktorisestest ringluspumpade kasutamine. Antud tehnoloogia kasutuselevõtt suurendas soojuslikku kasutegurit ja vähendas seadme maksumust. Pumpade voolukiirust reguleerides on võimalik muuta reaktori võimsust. Ohutuse mõttes on enamus pumpasid ja torustikke paigutatud reaktori korpusesse, et vältida lekke korral radioaktiivsete ainete levikut väliskeskkonda. Välise kontuuri puudumine vähendab töötajate kiirgusdoose. Reaktori jahutus võib toimuda ka loomuliku ringlusega. [1]

2.3. Raskeveereaktorid (PHWR)

Raskeveereaktorite kontseptsioon on välja arendatud mitmete riikide koostööl. Huvi antud reaktorite vastu kasvas, kuna see ületas mitmed probleemid, mis esinesid kergveereaktoritel. Raskeveereaktorites kasutatakse soojuskandjana raskevett, mistõttu on võimalik kütusena kasutada rikastamata uraani. [2]



Sele 2.4 Raskeveereaktori tööpõhimõte [32].

2.3.1. CANDU reaktor

CANDU (Canada deuterium uranium) reaktorid on Kanadas konstrueeritud raskeveesurveaktorid. CANDU-reaktor oli esimene reaktor, mis ehitati otseselt energiatootmiseks. Oma konstruktsioonilt on ta sarnane kergveereaktoritele, erinedes ainult detailides. Oma olemuselt on tegemist aga kanalreaktoriga, kuna esimeste reaktorite konstrueerimise ajal ei olnud Kanada rasketööstus suuteline valmistama suurt rõhu all töötavat reaktori korpust. [2]

Kütusena on kasutusel rikastamata uraanoksiidist toodetud pelletid, mis asetsevad tsirkooniumsulamist hermeetilistes torukestes. Võimalik on kasutada ka kergveereaktorites töötanud kütust, mille U-235 sisaldus on 0,9%. Kanalisse läheb 12 torukimpu, millest igaüks kaalub 23,7 kilogrammi ning sisaldab 19,2 kg uraani. Reaktoris viibimise aja jooksul saab sellest 1GWh energiat. [1]

CANDU-reaktorile on iseloomulikud kaks ainulaadset konstruktsiooniisearasust, mis tagavad reaktori ohutuse. Nendeks on suur kogus madalatemperatuurilist raskevett ning aeglustit ja kalandrit ümbritsev külma kergvee kaitsekest. Juhul kui kanalis olevad kütusevardad mingil põhjusel üle kuumenevad ja deformeeruvad, siis kalandris oleva külma aeglusti suur mass tagab täiendava ohutuse. [2]

Peale ainulaadsete konstruktsiooniisearasuste on reaktoril veel kaks üksteisest sõltumatut kiire seiskamise süsteemi. Mõlemad süsteemid on võmelised vähendama reaktoris eralduva soojuse kahe sekundiga 100%-lt 10%-le. Ülejäänud soojus eraldatakse avariisüsteemiga. [2]

CANDU-reaktoritel on parem kütuse ära kasutamine, kuna sel on väike U-235-sisaldus reaktori ruumalaühiku kohta. Kui võrrelda kergveereaktoriga, siis vajab CANDU ligikaudu 35% vähem kaevandatud uraani toodetud elektrienergia ühiku kohta. Kasutusiga on 60 aastat ning keskmine töökindlus olenemata vanusest ligikaudu 87%. Lubatava eluea võib saavutada vaid juhul, kui poole eluea möödudes vahetatakse välja reaktori kütusekanalid ning peale- ja tagasivoolutorustikud. Antud tegevus võtab aega ligikaudu 18 kuud ning maksab ligikaudu 4 korda rohkem kui reaktori tavapärase majanduskulu. [1]

Aastas kasutab reaktor veidi alla 100 tonni tuumkütust UO_2 . Iga kütuseelement reaktori tuuma ainult ühe korra ning läheb seejärel jahutusbasseini. Antud teguviis ei ole kõige säästlikum ning seetõttu tahetakse süsteemi täiendada, et juhtida korra reaktoris viibinud kütuseelement tagasi reaktorisüdamikku. Jahutusbasseinis hoitakse kütust üks aasta ning seejärel transporditakse 50-60 aastaks ajutisse hoidlasse. Ajutiste hoidlate eluiga võib ulatuda kuni 100 aastani, olenevalt keskkonnast ning sinna paigutatakse kogu tuumajaamas tekkiv radioaktiivne jääde. [1]

Antud tuumaelektrijaam on niivõrd ohutu, et isegi lennukiga lennates on kiirguse tase 10 korda suurem kui tuumaelektrijaamast väljakiiratud kiirguse tase ja radioaktiivsete isotoopide väljaheidete kiirguse tase. [1]

3. TULEVIKUREAKTORITE EELISED

Elekter mängib tänapäeva elus suurt rolli, mõjutades nii meie produktiivsust, mugavust, ohutust, tervishoidu kui ka majandust. Tänapäeval võetakse elektrit iseenesestmõistetavana. Enamik inimesi pöörab väga vähe tähelepanu sellele, kus kohast elekter tuleb. Võimalusi elektri tootmiseks on mitmeid – kivisüsi, nafta, gaas, põlevkivi, hüdro-, tuuma-, ja päikeseenergia. Iga variant omab teatud eeliseid, mis väärivad enne uue elektrijaama püstitamist kaalumist. Tuumaenergia on elektri tootmisel ainulaadne, kuna loomupäraselt käsitletakse mitmeid puudujääke, mis esinevad teistel viisidel elektri tootmisel. Tuumaenergia kasutamine pakub lahendusi mitmetele probleemsetele valdkondadele nagu keskkond, ohutus, majandus, usaldusväarsus ja jätkusuutlikkus. [11] Tuumaenergia pakub riigile tõelist energeetilist iseseisvust, samas kui naftast ja gaasist sõltuvuses riigil võib kiiresti tekkida julgeoluprobleeme. [18]

3.1. Keskkonnamõju

Tuumaenergia on kõige puhtam, ohutum ja keskkonnasõbralikum viis suurel hulgal elektrienergia tootmiseks. [7] Ilma selleta tugineks energeetikasektor peaaegu täielikult fossiilsetele kütustele, eriti kivisüele, et rahuldada vajalik nõudlus. Tuumaenergia alternatiiviks on taastuvenergia, kuid antud viisil suure hulga energia tootmine on majanduslikult kallis. Taastuvenergiaallikad sobivad pigem väiksemaks tootmiseks. [2]

Praeguste prognooside järgi tõuseb energiavajadus järgneva kahekümne aasta jooksul märkimisväärselt. On oht, et fossiilsete kütuste osakaalu suurendades riskime veelgi suuremate keskkonnaprobleemidega. Mitmetes suurtes tööstusriikides on tuumaenergeetika välja kujunenud kui usaldusväärne energiaallikas. Tuumareaktorid toodavad meile süsinikuvaba elektrienergiat ning ei suurenda kasvuhoonegaaside teket. Seetõttu tuleks nii tuumaenergia osakaalu kui ka muude taastuvate energiaallikate osakaalu elektritootmises tõsta. [2] Tuumaenergial ei ole negatiivseid mõjusid veekogudele ja maa-aladele, mida igapäevaselt kasutatakse. [6] Keskkonnamõju on viidud minimaalseks nii tavapärasel tööol kui ka võimaliku avarii korral. [1]

Erinevalt fossiilsetest kütustest, ei tooda tuumaelektrijaamad süsinikdioksiidi ega vääveldioksiidi, mis on peamisteks kasvuhooneefektide ja happevihmade põhjusteks. USA Tuumaenergia Instituudi andmetel väldime igal aastal tuumaenergia kasutamisega 5,1 miljoni tonni vääveldioksiidi, 2,4 miljoni tonni lämmastikdioksiidi ja 164 miljoni tonni süsiniku vabanemist Maa atmosfääri. [18]

Tabel 3.1 Keskmise CO₂ emissioon erinevatel energiaallikatel [21]

Energiaallikas	Keskmise CO₂ emissioon (kg CO₂/kWh)
Pruunsüsi	1,2
Kivisüsi	1,07
Nafta	0,9
Maagaas	0,4
Päikeseenergia (kombineeritud tsükkel)	0,060
Tuuleenergia (rannikul)	0,014
Tuuleenergia (maismaal)	0,011
Tuumaenergia	0,008
Hüdroenergia	0,005

Keskkonnamõju uraani kaevandusel on palju väiksem võrreldes fossiilkütuste kaevandamisega ja puurimisega. [11] Kivisüsi sisaldab väga väikeses koguses tooriumit ja uraani, kuid selle radioaktiivne doos inimestele on umbes sada korda suurem, kui tuumajaamadest, kuna kivisüsi kasutatakse väga suures mahus. Tuumajäätmeid on võimalik käidelda nõuetekohaselt, ilma keskkonda mõjutamata ning tuleviku tuumareaktorid toodavad märkimisväärselt vähem jäätmeid. [18]

3.2. Majandus ja usaldusväärsus

Tuumajaamad võrreldes teiste elektrijaamadega on suuremad ja keerulisema ehitusega. Neil on väga palju ohutussüsteeme, mis suurendavad kulusid võrreldes fossiilsetel kütustel töötavate elektrijaamadega. Kütusekulud on jällegi palju väiksemad. Suurte kapitalikulude tõttu on küllaltki raske tuumaelektrijaamade rajamiseks investoreid leida. [18]

Tuumaenergeetika suudab energiaturul pakkuda teatud eeliseid konkurentide ees, olles üheks kõige säästlikumaks energia tootmise viisiks. Peamiseks eeliseks on see, et suur kogus energiat saadakse väikesest kogusest uraanist. [11] Viimastel aastatel on saavutatud madalad ja stabiilsed elektrienergia tootmiskulud. [2] 2012. aastal oli tuumaenergiaga toodetud elekter maailmas kõige odavam. [11] Tuumakütus moodustab elektri hinnast väikeseosa, samas kui fossiilsetel kütustel ja gaasidel sõltub kütuse hind turuhinnast. [7] Uraani hind, mida kasutatakse kütusena elektritootmiseks on üsna madal. Isegi kui uraani hind peaks tõusma, ei mõjuta see märkimisväärselt elektri hinda. [6]

Võrreldes nafta ja gaasiga on tuumkütus tahke. [11] Madalad kütusekulud on tingitud eelkõige sellest, et energiatootmiseks ei lähe palju tooreainet vaja. Kuna kütust kulub vähe, ei kulu transpordile palju raha ning see on lihtne võrreldes fossiilsete kütustega. [7] Tuumkütused on immuunsed keskkonnaprobleemidele, mis on tingitud transportimisel tekkivatest leketest. Kasutamata tuumkütus on veidi rohkem radioaktiivne, kui maapõues olev kütus. Kütus toimetatakse kohale spetsiaalsetes vaatides, mis on kõrge ohutusega. Isegi, kui transportimisel õnnetus juhtub, jääb keskkond tuumkütusest saastumata. [11]

Tuumareaktsioonil vabaneb miljon korda rohkem energiat kui traditsiooniliste energiaallikatega. [6] Umbes 28 grammi uraani vabastab sama energiakoguse, kui 100 tonni kivisütt. Tuumajäätmeid tekib energia tootmise protsessis märkimisväärselt vähem kui fossiilkütuse jäätmeid. Võimalik on kasutatud kütus ümber töödelda ja toota uut energiat. [7]

Tabel 2.2 Erinevate kütuste energiatihedus [18]

Materjal	Energiatihedus (MJ/kg)
Puit	10
Etanool	26,8
Kivisüsi	32,5
Toornafta	41,9
Diisel	45,8
Looduslik uraan, 0,7% (LWR)	$5,7 \times 10^5$
Väherikastatud uraan, 5% (LWR)	$3,7 \times 10^6$
Looduslik uraan, 0,7% (briider)	$8,1 \times 10^7$
Toorium (briider)	$7,9 \times 10^7$

Tuumareaktorid on usaldusväärsed, varustades põhikoormusjaama energiaga, mis on kättesaadav 90% ajast. [7] Enamus jaamu on projekteeritud töötama täiskoormusel, olenemata elektrienergia nõudlusest. [11] Vähendatud on perioodiliste hoolduste vajadust ning pikendatud kütusevahetuste vahelist aega. [7] Erinevalt tavapäraest taastuvatest energiaallikatest nagu päikese või tuuleenergia, mis nõuavad kas päikest või tuult, saab tuumaenergiat toota isegi rasketes ilmastikutingimustes. Tootmine toimub 24/7 ning see peatatakse ainult hoolduse ajaks. [6] Tuumajaamad on eriti sobilikud suure koguse energia tootmiseks ning nad suudavad ilma tankimata töötada ligikaudu kaks aastat. [11]

3.3. Jätkusuutlikkus

Tuleviku tsivilisatsioon sõltub suuresti praegu määramata elektrivarustamisest. Selge on see, et fossiilsete kütuste kasutamisel on piir. Kõige optimistlikumad prognoosid näitavad, et fossiilset kütust jätkub veel kõigest 100 aastaks ning see võib muutuda majanduslikult ebasobivaks juba lähimate aastate jooksul. Päike, tuul ja teised taastuvad energiaallikad tagavad sellegipoolest maailma lõpmatu elektrienergiaga varustamise. Kuna elektritootmise potentsiaal, isegi väikesest kogusest uraanist, on väga suur, siis võib sinna nimekirja lisada isegi tuumaelektrijaamad. Õige konfiguratsiooni korral võivad tuumaelektrijaamad elektrit toota mitu põlvkonda. [11] Briiderreaktorite korral tekib tuumkütuse kasutamisel uut kütust kõrval saadusena. Antud reaktoritega on võimalik toota plutooniumi, mistõttu valitsus on reaktorite ehitamise suhtes kahtleval seisukohal. Siiski kui antud reaktori kontseptsioon laiemalt rakendub, võib see vähendada tuumkütuse hinda nii madalale, et uraani eraldamine ookeanidest ei oleks liiga kallis ettevõtmine. Igas mõttes on tuumaenergia usaldusväärne ja jätkusuutlik energiaallikas. [11]

Uraani leidub kõikjal maakoos. Suurimad varud on Austraalias ja Kanadas. Ilma tuumakütuse ümbertöötlemiseta arvatakse, et uraani jätkub praeguse nõudluse juures vähemalt kaheksajaks aastaks. Sama ei saa väita kivisüsi, nafta ja maagaas kohta. [6] Tegelikult ei saa tuumakütus aga kunagi otsa, kuna seda on võimalik ümber töödelda ja taaskasutada. Isegi ookeanidesse on lahustunud peaaegu lõputul hulgal madala kontsentratsiooniga uraani. Praeguseks hetkeks pole leitud odavat viisi selle välja võtmiseks. Tuumareaktorid võivad edukalt kasutada ka tooriumi, mida leidub maakoos isegi rohkem, kui uraani. [18]

3.4. Efektiivsus

Peamine põhjus, miks tuumaenergiat eelistatakse on see, et tuumareaktorid on võimsamad, kompaktsemad ning tõhusamad, kui muud energiaallikad. [6] Päikesepaneelid, tuulikud ja kasvav biomass vajab väga suuri maa-alasid, et toota samaväärne kogus elektrienergiat nagu tuumajaamas. Reaktorite normaalsel tööil ei eraldu kiirgust peaaegu üldse. Tehnoloogia areng on muutnud antud energia kasutamise mõistlikumaks. Üha enam muudavad keskkonnakaitsjad oma arvamust tuumaenergiast, kuna selle eelistamiseks on mitmeid põhjuseid. [7] See on peamine põhjus, miks investeeritakse tuumaenergeetikasse suuri summasid. Hetkel on tuumaenergeetika osakaal elektrienergia kogutoodangust ligikaudu 17%. [6]

IV-põlvkonna reaktoreid iseloomustab ohutus, säästlikkus, jätkusuutlikkus, pikk tööiga, usaldatavus, soojuskandja kõrged parameetrid ja suur kasutegur. Enamik tulevikureaktoritest töötab suletud kütusetsükliga, tagades parema tuumkütuse ära kasutamise ja lõpphoidlasse paigutamist vajavate tuumajäätmete olulise vähenemise. Reaktorite eluiga võib ületada isegi 60 aasta piiri. [1]

Tulevikureaktoritel laienevad tuumaenergia rakendused veelgi. Kaasneb mitmeid häid omadusi. [7] Kõrgem efektiivsus elektritootmises loodetakse saavutada soojuskandja parameetrite tõstmisega. Uutes reaktorites on näiteks võimalik oluliselt vähendada kasutatud tuumkütuse aktiniidide kogust, kasutada tuumalõhkepeade plutooniumi ning rakendada tuumareaktori kõrgetemperatuurset soojust vesiniku termokeemiliseks tootmiseks. Mõned arendatavad reaktorid sobivad isegi soojuse tootmiseks kaugküttesse ning vee magestamiseks. Venemaal on tuumajaamade heitsoojust kaugküttes juba kasutatud. [2]

Võib väita, et hästi projekteeritud, ehitatud, töötanud ja hooldatud tuumaenergia ei ole ainult puhas, vaid see on ka ohutu, usaldusväärne ja konkurentsivõimeline. [7]

Tabel 3.3 IV põlvkonna reaktorite üldiseloomustus. [2]

	Neutronspekter	Kütusesükkel	Kasutusala
MSR	Soojuslik	Suletud	Elektritootmine/ aktiniidide käitlemine
SCWR	Soojuslik/ kiire	Ühekordne/suletud	Elektritootmine/ aktiniidide käitlemine
VHTR	Soojuslik	Ühekordne	Elektri/vesiniku tootmine/ protsessisoojuse kasutamine
GCFR	Kiire	Suletud	Elektri/vesiniku tootmine/ aktiniidide käitlemine/ protsessisoojuse kasutamine
SFR	Kiire	Suletud	Elektritootmine/aktiniidide käitlemine
LFR	Kiire	Suletud	Elektritootmine/aktiniidide käitlemine

3.5. Vesiniku tootmine

Tuumaenergia on määrava tähtsusega veest puhta, ökonoomse ja suurel hulgal vesiniku tootmiseks, mis sobib kasutamiseks kütusena transpordis ja tööstustes. Fossiilsetele kütustele omaseid probleeme energia tootmisel saab vältida, kasutades vesinikku. Vesinikkütuselemendid sõidukites on kaks korda efektiivsemad kui sisepõlemismootorid. Erinevalt tavalistest mootoritest eraldavad kütuseelemendid ainult vett ja soojust. Igal aastal toodetakse 50 miljonit tonni vesinikku ülemaailmseks tarbimiseks. USA eesmärk 2030. aastaks on, tõsta vesiniku osakaalu maailma energeetikas vähemalt 10%-ni. [11]

9 miljonit tonni vesinikku suudab energiaga varustada 20-30 miljonit autot või 5-8 miljonit majapidamist. Kui me arendame vesiniku tootmise oma maksimaalsele potentsiaalini, võime vähendada nafta nõudlust 11 miljonit barrelit päevas kuni 2040. aastani. Ainult tuumaenergia on sobilik suurel hulgal vesiniku tootmiseks, et tagada tulevane nõudlus, samal ajal vältides kasvuhoonegaaside vabastamist atmosfääri. Tootes vesinikku fossiilkütustest, ei ole see energeetiliselt sõltumatu ega keskkonnasõbralik lahendus. [11]

4. TULEVIKUREAKTORITE TEHNOLOOGIAD

IV põlvkonna reaktorite loomise põhiidee oli laiendada soojusliku reaktori kontseptsiooni kiiretele neutronitele. Tuleviku tuumatehnoloogiate ühiseks arendamiseks algatas USA 2001. aastal rahvusvahelise foorumi (Generation IV International Forum - GIF). Esialgu allkirjastas lepingu 10 riiki. Foorum on avatud kõigile tuumatehnoloogia huvilistele ning nüüdseks on liikmete arv veelgi suurenenud. [2]

Kõigepealt tehti valik enam kui 100 projektist. Seejärel valiti 2005. aastal välja 6 paljulubavat reaktoritehnoloogiat. Valituks osutusid reaktorid, mida on varem katsetatud ning neist neljal on isegi varasem töökogemus. Kuus reaktortüüpi, mis välja valiti on järgmised: sulasoolareaktor (MSR), ülekritilise veega jahutatav reaktor (SCWR), ülikõrgtemperatuurne reaktor (VHTR), gaasjahutusega kiire reaktor (GCFR), naatriumjahutusega kiire reaktor (SFR), plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor (LFR). [2]

Tähtsaimateks töödeks võib pidada tuumalõhustusreaktorite ja termotuumasünteesi reaktori prototüübi projekte. Tuumalõhustusreaktorid võimaldavad hetkel töötavatest reaktoritest 50-60 korda suuremat energia saadust, samast kogusest uraanist. Antud reaktor on üliohtu standardkonstruktsiooniga, säästlik ja töötab kiiretel neutronitel. Suletud tuumkütusetsükli tagatakse väiksemad ja vähemohtlikud radioaktiivsete jäätmete kogused ning kõrgtemperatuurne soojus vesiniku tootmiseks ja muudeks tööstusvajadusteks. Termotuumasünteesi reaktor võimaldaks keskkonnasõbralikku ja ammendamatu energiaallikat. Tuumasünteesi käigus tekib tuumalõhestumisega võrreldes oluliselt lühema poolestusajaga ja vähemohtlikke radioaktiivseid jäätmeid. Iga vett ja selles sisalduvat deuteriumi omav riik saaks justkui tuumkütuse omanikuks. [8]

Praegusel hetkel on uudsete tulevikureaktorite arendustöö aktiivselt käimas. Töödega loodetakse lõpule jõuda enne 2030. aastat. [1]

Tabel 4.1 IV põlvkonna reaktorite parameetrid [1]

	Kütus	Soojuskandja	Temperatuur °C	Rõhk, MPa	Võimsus MW _e
MSR	UF-soolad	Flouriidsoolad	700-800	Madal 7 MPa	1000
SCWR	UO ₂	Vesi	510-550	Ülekriitiline 25 MPa	1700
VHTR	UO ₂ Prismaatilised või sfäärilised	Heelium	900-1000	Kõrge 7-15 MPa	250-300
GCFR	²³⁸ U+ ²³⁵ U või ²³⁹ Pu	Heelium	850	Kõrge 7-15 MPa	1200
SFR	²³⁸ U ja MOX	Naatrium	550	Madal 7 MPa	300-1500 1000-2000
LFR	²³⁸ U+ ²³⁵ U või ²³⁹ Pu	Plii või plii- vismut	480-800	Madal 7 MPa	20-180 300-1200 600-1000

4.1. Sulasoolareaktor (MSR)

Sulasoolareaktori arendus on tulevikureaktorite programmi osa. Reaktori võimsuseks on plaanitud 1000 MW_e. [2] Esimesed kogemused sulasoolareaktorite tööst on USA-l ja Venemaal pärit juba eelmisest sajandist. Kütusena kasutatakse vedela naatriumi ja tsirkooniumflouriidide segus lahustatud uraankütust. Sulasoolkütust saab kasutada nii kütusena soojuse tootmiseks kui ka jahutusvedelikuna. [18] Sulasoolkütus peab vastama tuumkütuse eriomadustele ning soojus- ja transporditingimustele. Voolates läbi grafiitsüdamiku kanalite, eraldab vedel tuumkütuse segu soojust. Konstruksioonilt on reaktor kolmekontuuriline. Esimeses madalrõhu kontuuris voolav soojuskandja, temperatuuriga 700-800 kraadi, annab oma soojuse vahesoojusvaheti kaudu teisele kontuurile ning kolmandas kontuuris toimub elektri tootmine. [1]

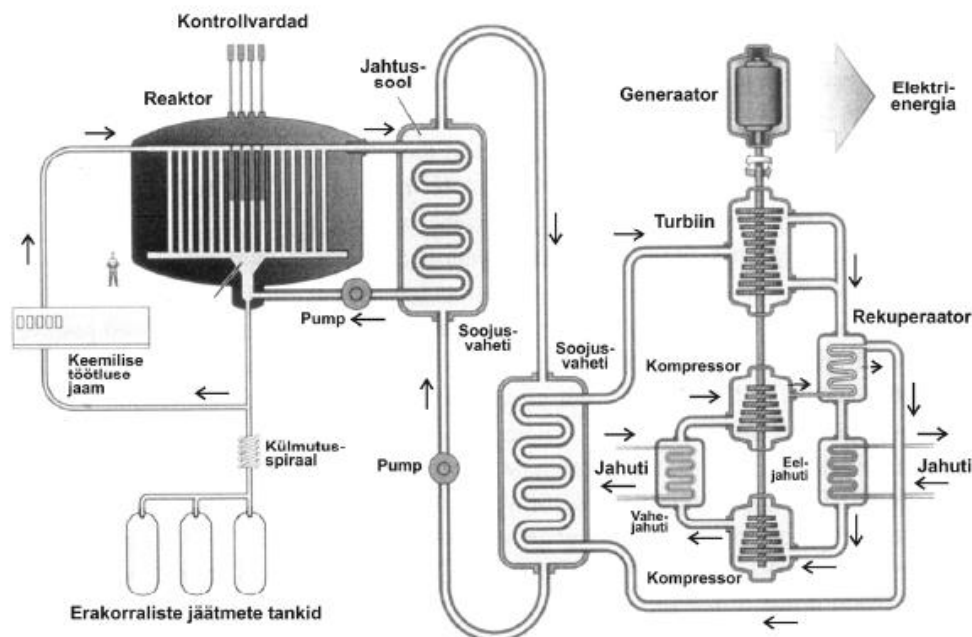
Sulasoolareaktoritel on mitmeid eeliseid. Reaktorit on võimalik kasutada vesiniku tootmiseks, elektritootmiseks ja aktiniidide käitlemiseks. Tegemist väga jätkusuutliku reaktoriga. Kuna

kasutatakse vedelat kütust, siis on võimalik lõhustussaadusi eemaldada reaktori töötamise ajal. Antud teguviis tagab kütuse parema kasutusteguri. Samuti toimub tooriumi utilisatsioon ning puuduvad neutronite kaod struktuuri. [18] Majanduslikult ei ole tegemist kõige odavama reaktoritüübiga, kuna reaktoril on keerukad abisüsteemid, mis peavad säilitama kütuse ja jahutusvedeliku normaalse töö. [2] Olenemata sellest paranevad ka majanduslikud näitajad. Reaktoreid on võimalik uue kütusega tankida töötamise ajal, ei ole vaja kütuseelementide tootmisseadmeid ning reaktor töötab kõrgel temperatuuril ja madalal rõhul, mistõttu on nad ehituselt väiksemad. [18] Suureneb ohutus, kuna reaktor töötab madalal rõhul ning paigaldatud on spetsiaalsed mahuti rikkemehhanismid avariide leevendamiseks. [18] Paraneb ka keskkonasäästlikkus, kuna ühe miljardi kWh tootmiseks kulub kõigest 50kg U-238 ja Th-232 [8]

Siiani on sulasoolareaktorid saanud väga positiivset tagasisidet. Nad on üsna unikaalsed, kuna kasutavad vedelat tuumkütust. Suurimaks plussiks on reaktoritel väike kütusevajadus briiderina töötamisel ja seega endale tuumkütuse tootmisel. Väga edukalt saab kasutada tooriumi, mis on peamine alternatiiv uraanile. Antud reaktorite kasutamiseega väldime tulevikus probleeme energiavarude pärast. Arendamisel on erinevad sulasoolareaktorite tüübid. [18]

Tabel 4.2 Sulasoolareaktorite arendused [1].

Reaktor	Võimsus MW_e	Riik
MSR (IV põlvkond)	1000	GIF-i liikmed
URS	625	US
MSR-NC	470	Venemaa
FUJI	100	Jaapan



Sele 4.1 Sulasoolareaktor [1].

4.2. Ülekriitilise veega jahutatav reaktor (SCWR)

Ülekriitiliste parameetritega reaktorsüsteemidega on tegeletud viimased viiskümmend aastat ning viimased arendused tuginevad CANDU-süsteemile. Antud reaktoritüüp on kavandatud peamiselt elektritootmiseks. Võrreldes praeguste kergveereaktoritega, võimaldab ülekriitilise veega jahutatava reaktori soojustõhusus oluliselt parandada majandusnäitajaid. Tõrgeteta töö tagamiseks on oluline töötada välja uued materjalid ja struktuurid, et vältida korrosiooni, kuna antud jaam töötab kõrgete parameetritega. [2]

Ülekriitilise olekuga on tegemist siis, kui aine rõhk ja temperatuur on selle kriitilistest parameetritest kõrgemad. Vee kriitilise punkti olekuparameetriteks on temperatuur üle 374,15 °C ja rõhk üle 22,129 MPa. Kogu kontseptsioon põhineb ühekordsel kütusetsükliil. Kuna reaktor töötab ülekriitilises olekus, siis siseneb ja väljub vesi sealt faasi muutmata. Kuna puudub vajadus auru-vee-eraldusseadmete jaoks, lihtsustub konstruktsioon ja paranevad majandusnäitajad. Tegemist ühekontuurilise süsteemiga, kus soojuskandja siseneb otse turbiini. [8]

Reaktori algvõimsuseks on kavandatud 1700MW_e, rõhk 25MPa ning väljuva soojuskandja temperatuur 510-550 °C. Võrreldes praeguste veereaktoritega kasvab soojusefektiivsus kolmandiku võrra. [8]

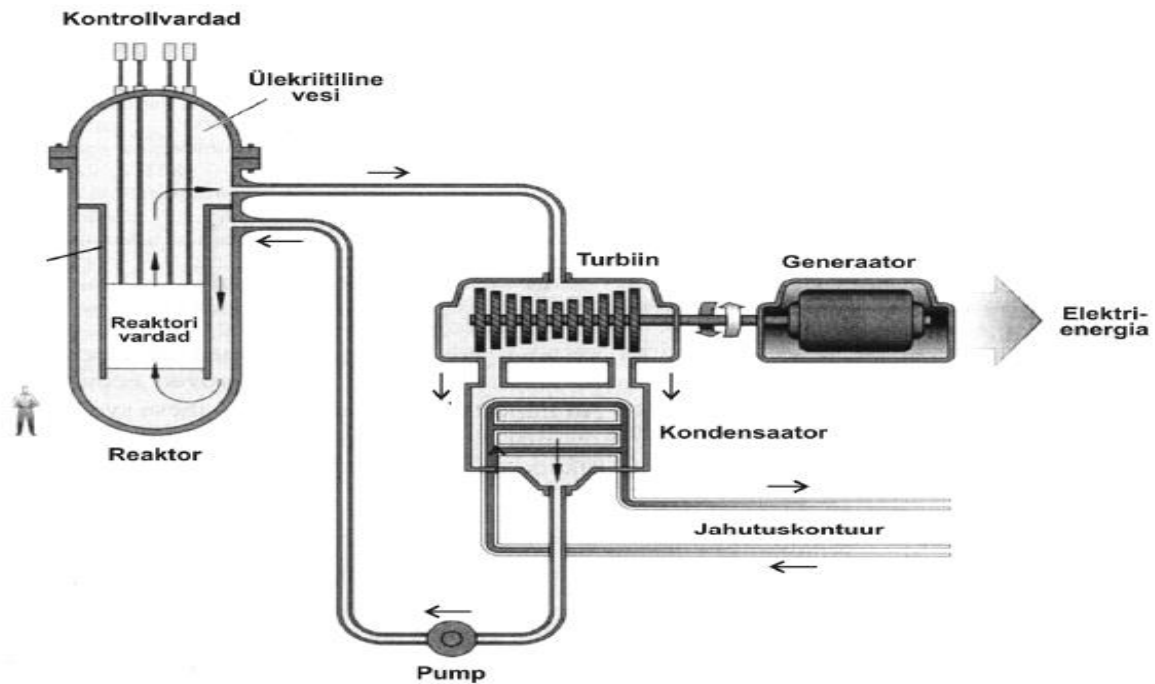
Tabel 4.3 Ülekriitilise veega jahutatavate reaktorite arendused [2].

Reaktor	Võimsus MW _e	Riik
Kergevesi (tavaline vesi)		
SCWR (IV põlvkond)	1700	GIF-i liikmed
SCLWR	1000	Jaapan
B-500 SKDI	515	Venemaa
Raskevesi (D ₂ O)		
CANDU SCWR (IV põlvkond)	~1000	Kanada
CANDU X	350-1150	Kanada

Ülekriitilise veega jahutatavat kergveereaktorit (SCLWR) võib pidada majandusliku konkurentsivõime seisukohalt üheks parimaks. Arendamisel on reaktor, mis töötab kiiretel neutronitel ning kütusena kasutatakse MOX-kütust, rikastusastmega kuni 12%. Jaapanis arendatakse praegu antud reaktorit ning see vastab IV põlvkonna kriteeriumitele. Antud reaktori algvõimsus on 1000 MW_e, rõhk 25 MPa ning temperatuur reaktorist väljumisel 500 °C. [2]

Venemaal on väljatöötamisel reaktor B-500 SKDI, mida peetakse IV põlvkonna reaktoriks. Antud reaktor töötab soojuskandja loomulikult ringlusel ning sellesse on integreeritud ülekriitilise rõhuga reaktorisüsteem. Võimsuseks on plaanitud 515 MW_e. [2]

Kanadas on väljatöötamisel IV põlvkonna raskeveereaktor CANDU SCWR. Reaktor on loodud peamiselt elektri –ja vesinikutootmiseks, kuid vastavalt nõudlusele on võimalik kasutada ka kõrgtemperatuurset protsessisoojust. Reaktorit on võimalik kasutada ka vee magestamiseks. Antud reaktor on kõigest vaheetapiks CANDU X reaktorile, mis on järjekorras teine rõhutorudega reaktor CANDU-reaktorite peres. CANDU X reaktori eripäraks on genereeritava võimsuse paindlik tase vahemikus 350-1150 MW_e. [2]



Sele 4.2 Ülekriitilise veega jahutatav reaktor [1].

4.3. Ülikõrgtemperatuurine gaasjahutusega reaktor (VHTR)

Gaasjahutusega reaktoreid on uuritud paljudes riikides. Erinevate riikide kogemustele tuginedes soovitatakse välja arendada IV põlvkonna gaasjahutusega reaktor. Vanemaid gaasjahutusega reaktoreid kasutati peamiselt sõjaotstarbeks. Esialgu kasutati kütusena looduslikku uraani ning hiljem juba rikastatud uraanoksiidi. Varasemad katse- ja prototüüpreaktorid olid Dragon, AVR ja Peach Bottom. Suurbritannias töötanud Dragon reaktor kasutas soojuskandjana heeliumi ning sealt saadi olulisi andmeid heeljumjahutusel põhinevate reaktorite arendamiseks. AVR reaktor oli aluseks praeguse veeriskihtmoodulreaktori väljatöötamisel. [2]

Gaasjahutusega reaktorite soojusvõimsus on 350-450 MW_s ja elektrivõimsus 300 MW_e. Kasutegurid võivad kohati ületada 50%, kui kasutatakse ära kõrgtemperatuurse gaasiturbiinitehnoloogia eeliseid. Olenemata mitmetest eelistest on antud tüüpi reaktorite südamikü võimsustihedus kergveereaktoritega võrreldes oluliselt madalam. [2]

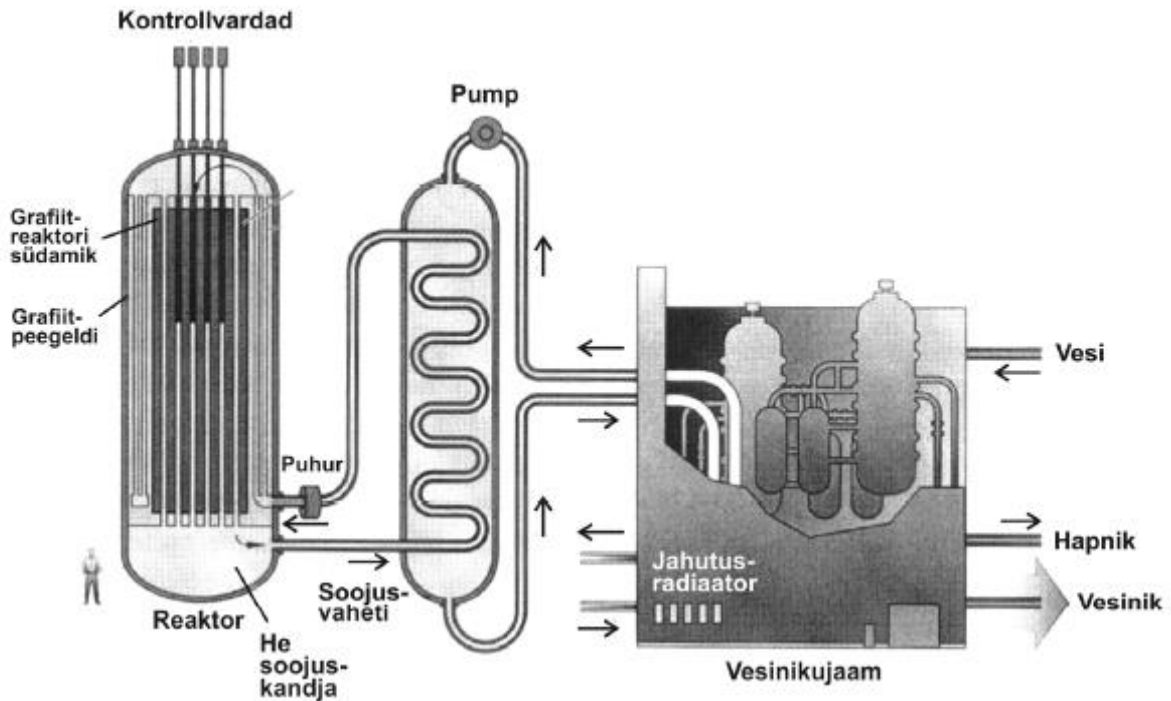
Tabel 4.4 Ülikõrgtemperatuursete gaasreaktorite arendused. [2]

Reaktor	Võimsus MW_e	Riik
VHTR (IV põlvkond)	~300	GIF-i liikmed
GT-MHR	293	USA/Venemaa/Prantsusmaa/Jaapan
B-500 SKDI	515	Lõuna-Aafrika/Konsortsium

Ülikõrgtemperatuurne gaasjahutusega reaktor (VHTR) on loodud eelkõige ülitõhusaks elektri tootmiseks. Võimalust nähakse ka vesiniku tootmises vee termokeemilise lagundamise või kõrgtemperatuurse elektrolüüsi abil. Põhireaktoriks on plaanitud 600 MW_t soojusvõimsusega heeliumjahutusega reaktor. Soojuskandja temperatuur on minimaalselt 1000 °C ning kasutegur vähemalt 50%. Sellise kasuteguriga reaktor võimaldab toota kuni 200 tonni vesiniku ööpäevas. Praegusel hetkel piirab kõrgtemperatuursete reaktorite kasutuselevõttu eelkõige uute kõrgtemperatuursete materjalide, sulamite, keraamiliste ja komposiitmaterjalide puudus. [2]

GT-MHR-reaktori ühe mooduli soojusvõimsus on 600 MW_s, netoelektrivõimsus 278 MW_e ning netokasutegur 46%. Soojuskandja kõrge väljumistemperatuur loob võimalused vesiniku tootmiseks. Antud reaktor rahuldab IV põlvkonna nõudmised: passiivne ohutus, ökonoomsus, parem kütusekasutus ja vähem jäätmeid. [2]

PBMR-reaktor töötab Braytoni ringprotsessil, kasuteguriga umbes 45%. Reaktori seadmed on küll suhteliselt väikese võimsusega 110-120 MW_e, kuid heade majandus- ja ohutuskarakteristikutega. Paindlik konstruktsioon võimaldab seda kasutada peaaegu kõikjal. Kütuseks sobib nii toorium kui ka uraan. Sellise reaktori ehitusperiood on ligikaudu 2 aastat. [2]



Sele 4.3 Ülikõrgtemperatuurine gaasjahutusega reaktor [1].

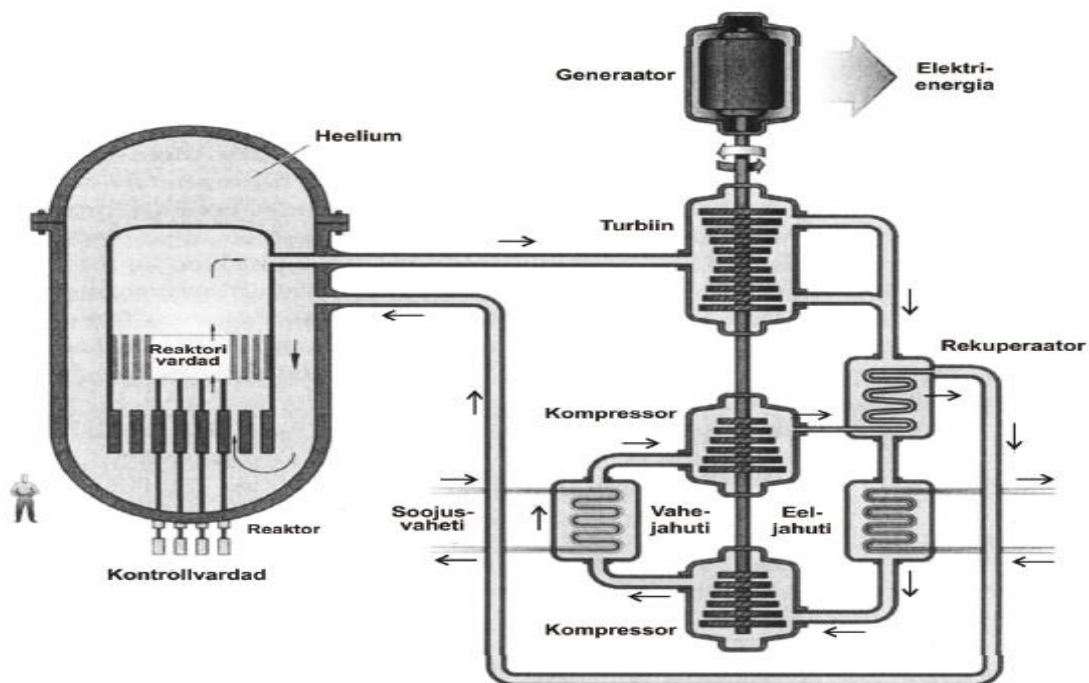
4.4. Gaasjahutusega kiire reaktor (GFR)

Olemasolevate gaasjahutusega briiderreaktorite tehnoloogia põhineb AGR-tehnoloogial. Soojuskandjana kasutatakse sellisel juhul süsinikdioksiidi. Gaasjahutusega kiire reaktori kontseptsioon tugineb aga heeliumitehnoloogial. Põhireaktori elektrivõimsuseks on plaanitud 288 MW_e. [1]

Reaktor töötab ülikõrgel temperatuuril, 850 °C, mistõttu reaktoril on eeldused tõhusaks elektritootmiseks, aktiniidide käitlemiseks ja vesiniku termokeemiliseks tootmiseks. Heelium juhitakse vahetult elektrigeneraatoriga seotud gaasiturbiini, mis töötab konstantse rõhu tsüklis. Tuumkütusena on kasutusel mitmesugused lõhustuvaid või fertiilseid materjalid keraamilise komposiidina. Kasutatud tuumkütus töödeldakse kohapeal ümber, et seda saaks uuesti kasutada. Antud reaktorid vähendavad oluliselt pikaealiste radioaktiivsete jäätmete kogust. [8]

Tabel 4.5 Gaasjahutusega kiired reaktorid [1].

Reaktor	Võimsus MW _e	Riik
GFR (IV põlvkond)	288	GIF-i liikmed
ETGBR	1320	Suurbritannia
GCFR	375	USA
GBR 1-4	1000-1200	Euroopa



Sele 4.4 Gaasjahutusega kiire reaktor [1].

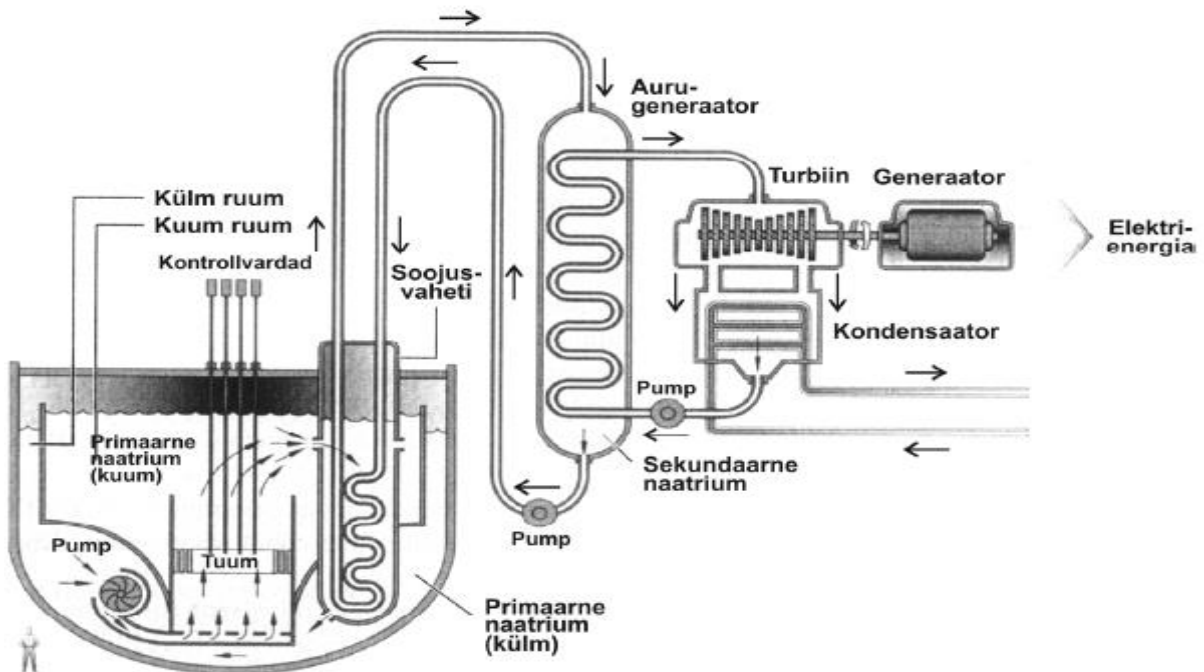
4.5. Naatriumjahutusega kiire reaktor (SFR)

Naatriumjahutusega kiirete reaktorite kasutus kogemust on kogunenud kaheksas riigis kokku üle 300 reaktoraasta. Venemaal asuvat Belojarski tuumajaama kiiret reaktorit peetakse üheks töökindlamaks. [8]

Antud reaktori võimsus võib olla vahemikus 150-500MW_e või 500-1500 MW_e. Olenevalt reaktori võimsusest on kaks erinevat tuumkütusesükli. Keskmise elektrivõimsuse korral toimub aktiniidide ja metallilise tuumkütuse pürometallurgiline ümbertöötlemine kohapeal. Suure võimsusega reaktorite korral toimub tavalise MOX-kütuse ümbertöötlemine vastavates asutustes. [8]

Naatriumjahutusega kiire reaktor sobib suure radioaktiivsusega jäätmete käitlemiseks. Ohutuse tagavad esimese kontuuri atmosfäärirõhk, esimese kontuuri ja vesi-aurukontuuri vahepealse naatriumkontuuri olemasolu ja pikk soojusinerts. [8]

Tuumkütusena võib kasutada plutooniumi, metallist uraani, tsirkooniumi ja aktiniidide sulamit. Soojuskandjaks on esimeses kontuuris atmosfäärirõhul olev metalliline naatrium temperatuuriga 550 °C. Teises kontuuris ehk aurugeneraatoris on soojuskandjaks naatrium, mille vahendusel toodetakse turbiini tarbeks auru. [1]



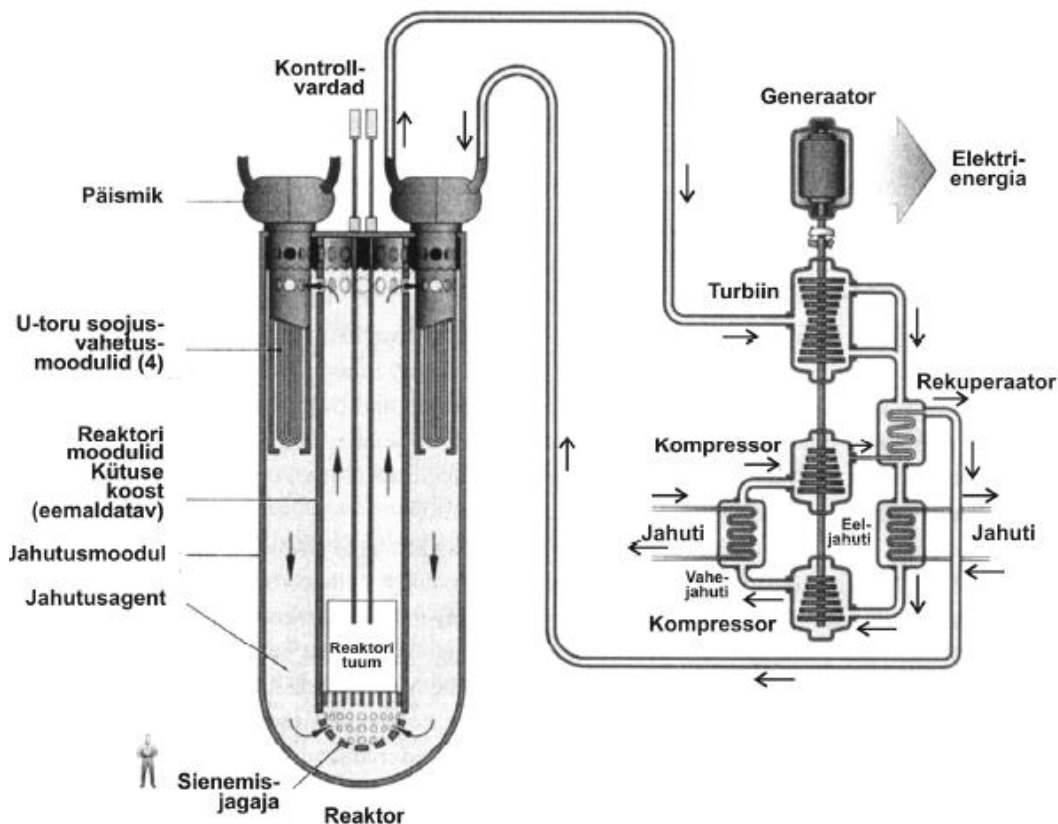
Sele 4.5 Naatriumjahutusega kiire reaktor [1].

4.6. Plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor (LFR)

Varasemalt on katsereaktorite kujul ehitatud valmis pliijahutusega reaktorid STAR ja BREST ning plii-vismutjahutusega LSPR. Suurimat kogemuste pagasit plii-vismutsulamiga reaktoriga omab Venemaa. [8]

Plaanitakse ehitada nii 50-150 MW_e võimsusega „valmispatareisid“ kui ka 300-400MW_e standardmooduleid. Esimesed reaktorid ehitatakse väiksemate elektrivõrkude jaoks. Sobilik arengumaadele, kes ei taha oma tuumaenergeetika tarvis keerukaid tuumkütuse käitlemise rajatisi. Suurimaks on kavandatud 1400 MW_e võimsusega üksikjaam. [8]

Antud reaktori soojuskandjaks on loomuliku konvektsiooniga madalal rõhul liikuv sulametall, milleks on kas plii- või plii- ja vismutsulam temperatuuriga 550 °C. Võimalik on sulametalli temperatuuri tõsta 800 °C-ni, kui suudetakse lahendada materjaliprobleemid. Sel juhul tagatakse peale elektritootmise ja aktiniidide käitlemise ka vesinikutootmine. Tuumkütuseks on metalliline uraan või selle nitriit, mis sisaldab lõhustuvaid materjale ja aktiniide. [8]



Sele 4.6 Plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor [1].

5. TULEVIKUREAKTORITE OHUTUS

Tuumajaelektrijaamas elektri tootmisega kaasnevatest võimalikest ohtudest ollakse teadlikud juba alates esimeste reaktorite rajamisest. Nii nagu ka teistes tööstusharudes, on ka tuumajaamade rajamisel peamine eesmärk minimaliseerida õnnetuste juhtumise tõenäosust ning vältida suuri õnnetusi, mille tagajärjel võivad inimesed ning keskkond kannatada. 33 riigis on pea 15 000 reaktori-aasta jooksul toimunud kõigest kolm suurt õnnetust. Enam kui kuuekümne aastane töökogemus näitab, et tegemist on ohutu elektrienergia tootmisega. Avariide toimumise tõenäosus tuumaelektrijaamas on väike ning käib pidev töö, et seda veelgi vähendada. Võrreldes teiste laialt aktsepteeritud riskidega on terrorirünnaku või avariide tagajärjed väikesed. [10]

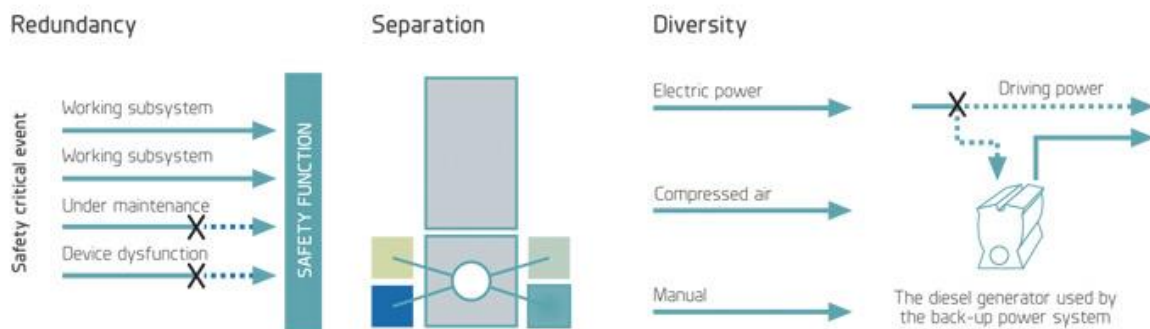
Tuumaenergia valdkonnas on ohutus väga lähedalt seotud turvalisusega ning ettevaatlikkusega. Ohutus keskendub mittetahtlikele tingimustele või sündmustele, mis võivad viia radioaktiivse kiirguse vabastamiseni. Turvalisuse eesmärk on vältida tahtlikku tuumaenergia või radioaktiivsete ainete väärkasutust, eesmärgiga kahju tekitada. Ettevaatlikkuse eesmärgiks on tõkestada riikide ebaseaduslikku tuumarelvade omandamist, seoses tuumaseadmete ja materjalide kasutamisega. [10]

Tuumaenergia ohutustehnikanormide näol on tegemist ainulaadse tööstusharuga. Tuumaenergeetika ohutuse tagamiseks on palju tehtud. [8] Aina kasvavad ohutusnormid ja standardid kindlustavad selle, et tuumaenergia ohutu ja usaldusväärne kasutamine jätkub. [2] Euroopa Liidu seadmetes ei ole praeguse hetkeni toimunud ühtegi tõsisemat avariid. [8] Praegusel momendil töötab suurel hulgal reaktoreid, mis on väga erineva vanusega ja väga erinevate konstruktsioonidega. [2] Enamik praegu töötavatest II põlvkonna reaktoritest on ohutuse suurendamiseks täiustatud ning III põlvkonna reaktoritel on juba lihtsustatud hooldussüsteemid ja passiivsed ohutussüsteemid. [8] Mõningatel juhtudel piisab üksikute elementide uuendamisest, et tagada seadmete kõrgem ohutus. [2]

Tuumaenergeetika ohutus sõltub samadest tingimustest nagu iga teinegi suuremastaabiline ja keeruline tehnoloogia. [10] Tuumareaktorite projekteerimisel arvestatakse kõikvõimalike avariiohtudega. Ehitamisel kasutatakse sertifitseeritud seadmeid ning kontrollitakse igas valmimisastmes seadmete ja detailide kvaliteeti. Peale jaama käivitamist toimub pidev reaktori kontrollimine, personali koolitamine ja eksploatatsioonikogemuste analüüs. Turvasüsteemidele kulub ligi veerand kõikidest kapitalikuludest. [1]

5.1 Ohutussüsteemid

Ohutussüsteemid on loodud toime tulema erinevate õnnetusjuhtumitega, mis toimuvad kas tuumaelektrijaamades või väljaspool seda. Arvestatakse isegi sündmustega, mille juhtumise tõenäosus on nii väike, et tõenäoliselt seda tuumareaktori elueal ei esinegi. Õnnetuse põhjusteks võivad olla mitmesugused anomaaliad, talitlushäired või inimlikud põhjused. [19] Reaktoritel on mitmesuguseid ohutussüsteeme, mille funktsioonideks on reaktori seiskamine, reaktori jahutamine ning radioaktiivsete saaduste leviku tõkestamine. Samuti on olemas süsteemid kütusevarraste kahjustuste avastamiseks ja sealt radioaktiivse saaste jahutusvette väljumise vältimiseks. [1] Piisava ohutuse saavutamiseks toimub pidev ennetustöö, jälgimine ning arendustöö võimalike avariide tagajärgede leevendamiseks. [10] Ohutussüsteemide usaldusväärsus on tagatud mitmete paralleelsete seadmete ja süsteemide abil. Mõne komponendi rikke korral vahetatakse need automaatselt paralleelsete seadmete ja süsteemidega. [26]



Sele 5.1 Turvaelemendid ja süsteemid [26].

Ohutussüsteemid jagunevad passiivseteks ja aktiivseteks. Aktiivsed ohutussüsteemid on levinud eelkõige II põlvkonna reaktoritel. Funktsioonide täitmiseks peavad olema tagatud teatavad tingimused. Sellised avariid vältimise ja lokaliseerimise süsteemid on küllaltki keerukad ning nende töövõime sõltub muude seadmete tööst. Antud ohutussüsteemi korral mängib suurt rolli inimtegevus, seega ei saa antud reaktorid tagada kunagi absoluutset ohutust. [1]

Passiivseid ohutussüsteeme hakati laialdasemalt kasutama peale seda, kui nad tunnistati ekspertide poolt tõhusaks ja majanduslikult sobivaks. [19] Passiivne ohutussüsteem põhineb

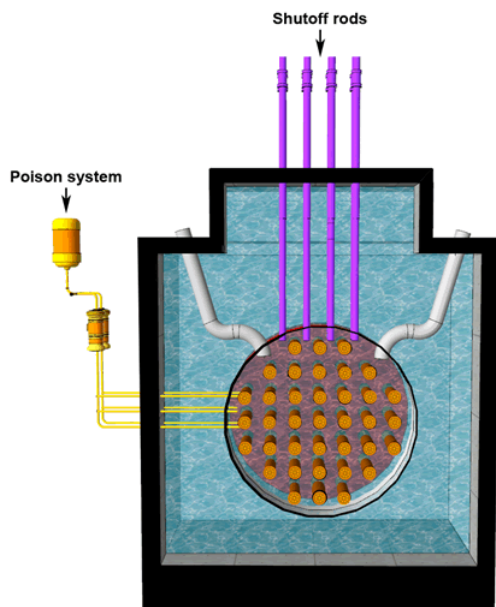
loomulikel füüsikalistel nähtustel. Selleks võib olla gravitatsioon, rõhkude vahe või loomulik konvektsioon temperatuuride vahe tõttu. Selle süsteemi toimimiseks ei ole vaja muude seadmete ja süsteemide tööd. Antud ohutussüsteemi korral ei mängi rolli inimtegevus. [1] Tulevikus kavandatavates passiivsetes reaktorites kasutatakse praeguste reaktorite tehnoloogiat, kuid toimuvad olulised muutused konstruktsioonis ja disainis. Tulevikureaktorite ohutus sõltub täielikult passiivsetest ohutussüsteemidest. [19]

5.1.1. Reaktori seiskamine

Normaalsete töötingimuste korral toimub reaktori töö reguleerimine reaktori südamikus aset leidva ahelreaktsiooni reguleerimisega. Vastavalt vajadusele ahelreaktsiooni suurendatakse, vähendatakse või see peatatakse üldse. Reaktori ahelreaktsiooni ning seega ka võimsust reguleeritakse liikuvate reguleerimisvarrastega ja veetaseme muutmisega vertikaalsetes mahutites. Tundlikud andurid jälgivalt pidevalt reaktori tööd, mõõtes samal ajal temperatuuri, reaktori võimsust ja rõhku. Vajadusel saab reaktoreid ohutult ning automaatselt välja lülitada kõigest sekundite jooksul. [13] Tuumajaamad on varustatud spetsiaalsete anduritega, mis nad automaatselt välja lülitaks maavärina korral. Tegemist on väga tähtsa meetmega mitmes riigis. [10]

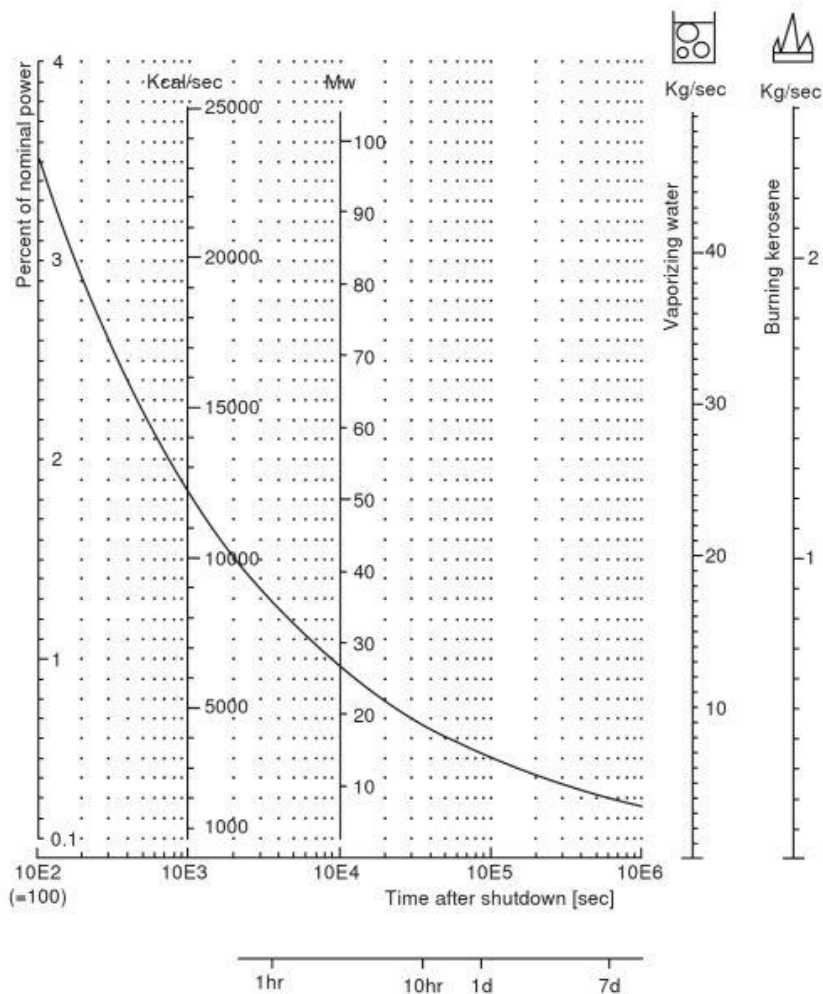
Reaktorite kaitse süsteemi eesmärk on koheselt lõpetada tuumareaktsioon. Ahelreaktsiooni katkedes lõpeb soojuse tootmine. [22] Kõikidel uuematel tuumareaktoritel on kaks iseseisvat, kiire toimega ning sama tõhusat seiskamise süsteemi. [13] Esimene süsteem koosneb metallist varrastest, mis sisenedes reaktori südamikku, neelavad neutroneid, et peatada kiiresti tuumareaktsioon. [22] Teine süsteem laseb reaktorisse vedelikku, mis neelab neutroneid ning lõpetab viivitamatult ahelreaktsiooni. Mõlemad süsteemid töötavad passiivselt, ilma operaaatori sekkumiseta ning ilma elektritoiteta. Vajadusel on süsteeme võimalik ka käsitsi aktiveerida. Antud süsteemid on ohutuse seisukohalt tähtsal kohal, mistõttu toimub nende regulaarne kontrollimine. [13]

Reaktori sulgemisel jääb see suletuks seni, kuni see juhtimispuldist taaskäivitatakse. Tegemist on tähtsa ohutusfunktsiooniga, kuna see väldib reaktori iseseisvat taaskäivitumist peale sulgemist. [13]



Sele 5.2 Reaktori seiskamise süsteemid [13].

Peale reaktori sulgemist väheneb toodetava energia hulk kiiresti, kuid tuumkütus jätkab sooja eraldamist ka peale ahelreaktsiooni peatamist ning seetõttu tuleb seda jahutada. Selle jaoks on spetsiaalsed jahutussüsteemid, mis võivad olla nii passiivsed kui ka aktiivsed. Tekkiv jääksoojus on kõigest väike osa soojusest, mis toodeti tuumareaktori normaalse töö käigus (Sele 5.3). [19]

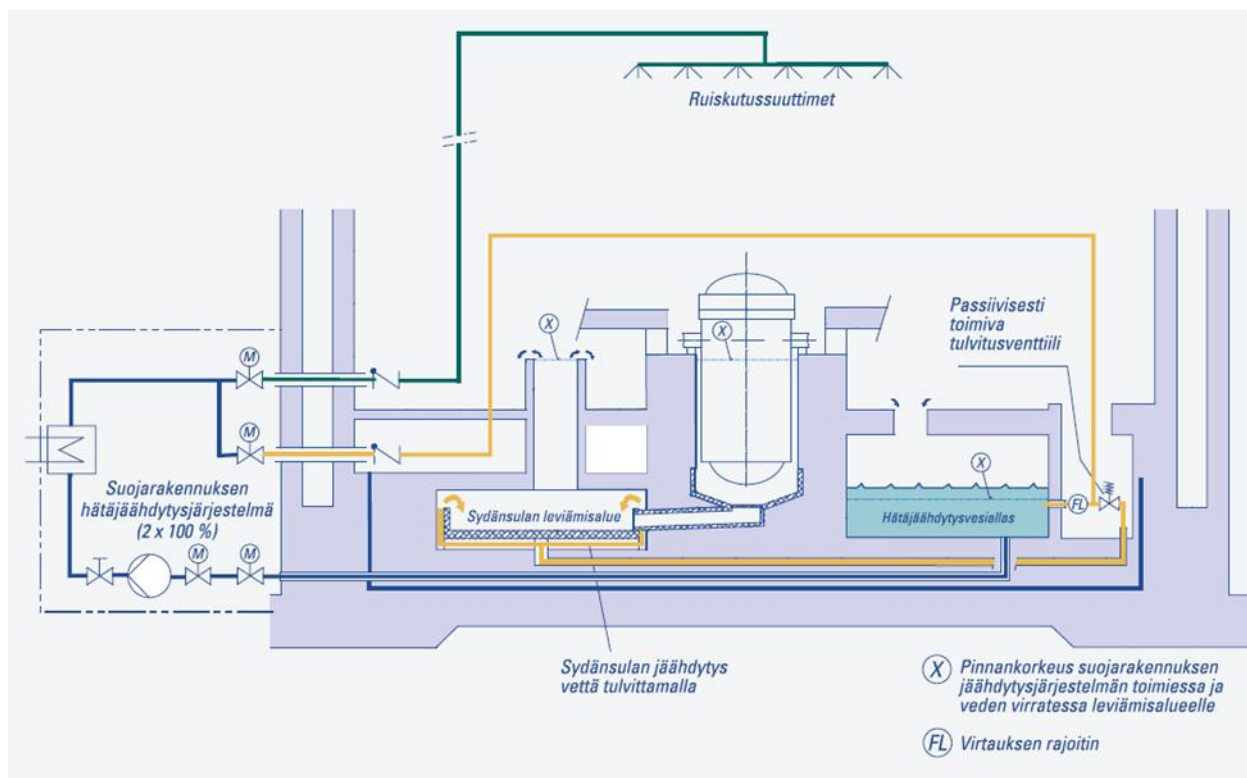


Sele 5.3 Soojuse eraldus reaktori seiskamisel [19].

5.1.2. Reaktori jahutamine

Reaktori jahutamisel on esmatähtis tarbeveesüsteem, mis tsirkuleerib vett. Tegemist on väga olulise süsteemiga ohutuse seisukohalt, kuna see jahutab jaama soojusvaheteid ning teisi komponente. Võimaluse korral kasutatakse looduslikest veekogudest pärit vett, vastasel juhul tuleb vett tsirkuleerida läbi gradiiri, et tagada vajalik jahutus. [22]

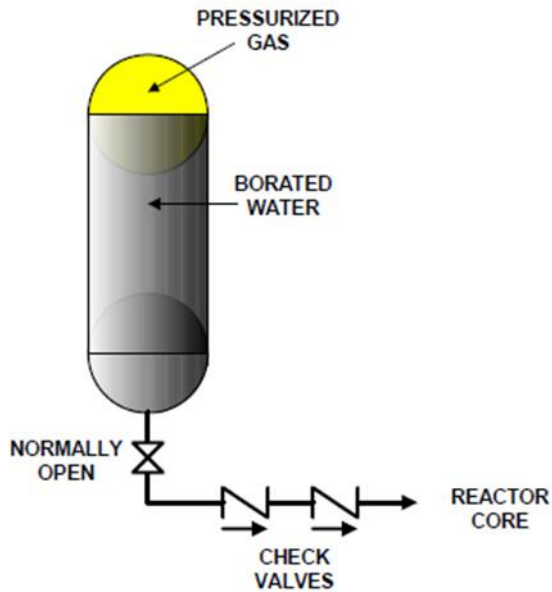
Avariijahutussüsteemid on mõeldud tuumareaktori ohutuks seiskamiseks õnnetuse korral ning need koosnevad mitmetest alamsüsteemidest, millest igaüks on määrava tähtsusega. Antud süsteemid on võimelised reageerima väga erinevatele olukordadele. [22]



Sele 5.4 Reaktori tuuma jahutussüsteem Olkiluoto 3 näitel [14].

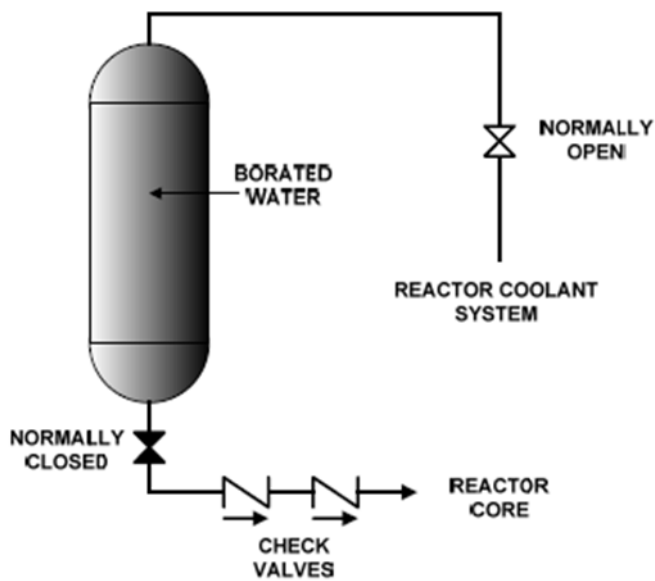
Reaktori jääsoojuse eemaldamiseks kasutatakse mitmesuguseid passiivsüsteeme. Passiivsete süsteemide kasutamine võimaldab vähendada kulusid, mis on seotud aktiivsete ohutussüsteemide paigaldusega, hooldusega ja käitamisega. Aktiivsed süsteemid vajavad tihti peale mitmekordseid pumpeid ja elektriseadmeid. Passiivseid ohutussüsteeme peetakse palju efektiivsemaks ja ohutumaks ning seetõttu plaanitakse antud süsteeme rakendada uute reaktorite rajamisel. [23]

Südäniku jahutamiseks kasutatakse rõhu all olevaid veemahuteid, mis moodustavad ühe osa avariijahutussüsteemist. [23] Passiivsüsteemi korral on kõrgrõhuline mahuti 75% ulatuses täidetud boorveega ning ülejäänud osa on rõhu all olev lämmastik või mõni teine inertgaas. [1] Antud mahuti on reaktori jahutussüsteemist isoleeritud mitmete kontrollventiilidega, mida tavalises olukorras hoitakse suletuna rõhkude erinevuse tõttu reaktori tuumas ja mahutis. [23] Soojuskandja lekke korral langeb reaktori jahutussüsteemi rõhk ning automaatselt avatakse ventiilid ja lastakse boorvesi reaktorisse. [1] Tegemist on tavaliselt esimese ohutussüsteemiga, kuna seda on võimalik kasutada juba siis, kui reaktorianum on veel kõrge surve all. [22]



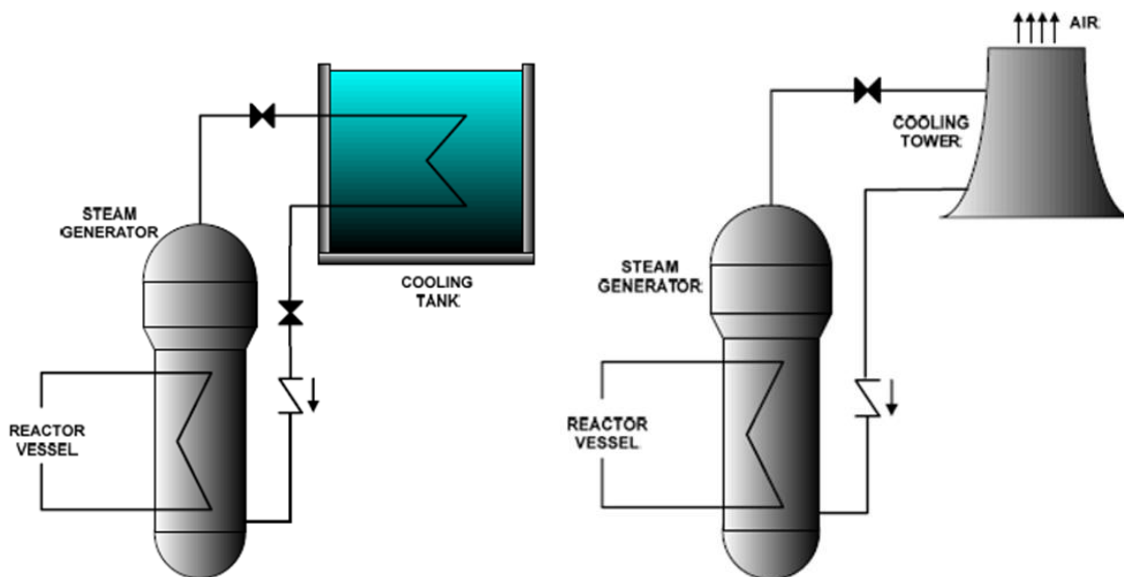
Sele 5.5 Eelsurvestatud mahuti südramiku jahutamiseks [23].

Südramiku jahutamiseks kasutatakse ka tõhusat loomuliku ringlusega mahutit. Antud süsteemi on juba kasutatud mitmetel arenenud reaktoritel. Mahuti, mis on täidetud boorveega, on ühendatud reaktoriga nii ülevalt kui ka alt, pakkudes jahutust süsteemirõhul (Sele 5.5). Tavalises tööolukorras on mahuti reaktorist isoleeritud, kasutades spetsiaalseid ventiile. Vedelikule mõjub alati kogu süsteemi rõhk ülemise ühenduse kaudu. Avarii korral avaneb alumine isolatsiooniventiiil, et tagada loomulik tsirkulatsioon läbi reaktori. Vähendamaks torude hulka, on antud mahuti ühendatud juhutusvedeliku torudega. Mitme avarii samaaegsel toimumisel rakendatakse kõigepealt ühte süsteemi, kuni selle tühjenemiseni, ning alles seejärel minnakse automaatselt üle teisele süsteemile. [23]



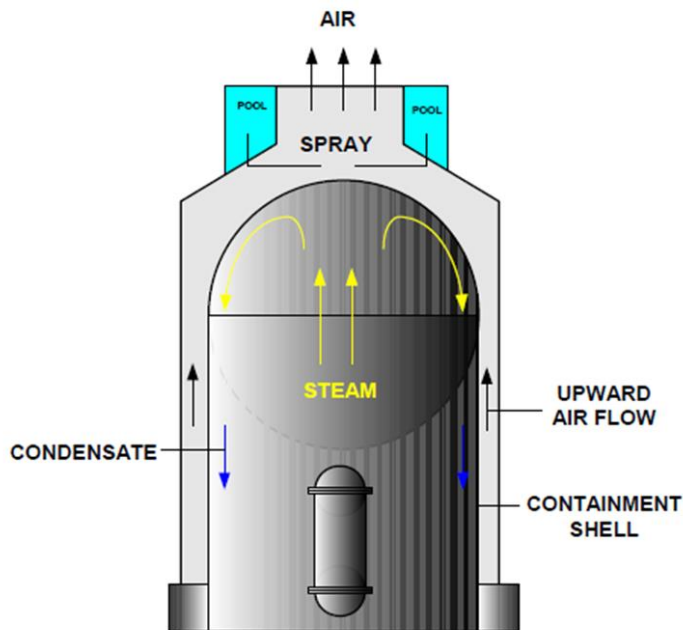
Sele 5.6 Loomuliku ringlusega mahuti südamiku jahutamiseks [23].

Täiustatud reaktoritel toimub jääsoojuse eraldamine passiivse ringlusega läbi aurugeneraatori ja spetsiaalse soojusvaheti. Soojusvahetiks võib olla nii gradiir kui ka bassein. [23]



Sele 5.7 Jääsoojuse eemaldamine kasutades passiivselt jahutatud aurugeneraatorit [23].

Passiivne korpuse pihustamissüsteem rakendab loomuliku tõmbega õhkjahutust. Kui aur puutub kokku terasest sisepinnaga, siis see kondenseerub. Soojus kandub läbi korpuse isoleeritud seina välisõhku. Jahutusbassein asub korpuse ülaosas, mis gravitatsiooni abil pihustab külma vett, et vajadusel reaktorit jahutada. Õhuvoolum silindrilise ruumi jahutamiseks saavutatakse korstna efektiga. [23]



Sele 5.8 Korpuse jahutamine ja rõhu summutamine kasutades passiivset korpuse pihustamist ja loomuliku tõmbega õhku [23].

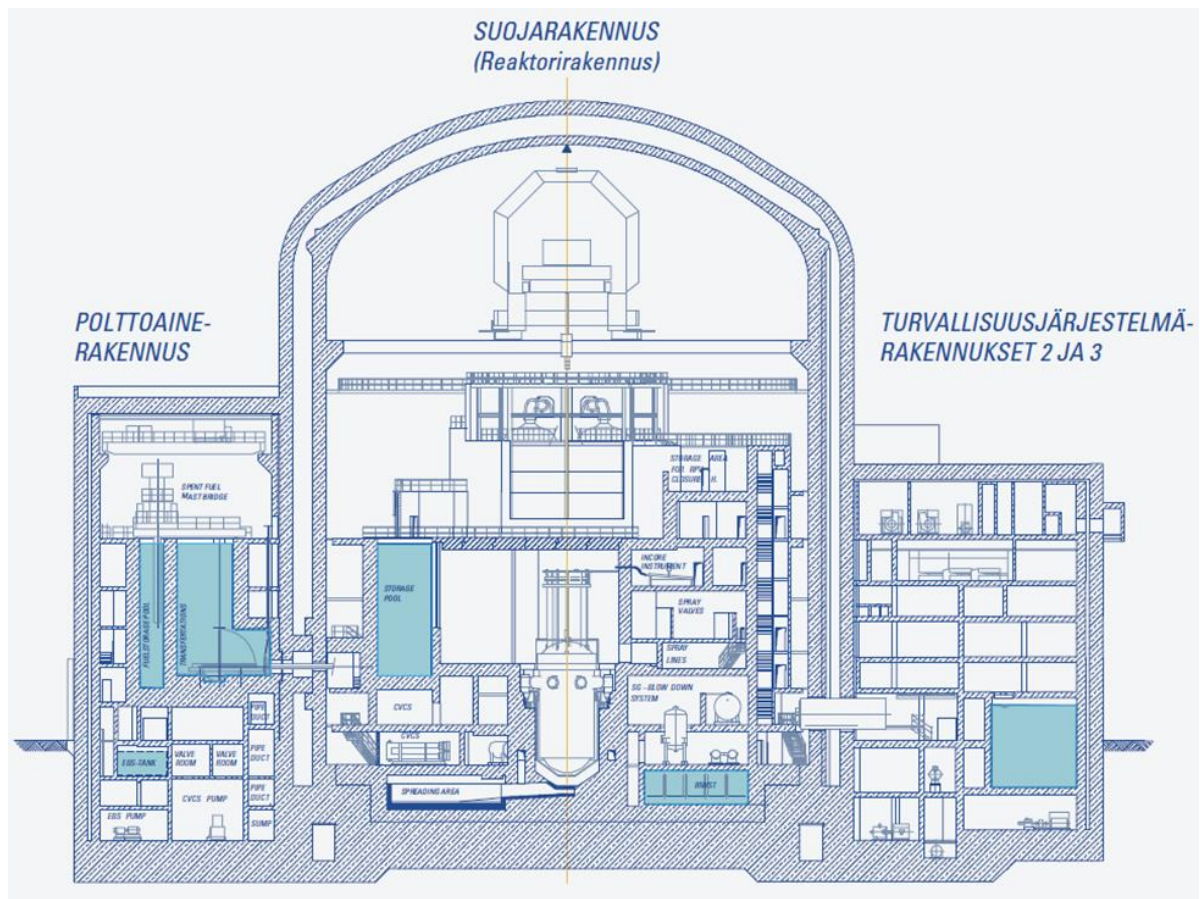
Tavalisteks tuumkütuse ülekuumenemise ja sulamise põhjusteks on kas üleminekuavariirežiim või jahutussüsteemi avarii, kui samaaegselt ei tööta ka avariijahutus. [1] Jahutussüsteemid vajavad töötamiseks elektrit. Normaalses olukorras saavad nad elektrienergiat samast elektrivõrgust nagu kõik teised. Tuumajaamad on varustatud mitmete varuenergiaallikatega, kui mingil põhjusel peaks üldisest võrgust elekter kaduma. [13] Avariiolukordades on vajalik iseendale elektri tootmine. Avariiolukordades kasutatavad süsteemid koosnevad tavaliselt diisलगeneraatoritest ja akudest. [22]

Tavaliselt kaob elekter ootamatult, mistõttu see võib kahjustada ja ohustada mitmeid elektriseadmeid. Kahjustuste vältimiseks on mootorigeneraatorid seotud hooratastega, mis võimaldavad katkematut elektrienergiat lühikest aega. Selle eesmärgiks on tagada jaama elektrivarustus seni, kuni jaam ühendatakse ümber akudele või diisलगeneraatoritele. Diisलगeneraatoreid kasutatakse hädaolukorras ning need on piisavalt võimsad, et üksainus

generaator toodab kogu vajaliku energia, mis on vajalik jaama seiskamiseks. Akud moodustavad tavaliselt lõpliku tagavaraelektrisüsteemi, mis on samuti võimelised andma piisaval hulgal elektrienergiat, et jaam seisata. [22] Tavaliselt on tuumajaamas 2-3 ooterežiimis elektrigeneraatorit, 2-3 erakorralist elektrigeneraatorit ning mõned tagavaraakud. [13]

5.1.3. Radioaktiivse kiirguse tõkestamine

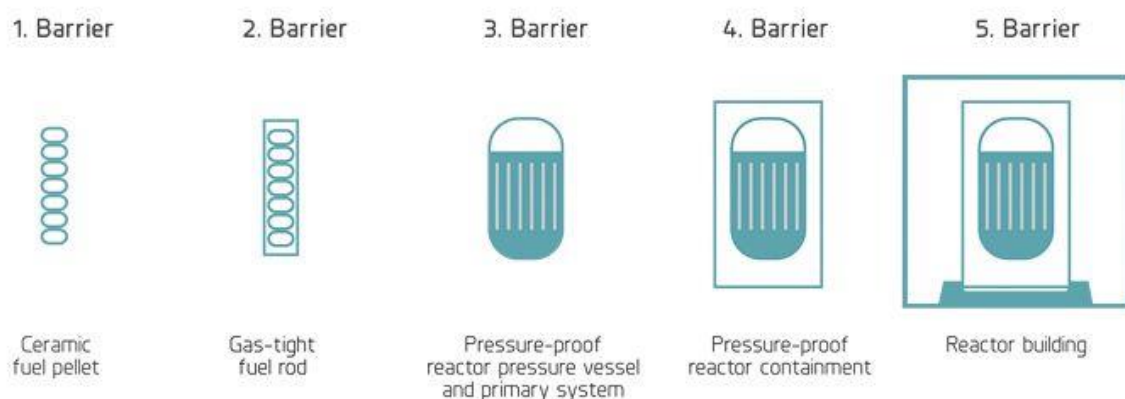
Tuumareaktorid on ehitatud mitmete kaitsekihtidega, et võimalikult vähe kiirgust keskkonda pääseks. Kiirguse tõkestamiseks on kahekordne korpus ümber reaktori. Sisemine korpus on valmistatud raudbetoonist ning piisava tugevusega, et vastu pidada, mis tahes raskele õnnetusele. Antud korpus on veel põhjalikult isoleeritud, et tagada maksimaalne ohutus. Avari korral sulguvad isolatsiooniklapid, et vältida lekkeid keskkonda. Esmane kontuur on varustatud ka jahutus- ja veepihustussüsteemidega, et vähendada õnnetuse korral nii sisemist rõhku kui ka vabade radioaktiivsete ainete sisaldust. Esimest korpust ümbritseb omakorda veel teine raudbetoonist korpus, mis vähendab veelgi radioaktiivse saaste väljapääsu võimalust ning pakub kaitset otsese kiirguse eest. Teine kontuur kaitseb ka väliste avariide eest. Kahe korpuse vahel hoitakse alarõhku, kuna sealsed imursüsteemid filtreerivad õhku enne väliskeskkonda minemist.[19] Turvalisuse mõttes on uued tuumareaktorid ehitatud nii, et kõik hooned on üksteisest eraldatud ning sõltumatu turvasüsteemiga. [14] Reaktorit ümbritseb veel ka keeluala. [13]



Sele 5.9 Reaktori ristlõige [14].

Kiirguse minimaliseerimiseks suletakse looduslik uraan keraamiliste või metallist graanulite sisse, mis moodustavad esimese kaitsekihi. Selle eesmärgiks on tuumakütust kaitsta korrosiooni eest ning vältida selle sattumist reaktori jahutussüsteemi. Antud süsteem hoiab ka lõhustumisprodukte kinni, eriti neid, mis on reaktori tavapärasel töötemperatuuril gaasilises olekus (krüptoon, ksenoon ja jood). Katted ei paku kaitset kiirguse eest ning need tuleb konstrueerida nii, et nad neelaks võimalikult vähe kiirgust. Seetõttu kasutatakse tihti magneesiumit või tsirkooniumit, kuna neil on madal neutronite neeldumisristlõige ja kõrge kiirgusvastupidavus [22]. Seejärel paigutatakse graanulid kütusevardasse, mis moodustavad teise kaitsekihi. Kütusevardad on äärmiselt vastupidavad kuumusele ja korrosioonile. Kütusevardad paigutatakse reaktori surveanumasse, kus paikneb ka reaktori südamik. Antud mahuti moodustab kolmanda kaitsekihi. Reaktori surveanumat ümbritseb esimene korpus, mis on valmistatud paksudest metall- ja betoonkonstruktsioonist paneelidest, mis on tavaliselt vähemalt meetri paksused. [13] Esmane korpus talub tugevat sisemist survet, et säilitada oma terviklikkus isegi väga raske avarii korral ning vältida lekkeid keskkonda. Mitmetel

reaktoritel on ka teine korpus, mis ümbritseb esimest. Teine korpus pakub füüsilist kaitset väliste ohtude eest ning on piisavalt tugev, et vastu pidada isegi suure reisilennuki õnnetuse korral. [26] Esimese ja teise korpuse vahel on negatiivne rõhk, et piirata radioaktiivset saastet. [22] Tuumaelektrijaamades on reaktori korpus viimaseks tõkkeks, mis takistab radioaktiivsete ainete paiskumist keskkonda võimaliku õnnetuse korral. Kuna reaktori korpus on tähtsal kohal avarii tagajärgede leevendamiseks, tuleb selle seisundit pidevalt jälgida, et vältida võimalikke lekkeid keskkonda. [19]

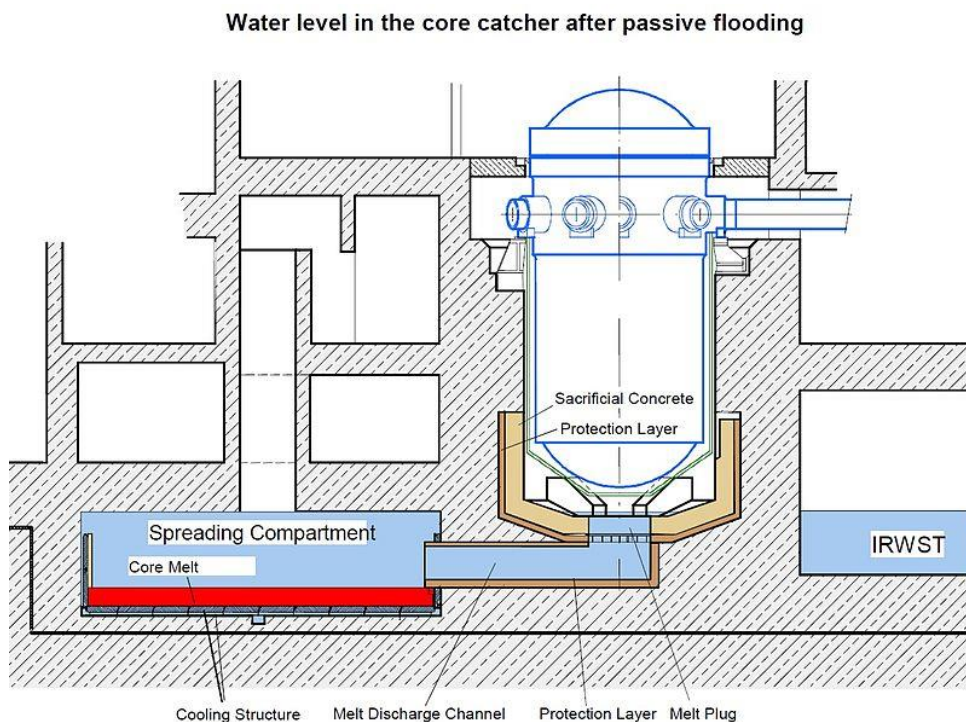


Sele 5.10 Kaitsebarjäärid kiirguse tõkestamiseks [26].

Tuumajaamade tavapärase tegevuse käigus vabaneb väga väikestes kogustes kiirgust keskkonda. [13] Radioaktiivsete heitmete käitlemiseks on jaamadel spetsiaalsed süsteemid, mis eemaldavad õhust radioaktiivsuse, et vähendada selle mõju nii inimestele kui ka keskkonnale. Radioaktiivse saaste vähendamiseks on üliefektiivsed filtrid ja kiirgusmonitorid, mis on paigutatud ventilatsioonisüsteemide osana. Kontrollruumides on ventilatsioon, mis kaitseb operaatoreid kiirguse eest. Süsteem koosneb aktiivsüstfiltritest, mis eemaldavad õhust radioaktiivsed isotoobid. [22] Filtrid eemaldavad kasutatud õhust üle 99% kiirgusest enne väliskeskkonda vabanemist. Sarnased süsteemid on paigutatud ka vees leviva saaste vähendamiseks. Filtreerimissüsteemide üle toimub pidev kontroll. Tavaliselt on kiirguse eraldumised tuumajaamadest väga väikesed, jäädes lubatud normidest tunduvalt madalamale ning seetõttu ei kujuta see otsest ohtu inimese tervisele ja turvalisusele ega keskkonnale. [13]

Ehkki reaktorisüdamiku sulamise tõenäosus on minimaalne, on siiski loodud passiivsed ohutusseadmed, selle ohjeldamiseks. [26] Varasemalt sattus reaktori südamiku sulamise korral vedel tuumkütus reaktori korpuse betoonpõrandale. Betoon talub suurt kuumust, seega paks lame betoonpõrand pakub tavaliselt piisavalt kaitset. Nüüdseks on ehitatud tuumkütuse püüdmise seade. [22] Antud seadme eesmärgiks on püüda sulanud reaktorisüdamiku massi, tuumareaktori võimaliku ülessulamise korral ning vältida selle sattumist hoone korpusesse. Mahuti on valmistatud spetsiaalsest betooni ja keraamika segust ning seda jahutatakse tsirkuleeriva veega seni, kuni sulamass on tahkunud. [24] Tänapäeval on kõik reaktorid varustatud spetsiaalsete sulamisanumatega, mis asuvad reaktori all. [22] EPR reaktoril on mahuti suuruseks 170 ruutmeetrit ning sinna võib valguda kuni 500 tonni sulamassi. [24]

Aastakümneid kestnud katsetused ja analüüsimised näitasid, et kütuse sulamisega pääseb vähem radioaktiivseid jäätmeid keskkonda, kui esialgu eeldatud. Isegi siis, kui jaama ümbritsev kaitsekest puruneb, ei pea kartma suurt katastroofi inimeste tervisele. Uute reaktorite ehitamisel peavad olema täidetud tingimused, mis väldiksid tuuma sulamise õnnetuse korral väliseid mõjusid. Õnnetuse tagajärjed peavad piirduma jaamaga, et vältida ümbruskaudsete inimeste evakueerimist ja kahjulikku mõju keskkonnale. [10]



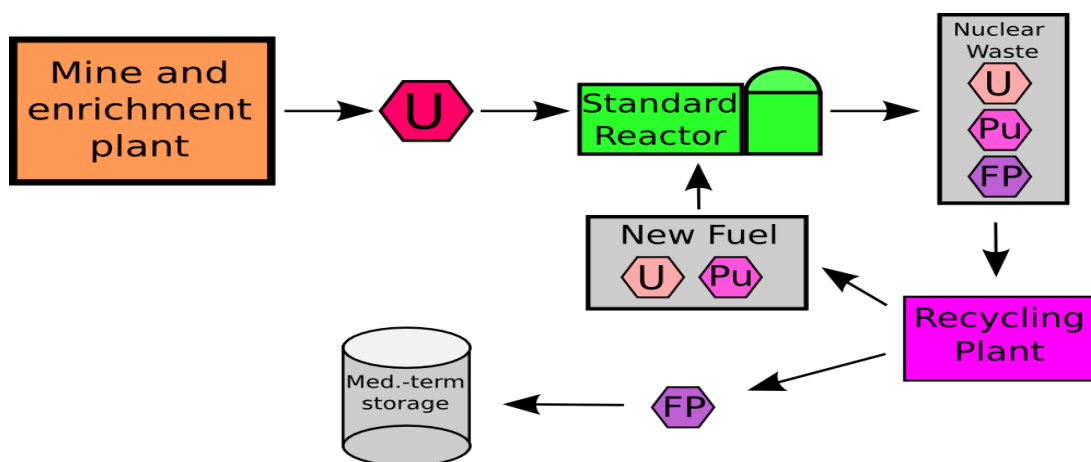
Sele 5.11 Sulanud tuumakütuse mahuti EPR reaktori näitel [25].

5.2 Radioaktiivsed jäätmed

Maailma on kogunenud ligikaudu 270 000 tonni kasutatud tuumkütust, millest valdav osa asub tuumjaamade ajutistes hoidlates. Igal aastal tekib ligikaudu 12 000 tonni kasutatud tuumkütust, millest veerand läheb ümbertöötamiseks. [1]

Kõige tähtsam ülesanne kogu maailma tuumatööstuses on tuumkütuse kasutustsükli ohutu lõpetamine ja tuumajäätmete ohutu kõrvaldamine ning ökosüsteemist eraldamine. Eesmärk on töödelda jäätmeid selliselt, et nad sobiks hoidmiseks ja ladustamiseks nii, et ei tekiks lubamatuid riske praegustele ja tulevastele põlvkondadele. [5] Ühtegi projekti ei ole võimalik algsatada ilma radioaktiivsete jäätmete käitlemisstrateegia väljatöötamiseta. Tuumajäätmete käitlemine hõlmab endas läbitöötatud kütuse ajutist jaamasest hoidlat, tuumajäätmete transporti, pikaajalist ladustamist, ümbertöötamist alternatiivkujusse ja pika tähtajaga lõplikku hoidmist. Võib isegi väita, et tuumaenergeetika on ainuke suures koguses elektrienergia tootmistehnoloogia, mis vastutab täielikult kõigi oma jäätmete eest. Kogu töö kajastub muidugi ka elektri hinnas. [1]

Reaktorid võivad töötada nii suletud kui ka lahtise tsükliga. Suletud tsükli korral toimub tuumkütuse ümbertöötlus ning taaskasutamine 95% ulatuses. Kuna ümbertöötlemine on kallis, siis kõigest veerand kasutatud tuumkütusest taaskasutatakse. Lahtise tsükli korral hoitakse kasutatud tuumkütust tuumajaamas seni, kuni selle aktiivsuse ja jääksoojuse vähenemine võimaldab pakendamist lõppladustuskonteineritesse ning lõppladustamist. Mõlemal juhul tuleb radioaktiivseid jäätmeid ohutult hoida ja säilitada tuhandeid aastaid. [1]

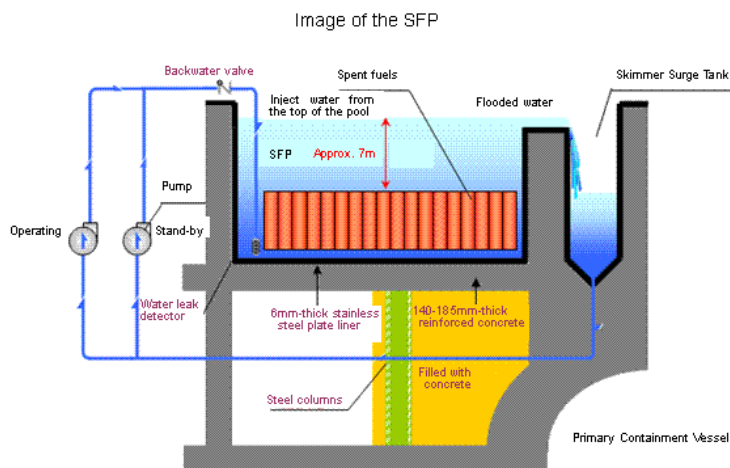


Sele 5.12 Suletud tsükkel [18].

Tuumajäätmed ja kõrvalsaadused erinevad mitmeti tavalistest tööstusjäätmetest. Tuumajäätmed on radioaktiivsed ning nad püsivad sedasi väga pikka aega. Olenemata sellest, et tuumajaamades tekib jäätmeid mitu korda vähem, kui fossiilsetel kütustel töötavates jaamades, on tuumajäätmete käitlemine ja ohutu ladustamine keerulisem ja palju kallim. Samuti tekib uraani kõrvalsaadusena uus raske element, plutoonium, mis on oma olemuselt väärtuslik energiaallikas. Seda on võimalik reaktorites uuesti kasutada ning see annab peaaegu sama palju energiat, kui esialgu uraanist ammutati. Plutoonium ja teised lõhustumissaadused eraldatakse keemiliselt spetsiaalsetes ümbertöötlusjaamades. Tänapäeval, kus rõhutatakse eriti ökonoomsusele, tundub mõtlematu seda mitte kasutada. [30] Tulevikureaktorite arendamise üks eesmärkidest ongi just antud kütuse laiem kasutuselevõtt. Töötanud kütuse radioaktiivsus säilib praktiliselt igavesti. Jäätmed liigitatakse väikese-, keskmise ja suure radioaktiivsusega jäätmeteks. Eesti on kasutatud tuumkütuse ja radioaktiivsete jäätmete ohutu käitemise konvektsiooniga ühinenud. [1]

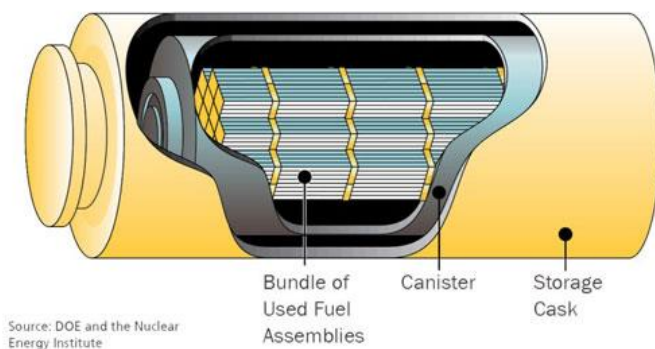
Väikese radioaktiivsusega jäätmed moodustavad 90% elektrienergia käigus tekkinud jäätmete ruumalast, kuid sisaldavad kõigest 1% kõigi tekkivate jäätmete aktiivsusest. Keskmise radioaktiivsusega jäätmed moodustavad 7% kõigi radioaktiivsete jäätmete ruumalast ning need sisaldavad 4% kõigi tekkivate jäätmete aktiivsusest. Antud jäätmed tuleb enne ladustamist segada inertsete materjalidega nagu betoon, bituumen või kumm. [5] Keskmise ja väikese radioaktiivsusega jäätmed ladustatakse maapinna lähedasse või maa-alusesse kuni 100m sügavusse tunnelisse rajatud ladustamispaika. Suure radioaktiivsusega jäätmed moodustavad ainult 3% kõigist jäätmetest, kuid neis sisaldub 95% kõigi tekkivate jäätmete radioaktiivsusest. [1]

Hetkel on levinud kasutatud tuumkütuse hoidmine tuumajaama ajutistes hoidlates – veebasseinides. Tegemist on mitme meetri sügavuste betoonbasseinidega, mille põhjas on kasutatud tuumkütus. Seitsme meetrine veekiht tagab nende jahutuse ja varjestab kiirguse eest. Basseinidesse ladustamine on lihtne ja mugav ning seda kasutatakse peaaegu kõikides tuumajaamades. [30]



Sele 5.13 Kasutatud tuumkütuse bassein [31].

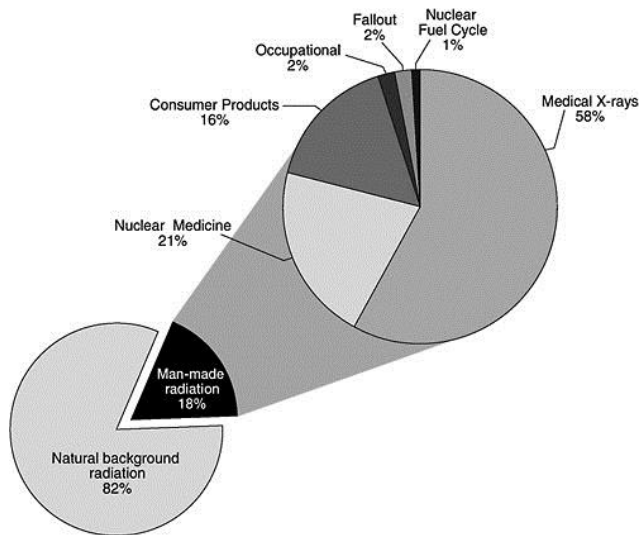
Basseinide peamiseks alternatiiviks on kuivad betoonkambrid, kus jahutatakse kasutatud tuumkütust ringleva õhuga. Seal väheneb selle radioaktiivsus, mistõttu on käitlemine ja lõplik ladustamine ohutum ja lihtsam. Kuivade kambrite eeliseks on see, et nad vajavad vähem tähelepanu ja hooldamist, kui veega täidetud basseinid, seega on need ka majanduslikult kasulikumad. Samuti on antud kambritesse tuumkütuse ladustamine keskkonnasõbralik ja ohutu, taludes isegi raskeid loodusõnnetusi. [16] Tulevikus loodetakse kindlasti seda varianti rohkem rakendada. Lõplik ladustamine toimub siiski sügavas maa-alustes hoidlates, millest ei tohi väga pika aja jooksul välja pääseda märkimisväärsed heitmeid. [30]



Sele 5.14 Kasutatud tuumkütuse kuiv hoiustamise kamber [16].

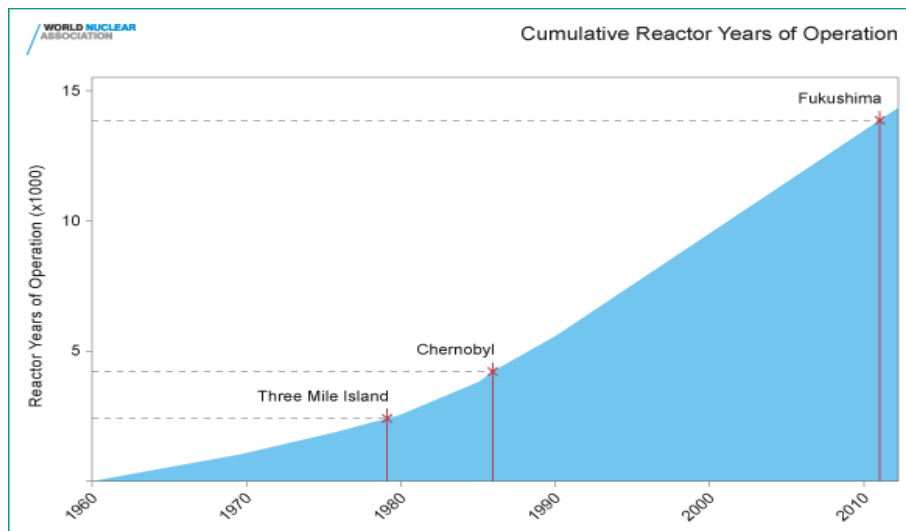
5.3 Avariid

Tuumareaktoreid on kasutatud energia tootmiseks alates 1950. aastast. Tuumaenergeetika seostub paljudele inimestele koheselt kiirgusega. Tegelikult esineb kiirgust mingil määral kõikjal looduses. [5]



Sele 5.15 Loodusliku kiirguse ja inimtegevusest tingitud kiirguse võrdlus [29].

Inimeste suurim kartus, seoses tuumajaamadest pärit ioniseeriva kiirgusega, on võimalike pahaloomuliste kasvivate teke. Tegelik mõju inimesele on kiirguse hulgast. Olenemata sellest, et tuumajaamades on välja arendatud spetsiaalne kiirguskaitse süsteem, ei ole üldsuse hirm vähenenud. Hirmu suurendavad tuumaelektrijaamadega toimunud õnnetused ning nende tagajärjed, aga ka see, et me ei suuda ioniseerivat kiirgust meeltega tajuda. Paljudel inimestel on tekkinud väärarusaamad seoses tuumaenergeetikaga, kuna puudub usaldusväärne ja kättesaadav teave. Tuumaseadmete rutiinse töötamise ajal on radionukliidide heitmed keskkonda väikesed ning reaktorite ohutuse kaasajastamisel on tehtud väga suuri samme. [5] Tuumajaamade ohutuses pole aga mõtet kahelda, kuna poole sajandi ja peaaegu 15 000 reaktori-aasta töötamisaja jooksul on toimunud kõigest kolm suuremastaabilist õnnetust. [7]



Sele 5.16 Suurimad õnnetused kõikide reaktoriaastate jooksul [10].

Vaatamata kõikidele ohutusmeetmetele võib õnnetusi siiski juhtuda. Avariid toimumisel tuumajaamas võivad gaasilised, vedelad või tahked radionukliidid väliskeskonda paiskuda. Sellisel juhul võib radioaktiivne pilv tuulega eemale kanduda, hajuda või lahustuda ning hiljem sademetega maapinnale langeda. See võib mõju avaldada väga suurele piirkonnale. Kõigil tuumatööstusega riikidel on põhjalikud ja läbiproovitud hädaolukorra lahendamise plaanid, mis võtavad arvesse reaalseid tingimusi. [5]

Tuumaanergetika suurimateks avariideks peetakse avariid USA tuumajaamas Three Mile Island 1979. aastal, avariid Tšernobõli tuumajaamas Ukrainas 1986. aastal ja avariid Jaapanis Fukushima tuumajaamas 2011. aastal. Esimene nendest oli suure majandusliku kahjuga ning keskkonnamõju praktiliselt puudus, kuigi reaktor oli tõsiselt kahjustada saanud. [10] Tuumajaama lähedal elevad inimesed said vaid minimaalseid kiirgusdoose, mis ei ületanud etteantud norme. [4] Puuduliku konstruktsiooniga ja ohutusreeglite rikkumise tulemusena arenenud Tšernobõli tuumareaktori plahvatus põhjustas aga esimest korda ajaloos radionukliidide paiskumise keskkonda väga suurtes kogustes kümne päeva jooksul. Mitu nädalat peale õnnetust eraldus endiselt väiksel hulgal radioaktiivset saastet väliskeskkonda. Viis kuud hiljem suudeti kahjustunud reaktor lõplikult sarkofaagi sulgeda. Saastepilv liikus mingil määral üle kogu Euroopa, kuid selle sadenemise määrasid kohalikud ilmastikutingimused. [3] Fukushima tuumajaamas toimus õnnetus kolme vana reaktoriga, kuna avariijahutussüsteem lakkas töötamast. [10] Tsunami oli hävitanud kõik peamised tagavaraelektrisüsteemid ja diiseldiisellektrogeneraatorid, mis olid vajalikud reaktorituuma jahutamiseks.

Elektrikatketuse tõttu muutusid kolm töötavat reaktorid kontrollimatuks, muutes reaktori südamiku jahutamise võimatuks. Reaktori tsirkulatsioonisüsteem ei olnud hästi projekteeritud, kuna jahutusvedeliku loomulik ringlus, ilma elektrienergiata, ei olnud piisav, et tagada vajalik jahutus. Ehkki õnnetus toimus kolme reaktoriga, ei saanud keegi avarii tagajärjel surma ega tõsiseid tervist kahjustavaid kiirgusdoose. Kuna plahvatuse tagajärjel purunes nii esimene kui ka teine reaktori kaitsekorpus, siis vabanes suurel hulgal radioaktiivseid jäätmeid keskkonda. Peamine õppetund sellest katastroofist on see, et reaktori jahutussüsteem tuleb ehitada nii, et jahutusvedelik ei kaotaks kunagi loomulikku ringlust ning avariigeneraatoreid tuleb paremini kaitsta väliste ohtude eest. [28]

Antud avariid rõhutasid taaskord reaktorite kaitsesüsteemide tähtsust ning seda, et tuumaelektrijaamade projekteerimisel tuleb arvestada isegi väga ebatõenäoliste stsenaariumitega. [28] Inimesed elavad siiani tuumakatstroofi kartuses, kuigi tuumareaktorite avarii võimalikkus on viidud kõigi aegade madalamale tasemele. Tulevikureaktoritele on ette nähtud kindlad ohutusstandardid, mis põhinevad ülemaailmselt aktsepteeritud tingimustel, et vältida raskeid avariisid. [2] Tänapäeval on tuumaenergeetikas tugev riigipoolne ja rahvusvaheline järelvalve. Võib väita, et eelnimetatud avariid on soodustanud tuumaohutuse arengut kogu maailmas, kuna ohutusnormid muutuvad üha rangemaks. Tulevikureaktorid koos aina kasvavate ohutusstandardite, käidupraktika, tugeva järelvalve- ja inspeksioonisüsteemiga on võimelised tagama tuumaenergia ohutuse tulevikus. [8]

KOKKUVÕTE

Tänapäeva energeetikas on levinumad surveveereaktorid, keevaveereaktorid ja raskeveereaktorid, mis töötavad peamiselt soojuslikel neutronitel. Antud reaktorid kasutavad tuumkütusena väherikastatud uraani ning vajadusel ka hävitavatest tuumarelvadest pärit plutooniumi või reaktori töötamisel tekkivat plutooniumi. Eesmärk on tulevikus vahetada aeglastel neutronitel töötavad reaktorid kiiretel neutronitel töötavate reaktorite vastu, kuna antud reaktorites kasutatakse uraani palju tõhusamalt ning tekitatakse vähem jäätmeid. Samuti tuleb lahendada konstruktsioonimaterjalide probleemid, kuna hetkel kasutatavad materjalid ei talu piisavalt kõrget temperatuuri, mida on vaja mõndades tulevikureaktorites kõrgema efektiivsuse saavutamiseks ja vesiniku tootmiseks. Hetkel kõige enam kasutatava tuumkütuse osakaalu soovitakse vähendada, suurendades tooriumi osakaalu, kuna seda leidub maapõues väga suurel hulgal ning sellest on raskem tuumarelvi valmistada.

Ilma tuumaenergiata tugineks energeetikasektor peaaegu täielikult fossiilsetele kütustele. Tuumareaktorid toodavad meile süsinikuvaba elektrienergiat ning ei suurenda kasvuhoonegaaside teket. Elektritootmise potentsiaal, isegi väikesest kogusest uraanist, on väga suur. Briiderreaktorite korral tekib tuumkütuse kasutamisel uut kütust kõrvalsaadusena. Antud reaktoritega on võimalik toota plutooniumi, mistõttu valitsus on reaktorite ehitamise suhtes kahtleval seisukohal. Siiski kui antud reaktori kontseptsioon laiemalt rakendub, võib see vähendada tuumkütuse hinda nii madalale, et uraani eraldamine ookeanidest ei oleks liiga kallis ettevõtmine. Tuumalõhustusreaktorid võimaldavad hetkel töötavatest reaktoritest 50-60 korda suuremat energia saadust, samast kogusest uraanist. Tulevikureaktoritega kaasneb võimalus veest puhta, ökonoomse ja suurel hulgal vesiniku tootmiseks, mis sobib kasutamiseks kütusena transpordis ja tööstustes. Igas mõttes on tuumaenergia usaldusväärne ja jätkusuutlik energiaallikas.

Tuleviku tuumatehnoloogiate ühiseks arendamiseks algatas USA 2001. aastal rahvusvahelise foorumi (Generation IV International Forum - GIF). Kuus reaktortüüpi, mis välja valiti on järgmised: sulasoolareaktor (MSR), ülekritilise veega jahutatav reaktor (SCWR), ülikõrgtemperatuurine reaktor (VHTR), gaasjahutusega kiire reaktor (GCFR), naatriumjahutusega kiire reaktor (SFR), plii/plii-vismutjahutusega kiire reaktor (LFR). IV-põlvkonna reaktoreid iseloomustab ohutus, säästlikkus, jätkusuutlikkus, pikk tööiga, usaldatavus, soojuskandja kõrged parameetrid ja suur kasutegur. Enamik tulevikureaktoritest

töötab suletud kütusetsükliga, tagades parema tuumkütuse ära kasutamise ja lõpphoidlasse paigutamist vajavate tuumajäätmete olulise vähenemise. Reaktorite eluiga võib ületada isegi 60 aasta piiri.

Ohutussüsteemid on loodud toime tulema erinevate õnnetusjuhtumitega, mis toimuvad kas tuumaelektrijaamades või väljaspool seda. Arvestatakse isegi sündmustega, mille juhtumise tõenäosus on nii väike, et tõenäoliselt seda tuumareaktori elueal ei esinegi. Reaktoritel on mitmesuguseid ohutussüsteeme, mille funktsioonideks on reaktori seiskamine, reaktori jahutamine ning radioaktiivsete saaduste leviku tõkestamine. Ohutussüsteemid jagunevad passiivseteks ja aktiivseteks. Aktiivsed ohutussüsteemid on levinud eelkõige II põlvkonna reaktoritel. Funktsioonide täitmiseks peavad olema tagatud teatavad tingimused. Tulevikuks kavandatavates passiivsetes reaktorites kasutatakse praeguste reaktorite tehnoloogiat, kuid toimuvad olulised muutused konstruktsioonis ja disainis. Tulevikureaktorite ohutus sõltub täielikult passiivsetest ohutussüsteemidest.

Kõige tähtsam ülesanne kogu maailma tuumatööstuses on tuumkütuse kasutussükli ohutu lõpetamine ja tuumajäätmete ohutu kõrvaldamine ning ökosüsteemist eraldamine. Eesmärk on töödelda jäätmeid selliselt, et nad sobiksid hoidmiseks ja ladustamiseks nii, et ei tekiks lubamatuid riske praegustele ja tulevastele põlvkondadele. Ühtegi projekti ei ole võimalik alata ilma radioaktiivsete jäätmete käitlemisstrateegia väljatöötamiseta. Tuumajäätmete käitlemine hõlmab endas läbitöötatud kütuse ajutist jaamasest hoidlat, tuumajäätmete transporti, pikaajalist ladustamist, ümbertöötamist alternatiivkujusse ja pika tähtajaga lõplikku hoidmist. Võib isegi väita, et tuumaenergeetika on ainuke suures koguses elektrienergia tootmistehnoloogia, mis vastutab täielikult kõigi oma jäätmete eest.

Paljudel inimestel on tekkinud väärarusaamad seoses tuumaenergeetikaga, kuna puudub piisaval hulgal usaldusväärset ja kättesaadavat teavet. Tuumaseadmete rutiinse töötamise ajal on radioaktiivsed heitmed keskkonda väikesed ning reaktorite ohutuse kaasajastamisel on tehtud väga suuri samme. Tulevikureaktoritele on ette nähtud kindlad ohutusstandardid, mis põhinevad ülemaailmselt aktsepteeritud tingimustel, et vältida raskeid avariisid. Tulevikureaktorid koos aina kasvavate ohutusstandardite, käidupraktika, tugeva järeelvalve- ja inspeksioonisüsteemiga on võimelised tagama tuumaenergia ohutuse tulevikus.

Bakalaureusetöö võib lugeda õnnestunuks, kuna suutsin täita püstitatud eesmärgid ja saada piisav ülevaade praegusel hetkel kasutatavatest tuumareaktoritest ja tuumaenergia eripäradest, praeguste ja tulevikus ehitatavate tuumareaktorite ohutusest ja turvalisusest ning ehitatavatest

tulevikureaktoritest ja nendega kaasnevatest peamistest muutustest. Lõputöö tulemusena saab järeldada, et tuumareaktoritel on mitmeid eeliseid, mis laienevad iga järgneva põlvkonnaga. Kindel on see, et tuumareaktorite areng on lõpmatu, kuna eesmärgiks on aina ohutum ja turvalisem tuumaenergia. Tuumareaktoritest võib tulevikus kujuneda suure tõenäosusega üks peamiseid energiaallikaid, kuna ta on tõestanud ennast kui usaldusväärne, ökonoomne ja ohutu energiaallikas. Tuumaenergiat peetakse kõige keskkonnasõbralikumaks viisiks suurel hulgal elektrienergia tootmiseks. Edasipidi võib uurimistööd edasi arendada tulevikureaktorite täpsema analüüsi suunal.

SUMMARY

Today most common operating nuclear reactors are pressurized water reactors, boiling water reactors and heavy water reactors, which use mainly thermal neutrons. These reactors use low-enriched uranium fuel in the core, and where appropriate, plutonium from destructive nuclear weapons. The aim is to change thermal reactors in future with fast reactors, because they use uranium much more efficiently and generate less waste. It is also necessary to solve problems with structural materials because the materials currently used cannot tolerate a high enough temperature that is needed in future reactors to achieve a higher efficiency and the production of hydrogen. There is a desire to lower the usage of most commonly used nuclear fuel uranium and to increase the proportion of thorium, since it can be found in larger amounts in the earth and it is more difficult to produce nuclear weapons.

Without nuclear energy, the energy sector would rely almost entirely on fossil fuels. Nuclear reactors produce carbon-free electricity and do not increase greenhouse gas emissions. To produce electricity even from a small quantity of uranium, is very large. A breeder reactor creates new fuel as a by-product out of nuclear fuel. While it has capability to produce plutonium, therefore the governments are skeptical constructing those reactors. However, if concept of the reactor will be more widely approved, it might lower the price of uranium and the separation of uranium from the ocean can be more cost efficient. Fission reactors allow 50-60 times higher energy production of the same amount of uranium. Future reactors entail the possibility to use water in order to produce hydrogen economically and in large amounts. It is suitable to use as a fuel and in transport industries. In every sense, nuclear energy is a reliable and sustainable source of energy.

Generation IV International Forum was initiated by United States in 2001 in order to develop future nuclear technologies. Six most promising designs were chosen: molten salt reactor, supercritical water reactor, very high temperature reactor, gas-cooled fast reactor, sodium-cooled fast reactor, lead/lead-bismuth cooled fast reactor. Fourth generation reactors are safer, economical, sustainable, longer lifetime, reliable, higher heat transfer characteristics and higher efficiency. Most future reactors work with closed fuel cycle, to ensure better exploitation and final repository of nuclear fuel and nuclear waste decrease at the final repository. The life of the reactors may even exceed 60 year limit.

Safety systems are designed to cope with a set of accidental events, either originating inside the plant or outside of it. They even consider occurrences which are unlikely to happen during the life time of the reactor. Reactors have wide variety of safety systems. The main functions of them are to shut down the reactor, to cool down the reactor and to prevent a proliferation of radioactive products. Safety systems are divided into passive and active. Active safety systems are particularly common in second generation reactors. To ensure functioning, certain conditions must be guaranteed. Passive reactors which are planned for the future, use the technology of the current reactors but significant changes are made in the structure and design. Future reactors safety depends entirely on passive safety systems.

The most important task of the world's nuclear industry is the safe decommissioning of the used nuclear waste and separating it from the ecosystem. The goal is to treat waste in such way that they are suitable for storage, so there are no unacceptable risks to present and future generations. No projects have been able to launch without developed radioactive waste strategy. Nuclear waste management involves worked fuel station inside the temporary storage facility, nuclear waste transportation, long-term storage, reprocessing into alternative shape and long term retention. Might even claim that the nuclear energy is the only large amount of electricity production technology, which is fully responsible for all of its waste.

Because there are no reliable information available many people have misconceptions about nuclear energy. During the normal operation of nuclear reactors, radioactive releases to the environment are minimal and huge steps are made to modernize safety of reactors. In order to avoid serious accidents, future reactors are equipped with certain safety standards, which are based on the world-wide accepted terms. Future reactors with increasing safety standards, operation standards and efficient supervisory system are able to ensure the safety of nuclear energy in the future.

Bachelor's thesis can be considered as a success. I was able to fulfill my goals and gain a sufficient overview of currently used nuclear reactors and nuclear specifics, safety and the security of nuclear reactors and the construction of the future reactors and the main changes related with them. The thesis leads to the conclusion that nuclear reactors have a number of benefits that expand with every succeeding generation. What is certain is that the development of nuclear reactors is infinite, because the goal is to have safer and more secure nuclear power. In future, the nuclear reactors will most likely become one of the main sources of energy, since they have been proven to be reliable, economical and safe source of energy.

Nuclear energy is considered to be the most environmentally friendly way to produce large amounts of electricity. There may be further researches to develop more detailed analysis of the direction of future reactors.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Paist, A., Kruus, R., Tuumareaktorid. Tallinn 2011: TTÜ kirjastus.
- [2] Lillington, J.N. The Future of Nuclear Power. Elsevier 2004, 390p.
- [3] Ebel, E.R. Chernobyl and Its Aftermath. CSIS 1994.
- [4] Kumar, S. Nuclear Reactor Technology. First Edition. India: Shubi Publications, 2009.
- [5] Kiirgus, inimesed ja keskkond: ülevaade ioniseerivast kiirgusest, selle mõjudest, kasutamisest ja ohutu kasutamise tagamise meetmetest. Tallinn: Kiirguskeskus, IAEA, 2006.
- [6] Conserve Energy Future [WWW]
http://www.conserve-energy-future.com/Advantages_NuclearEnergy.php (01.04.2015)
- [7] Comby, B. Environmentalists For Nuclear Energy. Tnr Editions, 350p.
- [8] Tartu Ülikooli toimetatav infoportaal [WWW] <http://www.tuumaenergia.ee/> (12.04.2015)
- [9] Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1997.
- [10] World Nuclear Association [WWW] www.world-nuclear.org (15.04.2015)
- [11] Center for Nuclear Science and Technology Information [WWW]
<http://www.nuclearconnect.org/> (22.05.2015)
- [12] International Atomic Energy Agency [WWW] <https://www.iaea.org/> (21.04.2015)
- [13] Canadian Nuclear Safety Commission [WWW]
<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/nuclear-power-plant-safety-systems/index.cfm> (27.04.2015)
- [14] Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. Teollisuuden Voima Oyj. Helsinki, 2008.
- [15] Nuclear Energy Institute [WWW] <http://www.nei.org/> (27.04.2015)
- [16] United States Nuclear Regulatory Commission [WWW] <http://www.nrc.gov/> (01.05.2015)

- [17] The Electropaedia [WWW] <http://www.mpoweruk.com/> (01.05.2015)
- [18] Whatisnuclear [WWW] <http://whatisnuclear.com/> (02.05.2015)
- [19] Petrangeli, G. Nuclear Safety. First Edition 2006.
- [20] Council on Foreign Relations [WWW] <http://www.cfr.org/> (05.05.2015)
- [21] Kessler, G. Sustainable and Safe Nuclear Fission Energy: Technology and Safety of Fast and Thermal Nuclear Reactors. Springer Science & Business Media, 2012, 466 pages.
- [22] Wikipedia [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor_safety_systems (15.05.2015)
- [23] Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA, VIENNA, 2009.
- [24] Wikipedia [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Core_catcher (15.05.2015)
- [25] Wikimedia Commons [WWW]
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corium_in_catcher_EPR.jpg (16.05.2015)
- [26] Teollisuuden Voima Oyj [WWW] <http://www.tvo.fi/> (16.05.2015)
- [27] Wikipedia [WWW] <http://et.wikipedia.org/wiki/Tuumareaktor> (17.05.2015)
- [28] Ragheb, M. Fukushima Earthquake and Tsunami Station Blackout Accident. June, 2011
- [29] Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2, 2006.
- [30] Dyne, J.P. Managing Nuclear Wastes. Atomic Energy of Canada Limited. 1976.
- [31] Tokyo Electric Power Company [WWW]
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/info/12053001-e.html> (19.05.2015)
- [32] Sethi's Abyss [WWW]
http://sethisabyss.com/index.php?option=com_content&view=article&id=97%3Anuclear-power-plant&catid=43%3Apower-house&Itemid=41 (20.05.2015)