

Hyvä tietää ydinvoimasta

Ydinvoima-alan yritysten tuottama
tietopaketti 01/2023



Energiateollisuus

Ydinvoima

Esipuhe

Hyvä tietää -esite on ydinvoima-alan yritysten tuottama tietopaketti ydinvoimasta. Esitteen tarkoituksena on antaa tietoa ydinvoiman roolista energiantuotannossa ja ydinvoiman kerryttämistä kokemuksista Suomessa. Ydinvoiman tuotanto perustuu Albert Einsteinin 1900-luvun alussa esittämään yleiseen suhteellisuusteoriaan, jonka mukaan energia on yhtä kuin massa kertaa valonnopeus toiseen ($E=mc^2$). Yhtälö osoittaa sen, että pienimpäänkin määrään ainetta sisältyy valtava määrä energiaa. Käytössä oleva ydinvoima perustuu atomin halkaisemiseen, jossa siihen kätkeytyvä energia vapautuu ja otetaan hyötykäyttöön.

Ydinvoima on tällä hetkellä merkittävä päästöttömän sähköntuotannon muoto ja tärkeä osa Suomen energijärjestelmää. Suomessa ydinvoiman osuus on noin kolmasosa sähkön kokonaistuotannosta, josta n. 90 prosenttia on päästötöntä (2022). Ydinvoimalla on merkittävä rooli ilmastonmuutoksen torjumisessa, kun yhteiskunnan sähköistämällä vähennetään päästöjä. Esitteestä on vuosien aikana otettu lukuisia uusintapainoksia, joita on jaettu koululaisille, opiskelijoille ja muille ydinvoimasta kiinnostuneille lukijoille.

Ydinvoima on teknisesti vaativa ja korkeaan osaamiseen perustuva tuotantomuoto, jonka kehittämiseksi tehdään jatkuvaa ja pitkäjänteistä työtä.

Otamme mielellämme vastaan kysymyksiä ja kehitysehdotuksia tulevia esitepainoksia varten.

Energiateollisuus ry

”Käytössä oleva ydinvoima perustuu atomin halkaisemiseen, jossa siihen kätkeytyvä energia vapautuu ja otetaan hyötykäyttöön.”

4	Sähkö ratkaisuna ilmastonmuutokseen	20	Ydinjätteen kuljetukset
5	Ydinvoima osana kestäväää energiamarkkinaa		Käytetty ydinpolttoaine
6	FinNuclear -Yhteistyöllä ydinvoima-osaamista Suomeen ja maailmalle	21	Ydinvoimalaitosten käyttöikä ja käytöstäpoisto
6	Suomen ja lähialueiden ydinvoimalaitokset		Käytöstäpoistokokemukset
7	Suomen ja lähialueiden ydinvoimalaitokset		Käytöstäpoiston toteutus
8	Ydinvoimalaitosten käyttökokemukset	22	Säteily ja radioaktiivisuus
9	Ydinvoima kaukolämmön lähteenä	23	Säteily ja radioaktiivisuus
	Ydinvoimalaitokset maailmalla	24	Säteilyannosrajat
10	Ydinreaktorin toimintaperiaate		Työntekijöiden valvonta
11	Kevytvesireaktorit		Ydinvoimalaitosten ympäristön asukkaat
	Painevesireaktori (PWR)		Elintarvikkeiden pitoisuusrajoista
	Kiehumusvesireaktori (BWR)	25	Suomalaiset ja säteily
12	Muut reaktorityypit	26	Ydinvoimalaitosten turvallisuus
	Vesijäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori (LWGR)	27	Riskianalyysit
	Raskasvesireaktori (PHWR)		Ydinvoimalaitoksen ulkoiset vaaratekijät
	Kaasujäähdytteinen reaktori (GCR)	28	Reaktorin suojaus
	Hyötöreaktori (FBR)	29	Reaktorin suojaus
	Neljännän sukupolven reaktorit		Suojaustoiminnot
13	Fuusio		Suojarakennus
	ITER-fuusiokeoreaktori	30	Ydinaineiden valvonta
14	Ydinvoimalaitoksen ympäristövaikutukset ja niiden valvonta		Ydinonnettomuuteen varautuminen
	Radioaktiivisten päästöjen valvonta	31	Fukushima, INES 7
	Radioaktiivisten aineiden päästöt	32	INES-asteikko
	Jäähdytysvesi	33	INES-asteikko
16	Uraanivarat	34	Tshernobyl, INES 7
17	Polttoainekierto	35	Viranomaiset ja valvonta
18-19	Ydinjätehuolto Suomessa	36	Lupamenettely ja laitoksen käytön valvonta
	Voimalaitosjätteet	37	Energian ja säteilyn yksiköitä ja käsitteitä
	Käytetty ydinpolttoaine	38	Energian ja säteilyn yksiköitä ja käsitteitä
	Loppusijoitus		
	Suomen nykyisten laitosten ydinjätehuollosta vastaa Posiva Oy		
	Ydinjätehuolto maailmalla		

Sisällysluettelo

Sähkö ratkaisuna ilmastonmuutokseen

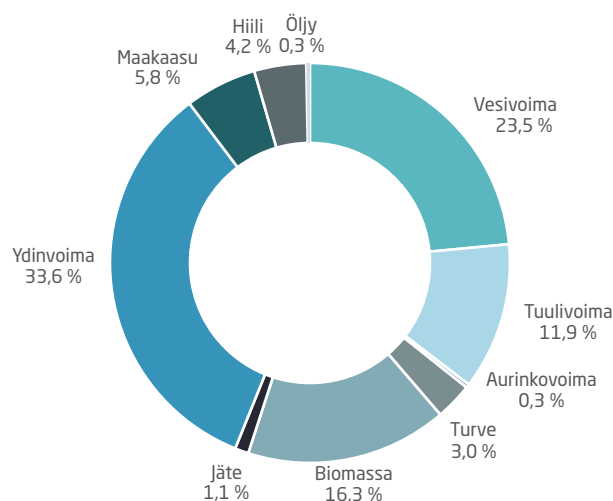
Suomi on hyvin sähköintensiivinen maa. Metsä-, metalli-, kemian ja muun teollisuuden osuus sähkönkulutuksestamme on noin puolet. Useimmat päästöjen vähentämiseen tähtäävät toimet teollisuudessa, kotitalouksissa ja liikenteessä tehdään sähkön avulla.

Yhteiskunta sähköistyy nopeassa tahdissa ja kestävä sähkön tuotanto on olennaista.

Suomen nykyiset voimalaitokset eivät tuota sähköä yhtä paljon kuin kulutamme, vaan yli viidesosa käyttämästämme sähköstä tuodaan meille naapurimaista. Sekä Suomesta että naapurimaista on poistettu ja poistetaan lähivuosina käytöstä vanhoja voimalaitoksia. Uudelle kotimaiselle tuotannolle on ilmeinen tarve. Ilmastonmuutoksen torjumiseksi uuden energian tuotannon täytyy olla hiilidioksidineutraalia. Siksi Suomeen rakennetaan ja suunnitellaan tällä hetkellä uutta tuulivoimaa ja ydinvoimaa. Muita tärkeitä kotimaisia uusiutuvan energian lähteitä on vesivoima, biomassa, biokaasu ja aurinkovoima.

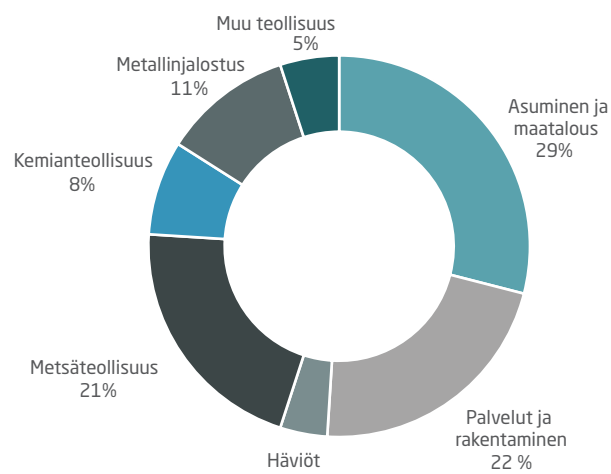
Muutos on mahdollisuus. Energiateollisuuden tekemät tarkastelut osoittavat, että myös Suomessa voidaan siirtyä lähes päästöttömään sähköntuotantoon. Vuonna 2022 sähköstä tuotettiin lähes 90 prosenttia hiilidioksidineutraalisti, eli ydinvoimalla tai uusiutuvilla energialähteillä. Muutos tapahtuu edullisimmin, jos hyödynnämme tehokkaimmat uusiutuvan energian lähteemme, tehostamme energian käyttöä ja tuotantoa sekä hyödynnämme ydinvoimaa jatkossa nykyistä enemmän. Näillä toimilla voimme alentaa merkittävästi päästöjä ja poistaa nykyisen tuontiriippuvuuden.

Sähkön tuotanto Suomessa 2020 (66 TWh)



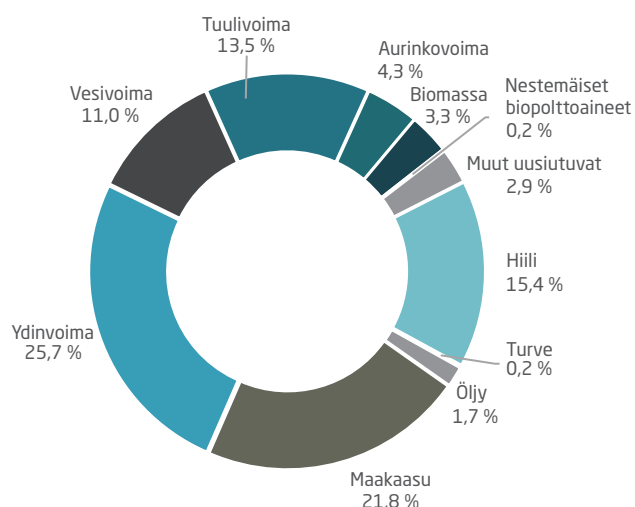
Lähde: Energiateollisuus ry

Sähkön kokonaiskäyttö Suomessa 2020 (81 TWh)



Lähde: Energiateollisuus ry

Sähkön bruttotuotanto Euroopan Unionissa 2019 (EU-28) (3224 TWh)



Lähde: Tilastokeskus

Ydinvoima osana kestäväää energiamarkkinaa

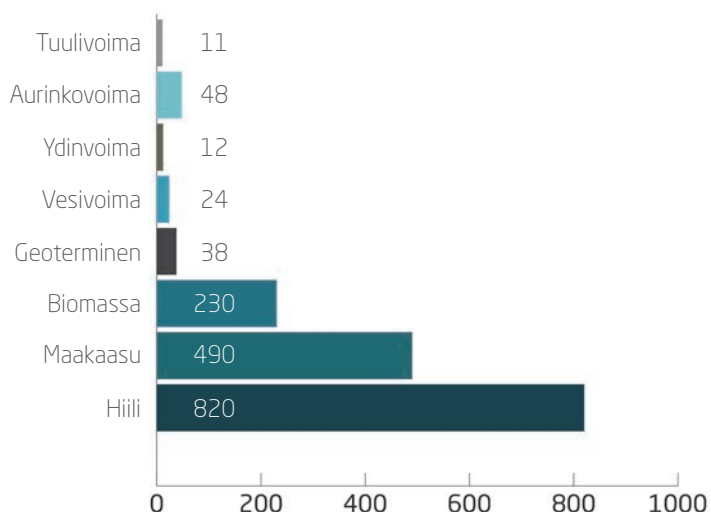
Ydinvoima on tällä hetkellä merkittävä päästöttömän sähköntuotannon muoto ja tärkeä osa Suomen energiajärjestelmää.

Suomalaiset ydinvoimalaitokset ovat toimineet turvallisesti koko yli nelikymmenvuotisen historiansa ajan. Ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden ansiosta jo lähes 90 % Suomessa tuotetusta sähköstä on tuotettu ilman hiilidioksidipäästöjä.

Energiajärjestelmän täytyy tulevaisuudessa olla hiilidioksidineutraali, jotta ilmastonmuutosta voidaan hillitä. Sähköntuotannon lisäksi tarvitaan myös lämpöä ja jäädytystä sekä energiaa ajoneuvoille. Tulevaisuudessa tarvittavat ratkaisut ovat hyvin monipuolisia ja energiaa muutetaan muodosta toiseen aiempaa enemmän. Ydinvoimaloista ei tule haitallisia päästöjä ilmaan tai veteen ja ydinvoimalla on mahdollista tuottaa sähköä lisäksi mm. lämpöä ja vetyä. Ydinvoima sopiikin mainiosti kestävään energiajärjestelmään myös tulevaisuudessa.

Puhtauden lisäksi energiajärjestelmässä erittäin tärkeää on myös toimitusvarmuus. Kun säästä riippuvainen tuuli- ja aurinkovoima lisääntyvät, tarvitaan niiden rinnalle joustavaa käyttöä, energiavaroja sekä muita energiantuotantotapoja. Ydinvoima on erittäin luotettava tuotantomuoto ja ympärivuotinen sähkön perustarve kannattaa kattaa ydinvoimalla. Suurten ydinvoimalaitosten lisäksi voi tulevaisuudessa olla käytössä myös pienreakteita, joita voidaan käyttää monipuolisesti sähkön, lämmön, teollisuushöyryn ja vedyn tuotantoon.

Erilaisten sähköntuotantomuotojen Co2-elinkaari päästöt (g/kWh, mediaani)



Lähde: IPCC-raportti 2014

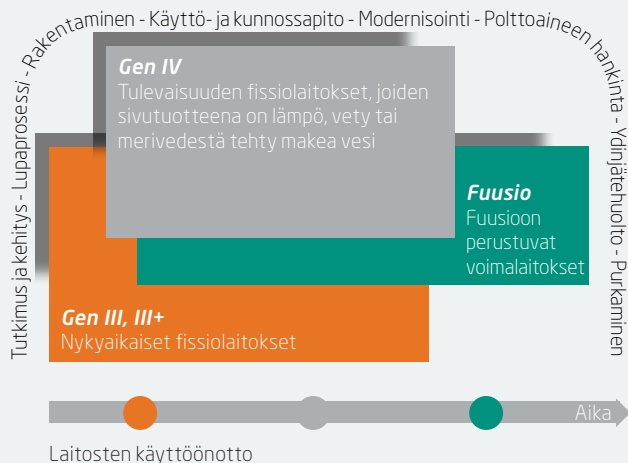
Eri energiantuotantomuotojen kustannusrakenteet ja tekniset käyttöiät eroavat selvästi toisistaan. Ydinvoimalaitoksen investointikustannukset ovat korkeat, mikä johtuu ydinvoimalaitokseen vaadittavista moninkertaisista turvallisuusjärjestelmistä ja -laitteista sekä reaktorin suojarakennuksesta. Toisaalta ydinvoimalaitosten tekninen käyttöikä on kymmeniä vuosia. Ydinvoimalaitoksia käytetään yleensä tasaisesti vuoden ympäri, ja suuri pääoma-investointi katetaan näin pitkällä vuotuisella käyttöajalla sekä kymmenien vuosien käyttöiällä.

Ydinpolttoaineen osuus ydinsähkön hinnassa on noin 15 prosenttia, josta raaka-aineen hinnan osuus on noin kolmannes. Polttoainekustannusten osuus esimerkiksi maakaasulla sähköä tuotavissa laitoksissa on yli 70 prosenttia. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden käyttö edellyttää päästöoikeuksien hankkimista, joiden hinta vaihtelee niin ikään markkinatilanteen mukaan.

Polttoaineen hinnan vaihtelut vaikuttavatkin ydinsähkön hintaan huomattavasti vähäisemmässä määrin kuin fossiililla polttoaineilla tuotetun sähkön hintaan. Esimerkiksi uraanin hinnan nousu kaksinkertaiseksi nostaa ydinsähkön hintaa noin viidellä prosentilla.

Ydinvoimalaitoksen kustannuksissa huomioidaan myös jätehuoltokustannukset, jotka muodostuvat varautumisesta käytetyn ydinpolttoaineen ja muiden radioaktiivisten jätteiden huoltoon ja lopetuslaitokseen.

Ydinvoima on ollut Suomessa kannattavaa eikä siihen ole tarvittu yhteiskunnan taloudellista tukea. Ydinjätehuollon kustannukset kerätään jo tuotantovaiheessa eikä ydinvoimalaitoksista koidu niiden elinkaaren aikana yhteiskunnalle kustannuksia.



FinNuclear -Yhteistyöllä ydinvoimaosaamista Suomeen ja maailmalle

FinNuclear on valtakunnallisesti toimiva yhdistys, jonka jäseniä ovat ydinenergia-alalla toimivat yritykset ja organisaatiot. FinNuclear edustaa suomalaista ydinenergia-alan osaamista niin kotimaassa kuin kansainvälisillä markkinoilla ja sen tavoitteena on edistää alan osaamista ja tukea Suomen ydinvoimalaitosten turvallista käyttöä koko niiden elinkaaren ajan tarjoten samalla jäsenyrityksilleen liiketoimintamahdollisuuksia ja valmentaa niitä ydinturvallisuuden vaatimuksiin.

FinNuclearin tavoitteena on nostaa kotimaisuusastetta Suomeen rakennettavissa ydinvoimalaitoksissa sekä kehittää suomalaisia vientituotteita kansainvälisille markkinoille tiivistäen yhteistyötä eri toimijoiden välillä ja mahdollistaen suomalaisten toimijoiden pääsyn entistä laajempiin projektikonaisuuksiin.

Suomessa on maailmanlaajuisesti merkittävää huippuosaamista niin ydinvoimalaitoksista vastuussa olevissa voimayhtiöissä kuin myös niiden alihankintaverkostossa toimivissa pk-yrityksissä, kuten insinööri- ja konsulttitoimistoissa, sekä tarkastuslaitoksissa, tutkimuskeskuksissa, säteilyturvaviranomaisella ja monen eri alan komponentti- ja järjestelmätoimittajilla. Osaamista on mm. laitosten käyttöön, ydinjätehuoltoon, T&K-toimintaan ja ydinvoiman uudishankkeisiin liittyen.

Maailmanlaajuisesti on tällä hetkellä kymmeniä uusia ydinvoimalaitosyksiköitä rakenteilla, suunnitteilla tai ehdotettu eri maiden energiaohjelmissa. Lukuisia olemassa olevia laitoksia modernisoidaan ja niiden elinikää pidennetään. Käyttöikänsä päähän tulleita laitoksia ja tutkimusreakteireita poistetaan käytöstä. Lisäksi ydinjätehuoltoon liittyvät suunnitelmat on monessa maassa vielä tekemättä ja ydinjäte-ongelma ratkaisematta. Ydinenergiահankkeissa onkin näkyvissä kysyntää osaamiselle useiksi vuosikymmeniksi. Lisätietoja: www.finnuclear.fi

Suomen ja lähialueiden ydinvoimalaitokset

1 Loviisa, Fortum

- Kaksi VVER-440-tyyppistä painevesireaktoria sijaitsee Loviisan kaupungin edustalla Hastholmenin saarella.
- Loviisa 1 valmistui 1977 ja Loviisa 2 1981.
- Nettosähkötehot 507 MWe ja 507 MWe.
- Laaja modernisointi valmistui vuonna 2018.

2 Olkiluoto, TVO

- Kolme laitoseskettä Eurajoen kunnassa.
- Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 ovat BWR-tyyppisiä kiehutusvesireaktoreita.
- Olkiluoto 3 on EPR-tyyppinen painevesireaktori.
- Olkiluoto 1 valmistui 1978 ja Olkiluoto 2 1980, Olkiluoto 3 aloittaa tuotannon 2021.
- Nettosähkötehot: 890 MWe (Olkiluoto 1), 890 MWe (Olkiluoto 2) ja 1600 MWe (Olkiluoto 3)
- Laajat modernisointihankkeet valmistuivat vuosina 1998, 2006 ja 2018.

3 Forsmark, Vattenfall & Mellansvensk Kraftgrupp

- Kolme BWR-tyyppistä reaktorieskettä valmistuneet 1980, 1981 ja 1985.
- Nettosähkötehot 1040, 1121 ja 1172 MWe.

4 Oskarshamn, Uniper & Fortum

- Yksi BWR-tyyppinen reaktorieskettä.
- Valmistunut 1985.
- Nettosähköteho 1459 MWe.

5 Ringhals, Vattenfall & E.ON

- 2 PWR-tyyppistä reaktorieskettä
- Valmistuneet 1982 ja 1984.
- Nettosähkötehot 1074 ja 1130 MWe.

6 Kuola, Rosenergoatom

- Neljä VVER-tyyppistä laitoseskettä.
- Valmistuneet 1973, 1974, 1981 ja 1984.
- Nettosähkötehot 4 x 441 MW.

7 Smolensk, Rosenergotom

- Kolme RBMK-tyyppistä laitosyksikköä.
- Valmistuneet 1982, 1985 ja 1990.
- Nettosähkötehot 3 x 925 MW.

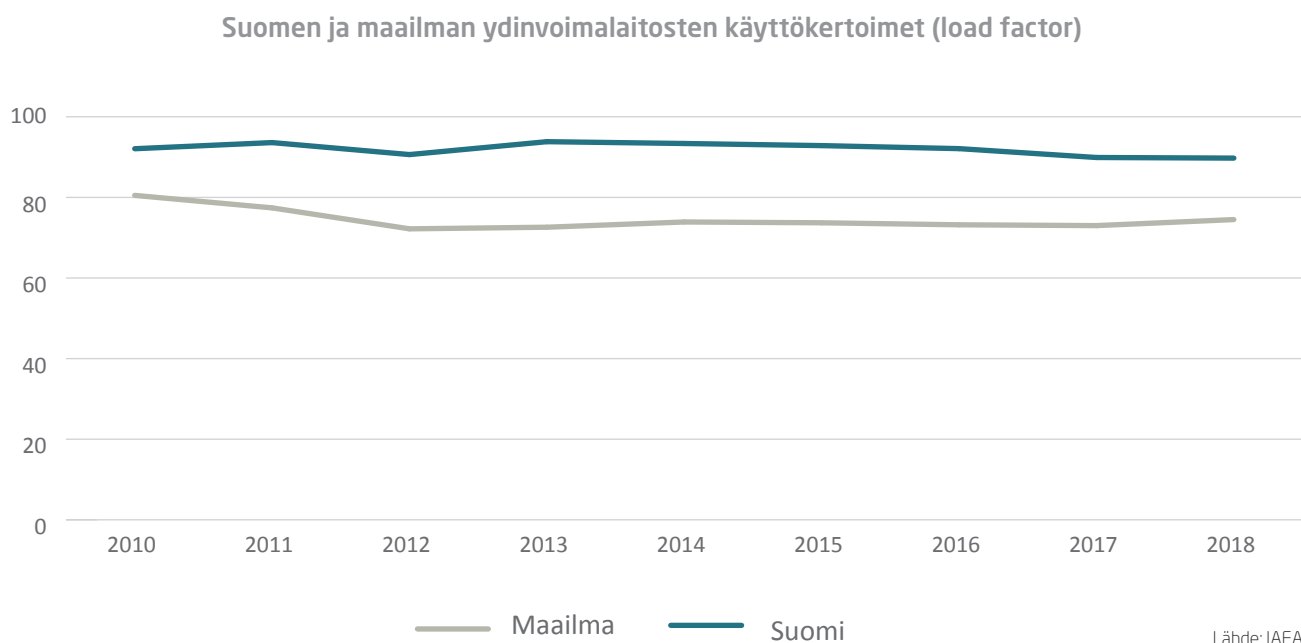
8 Sosnovyi Bor (Leningrad), Rosenergotom

- Kaksi RBMK-tyyppistä laitosyksikköä, valmistuneet 1979 ja 1981.
- Kaksi VVER- tyyppistä laitosyksikköä, valmistuneet 2018 ja 2020.
- Nettosähkötehot 2 x 925 MW ja 2 x 1 805 MW.



Ydinvoimalaitosten käyttökokemukset

Suomen ydinvoimalaitokset ovat monen vuoden ajan olleet kansainvälistä huippua. Sähkön hinta pysyy kilpailukykyisenä, kun ydinvoimalaitoksia käytetään tasaisesti läpi vuoden ilman suunnittelemattomia keskeytyksiä.



Käyttökerroin

Käyttötulosta voidaan vertailla eri voimalaitosten kesken esimerkiksi käyttökerroimen avulla. Käyttökerroin on prosenttiluku, joka kertoo tarkasteltavana ajanjaksona tuotetun sähköenergian osuuden täyden tehon tuotannosta ilman keskeytyksiä.

Sadan prosentin käyttökerroimen saavuttaminen ei ole mahdollista useimmilla ydinvoimalaitostyypeillä. Uuden polttoaineen lataaminen reaktoriin edellyttää yleensä laitoksen pysäyttämistä. Samalla voidaan tehdä sellaisia huolto- ja tarkistustöitä, joita ei voida suorittaa laitoksen käydessä.

Käyttöjaksot

Polttoaineen vaihtoseisokkiin tarvittavan ajan minimoiminen on tärkeää hyvän käyttötuloksen saavuttamiseksi. Jos merkittäviä korjaustöitä ei ole tehtävänä, seisokki kestää 2–3 viikkoa. Polttoainevaihtojen väliä on myös mahdollista pidentää lataamalla reaktoriin kerralla enemmän uutta polttoainetta. Monet ydinvoimalaitokset ulkomailla ajavat puolentoista vuoden pituisia käyttöjaksoja. Suomen olosuhteissa vuoden käyttöjakso on tarkoituksenmukaisin. Luonteva huoltoaika on kesällä, jolloin sähkönkulutus on vähäistä.

Ydinvoima kauko- lämmön lähteenä

Maailman ydinvoimalaitokset ovat ensisijaisesti rakennettu tuottamaan sähköä. Teknisesti ydinvoimalaitos on mahdollista rakentaa myös lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitokseksi. Yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa on muutamia ydinvoimalaitoksia Venäjällä ja muun muassa Beznaun ydinvoimalaitos Sveitsissä. Japanissa on kehitteillä laitoksia, joissa sähköntuotantoon voidaan yhdistää myös teollisuuden höyryntarpeen tyydyttäminen.

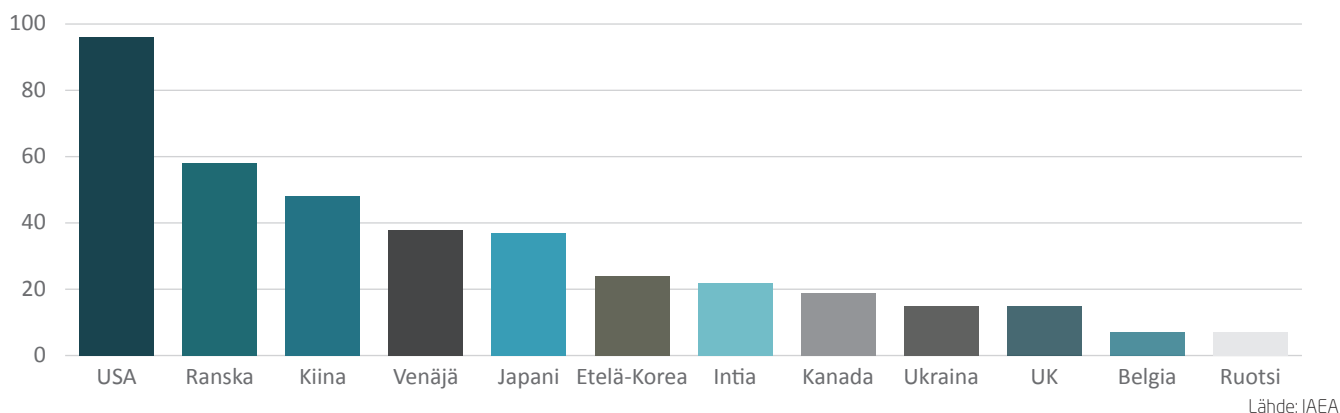
Muutamissa maissa on kehitetty myös pelkästään lämpöä tuottavia, pienikokoisia kaukolämmitykseen soveltuvia reaktorityyppejä. Ne ovat teknisesti yksinkertaisempia kuin sähköä tuottavat reaktorit. Jäähdytteen lämpötila on paljon alhaisempi kuin sähköä tuottavissa voimalaitoksissa, jopa vain vähän yli sata astetta. Tällöin myös järjestelmän paine on alhainen. Alhainen paine ja sähköä tuottavia voimalaitoksia pienempi teho mahdollistavat erilaisten teknisten ratkaisujen soveltamisen. Turvallisuusjärjestelmät esimerkiksi voivat perustua pääosin järjestelmän passiivisiin ominaisuuksiin ilman ulkopuolista energiaa vaativia aktiivisesti toimivia laitteita.

Ydinvoimalaitokset maailmalla

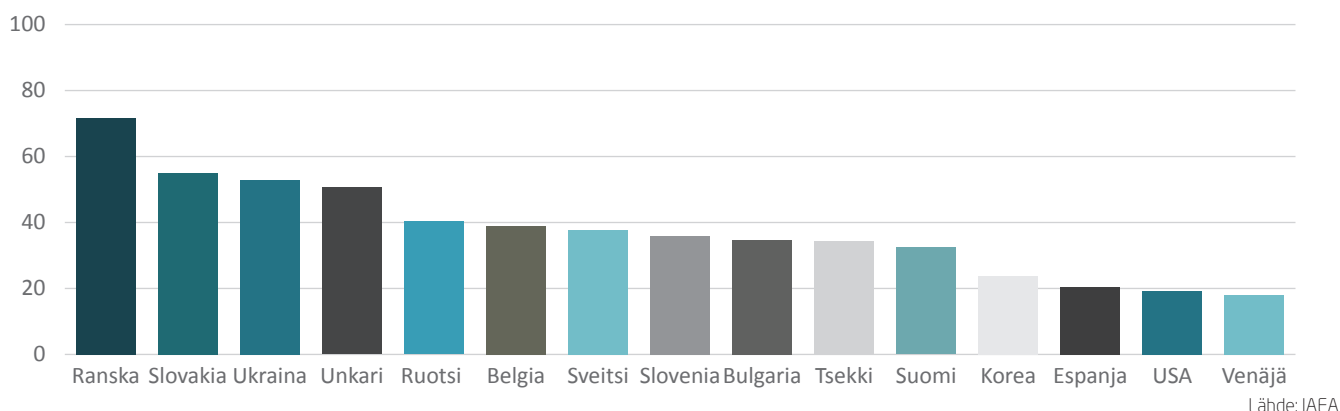
Maailmassa oli tammikuussa 2023 yhteensä noin 440 ydinvoimalaitosyksikköä yli 30 eri valtiossa. Maailman ydinvoimalaitosten yhteenlaskettu kapasiteetti on noin 395 000 MW ja ne tuottavat vuosittain sähköä noin 30-kertaisesti koko Suomen sähköntarpeen. Koko maailman sähköntuotannosta katetaan ydinvoimalla noin 10 prosenttia. EU:n alueella ydinvoimalla tuotetaan noin neljännes sähköstä. Ydinvoiman osuus sähköntuotannosta oli vuonna 2018 suurin Ranskassa, Slovakiassa, Unkarissa, Ukrainassa ja Ruotsissa.

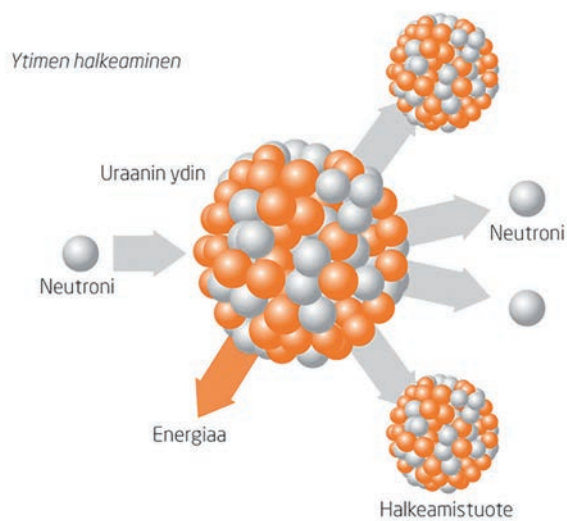
Lisäydinvoimaa rakennetaan erityisesti Aasiaan. Kiinassa oli vuonna 2022 rakenteilla yli 20 uutta laitosityksikköä, Intiassa kahdeksan ja Etelä-Koreassa kolme uutta laitosityksikköä. Myös Euroopassa ydinenergiainvestoinnit kiinnostavat ja monessa EU-jäsenmaassa on suunnitteilla uusia hankkeita.

Maailman ydinvoimareaktoreiden lukumäärä vuoden 2020 alussa ja maat joissa eniten reaktoreita
Yhteensä 447 kpl

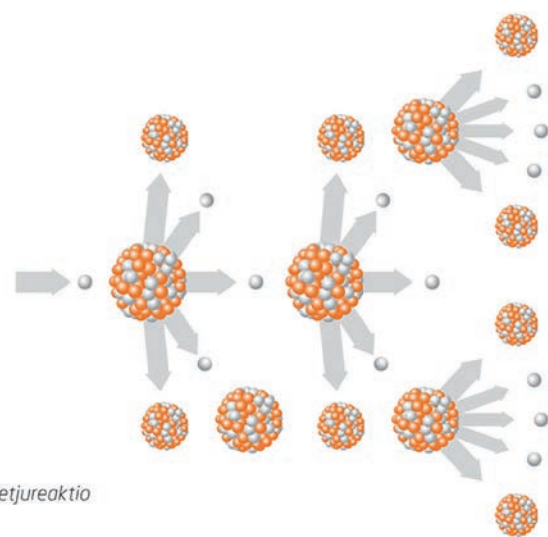


Ydinvoiman osuus eri maiden sähköntuotannosta vuonna 2018





Energian tuotanto ydinvoimalaitoksessa perustuu vapaiden neutronien aikaansaamaan atomiydinten halkeamisessa vapautuvaan energiaan.



Ketjureaktio

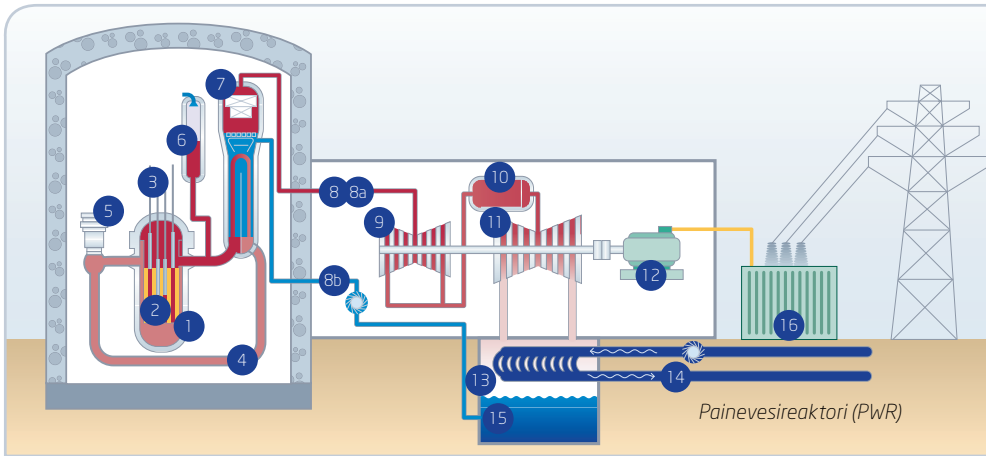
Ydinreaktorin toimintaperiaate

Ydinreaktori tuottaa lämpöä energialähteenä käytettävän uraanin atomiydinten haljetessa. Lämpö kiehuuttaa reaktoripaineastiassa olevan veden korkeapaineiseksi höyryksi. Höyry pyörittää turbiinia, jonka akselille kytketty generaattori kehittää sähköä.

Atomiytimet hajoavat neutronien törmäyksestä. Uraaniytimen halkeamisessa syntyy yleensä kaksi keskiraskasta atomiydintä ja lisäksi 2–3 vapaata neutronia. Halkeamistuotteiden ja neutronien yhteenlaskettu massa on hiukan pienempi kuin alkuperäisen uraaniytimen massa. Erotus on muuttunut energiaksi, joka aluksi ilmenee atomien ja neutronien liike-energiana, mutta muuttuu nopeasti lämmöksi neutronien törmäillessä ympäröiviin atomiytimiin. Reaktorissa uraani on pieninä nappeina, joiden pituus ja halkaisija ovat noin 1 cm. Uraaninapit ovat kaasutiiviissä metalliputkissa eli polttoainesauvoissa. Tällaisia polttoainesauvoja on reaktorissa useita kymmeniätuhansia niputettuina 80–300 sauvan polttoaineelementeiksi. Ne muodostavat reaktorin sydämen, joka on sijoitettu jäähdytysaineella täytettyyn paineestiaan. Sauvojen välitse virtaava vesi kuljettaa lämmön reaktorista turbiinille.

Vapautuneet neutronit liikkuvat valtavalla nopeudella, keskimäärin kymmenentuhatta kilometriä sekunnissa. Neutronit hidastetaan liikumaan muutaman tuhat metriä sekunnissa, mikä lisää uraaniytimien halkeamisen todennäköisyyttä moninkertaisesti. Hidastimena käytetään esimerkiksi vettä, raskasta vettä tai grafiittia. Jos polttoaineeeksi valitaan uraanin sijasta plutonium, voidaan rakentaa reaktori, jonka toiminta perustuu hidastamattomien neutronien aikaansaamiin ydinten halkeamisiin. Nopeilla neutroneilla toimivaa reaktoria nimitetään nopeaksi reaktoriksi tai hyötöreaktoriksi.

Reaktorin tehoa ohjataan säätelemällä neutronien ja siten atomiydinten halkeamisten määrää. Tehonsäätö tapahtuu polttoainesauvojen välissä olevilla säätösauvoilla. Sauvat sisältävät esimerkiksi booria tai kadmiumia, jotka sitovat tehokkaasti neutroneja.



1. Reaktori
2. Sydän
3. Säätösauvat
4. Primääripiiri (veden kierto)
5. Pääkiertopumppu
6. Paineistin
7. Höyrystin
8. Sekundääripiiri
- 8a. Höyry turbiinille
- 8b. Syöttövesi höyrystimille
9. Korkeapaineturbiini
10. Välitulistin
11. Matalapaineturbiinit
12. Generaattori
13. Lauhdutin
14. Merivesipiiri
15. Lauhde
16. Muuntaja

Kevytvesireaktorit

Painevesireaktori (PWR)

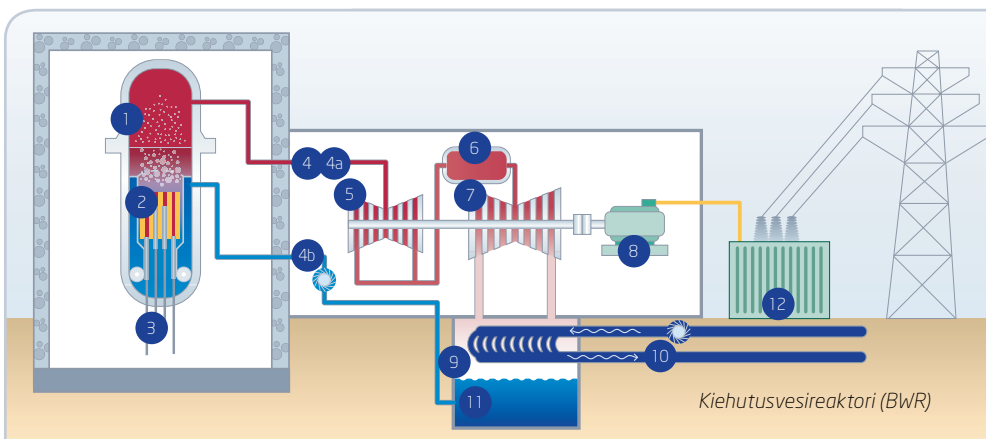
Painevesireaktorissa ylläpidetään niin korkeaa painetta, että vesi ei kiehu huolimatta noin 300 asteen lämpötilasta. Tavallisimmin paine on 150 ilmakehää (15 MPa). Reaktorista kuuma vesi kiertää nesteenä höyrystimeen, jossa se luovuttaa lämpönsä putkiston seinämien läpi höyrystimen toisiopuolella kulkevalle vedelle. Radioaktiiviset aineet eivät siirry lämmön mukana toisiopiiriin.

Toisiopuolella veden paine on noin 70 ilmakehää (7 MPa). Se kiehuu höyryksi, joka johdetaan turbiiniin. Höyrystin erottaa reaktorijärjestelmän ja turbiinijärjestelmän vedet toisistaan, minkä vuoksi painevesireaktorin turbiinilaitoksessa ei ole radioaktiivisuutta.

Suomessa Loviisan ydinvoimalaitoksen molemmat reaktorit sekä Olkiluoto 3 ovat painevesireaktoreita.

Kiehumusvesireaktori (BWR)

Kiehumusvesireaktorissa paine on 70 ilmakehää (7 MPa). Vesi kiehuu höyryksi reaktorin sisällä polttoainesauvojen välissä. Höyry siirtyy suoraan reaktorista turbiiniin. Höyry on myös radioaktiivista, eikä turbiinin lähellä voi oleskella laitoksen käydessä. Turbiinin luokse voi mennä heti laitoksen pysäyttämisen jälkeen. Kiehumusvesireaktorista puuttuvat höyryn kehittämiseen tarvittava höyrystin sekä paineen ylläpitämiseen tarvittavat laitteet, mikä tekee laitoksesta painevesireaktoria yksinkertaisemmän. Suomessa Olkiluoto 1 ja 2 edustavat kiehumusvesitekniikkaa.



1. Reaktori
2. Sydän
3. Säätösauvat
4. Primääripiiri
- 4a. Höyry turbiinille
- 4b. Syöttövesi reaktoriin
5. Korkeapaineturbiini
6. Välitulistin
7. Matalapaineturbiinit
8. Generaattori
9. Lauhdutin
10. Merivesipiiri
11. Lauhde
12. Muuntaja

Muut reaktortyytit

Vesijäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori (LWGR)

Neuvostoliitossa kehitetyssä RBMK-tyyppisessä reaktorissa hidastimena toimii grafiitti. Siinä jäähdytteenä on vesi. Kukin polttoaine-elementti on omassa paineputkessa, jossa jäähdytysvesi kulkee. Paineputkirakenteen etuna on se, että suurikokoista paineastiaa ei tarvita ja polttoainetta voidaan vaihtaa reaktorin toimiessa.

Raskasvesireaktori (PHWR)

Kanadalaisten ydinvoimalaitosten reaktortyyppi, Candu on myös rakenteeltaan paineputkireaktori. Candujen polttoaineena käytetään luonnonuraania ja sekä hidastimena että jäähdytteenä toimii raskas vesi. Raskasvesimolekyylissä on yksi happi- ja kaksi vetyatomia kuten tavallisessa vedessä, mutta vetyatomit ovat kaksi kertaa normaalia raskaampia. Candu-reaktorin jäähdyte kulkee paineputkissa ja hidastin on erillisessä vesivaipassa paineputkien ympärillä.

Kaasujäähdytteinen reaktori (GCR)

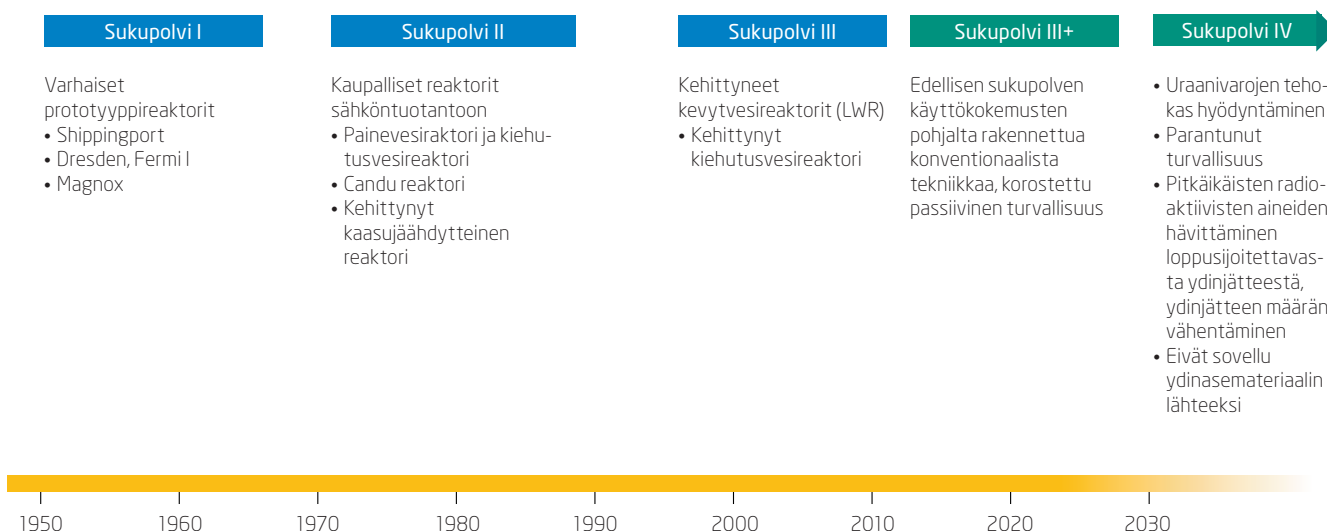
Kaasujäähdytteisissä reaktoreissa polttoaineena on luonnonuraani ja hidastinaineena toimii grafiitti, jäähdytysaineena käytetään kaasumaista hiilidioksidia. Näitä reaktoreita ovat mm. Magnox ja siitä kehittyneempi versio AGR. Tällaisia reaktoreita on ollut sähköntuotannossa Englannissa vuodesta 1956 lähtien.

Hyötöreaktori (FBR)

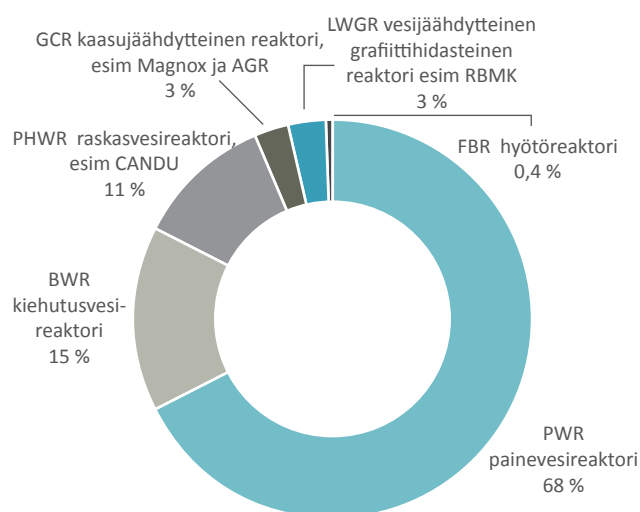
Hyötöreaktoreissa ei käytetä hidastinainetta, vaan tarkoituksena on pitää elektronien liike-energia mahdollisimman korkeana. Hyötöreaktori muuttaa luonnonuraanissa olevaa uraani-238-isotooppia halkeamiskelpoiseksi plutonium-239-isotoopiksi. Koska valtaosa (runsas 99 prosenttia) luonnonuraanista on uraani-238:aa, uraanikilosta saatava sähkömäärä kasvaa hyötöreaktorien avulla monikymmenkertaiseksi. Maailmassa on käytössä muutama natriumjäähdytteinen hyötöreaktori, mutta toistaiseksi niiden tuottaman sähkön hinta ei ole kilpailukyinen.

Neljännän sukupolven reaktorit

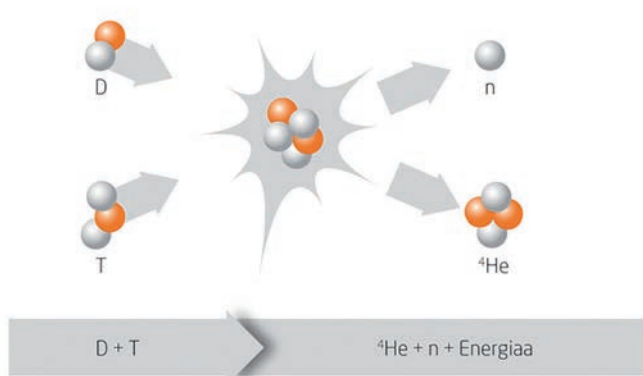
Neljännän sukupolven ydinteknologian tavoitteena on kehittää turvallisempia ja taloudellisempia reaktortyypppejä. Tavoitteena on pitkäaikaisten radioaktiivisten aineiden hävittäminen loppusijoitettavasta ydinjätteestä ja ydinjätteen määrän vähentäminen. Käytännössä tämä tarkoittaa siirtymistä suljettuun polttoainekiertoon, jossa ydinpolttoaineeseen syntyvät aktinidit erotetaan fissiotuotteista ja käytetään uudelleen energiantuotantoon reaktoreissa.



Maailman ydinvoimalaitokset tyypeittäin vuonna 2019



Lähde: World Nuclear Association



Fuusiossa energian tuotanto perustuu kahden kevyen atomiytimen yhdistymiseen. Raskaat vetyisotoopit, deuterium (D) ja tritium (T), fuusioituvat heliumytimeksi ja vapaaksi neutroniksi. Samalla vapautuu suuri määrä energiaa. Yksi gramma DT-polttoainetta tuottaa jopa 95 000 kWh energiaa.

Fuusio

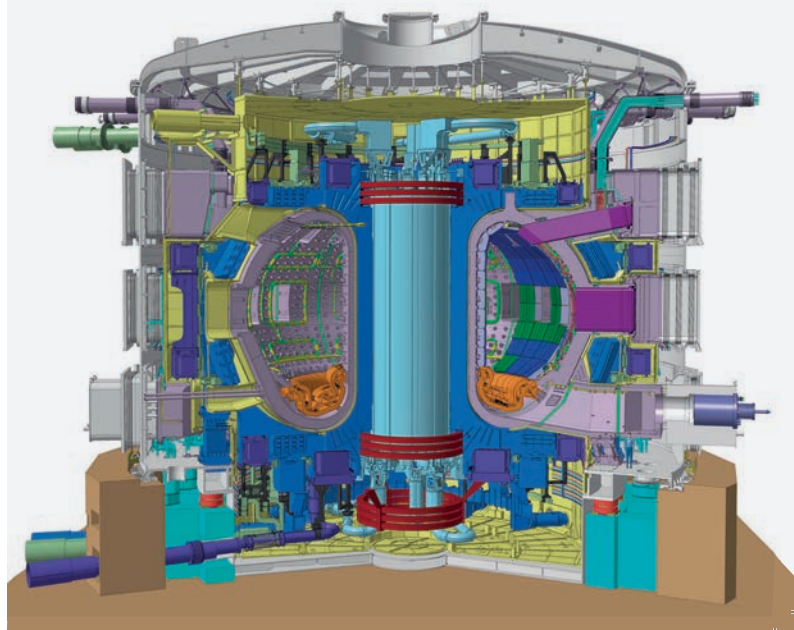
Auringon ja muiden tähtien lämmöntuotto perustuu fuusioreaktioon. Fuusioenergian hyvinä puolina ovat turvallisuus, polttoaineen saatavuus ja ympäristöystävällisyys. Fuusioreaktiossa ei synny radioaktiivista käytettyä polttoainetta. Reaktorin sisäosien materiaalit kuitenkin aktivoituvat fuusioreaktiossa vapautuvien neutronien törmäillessä seinämiin. Ne on reaktorin purkuvaiheessa käsiteltävä kuten muukin radioaktiivinen jäte.

ITER-fuusiokoereaktori

Euroopan Unionilla on ollut oma fuusiotutkimusohjelma 1970-luvulta lähtien. Ison-Britannian Culhamiin rakennettiin tokamak-tyyppinen tutkimusreaktori JET:iä (Joint European Torus), joka aloitti toimintansa vuonna 1983. JET:istä seuraava kehitysaskel on kansainvälisen fuusiokoereaktorin ITER:in (International Thermonuclear Experimental Reactor) rakentaminen. ITER rakennetaan Ranskaan Cadarachen tutkimuskeskukseen EU:n, USA:n, Venäjän, Etelä-Korean, Japanin, Kiinan ja Intian yhteistyönä. ITER-koereaktorin yleistavoitteena on osoittaa fuusioenergian tieteellistekninen toteutettavuus. Fuusion saaminen kaupalliseen energiantuotantoon kestää vielä noin 40-50 vuotta.

Lisätietoa

www.iter.org





Kuva: STUK

Ydinvoimalaitoksen ympäristövaikutukset ja niiden valvonta

Suomen ydinvoimalaitosten ympäristövaikutukset ovat koko käyttöiän olleet pieniä ja päästöt vain murto-osa sallituista arvoista.

Ydinvoimalaitosten käyttö ei aiheuta happamoittavia eikä hiilidioksidipäästöjä käytännössä lainkaan. Ydinvoimalaitoksen normaalikäytön ympäristövaikutukset liittyvät pääosin lämpimän jäähdytysveden laskemiseen mereen.

Ydinvoimalaitoksen ympäristöä valvotaan monipuolisten säteilyannos- ja radioaktiivisuusmittausten avulla. Mittausohjelmaan sisältyy ympäristön säteilyannosten ja säteilyannosnopeuden jatkuva mittaus useissa pisteissä sekä runsaasti näytteiden radioaktiivisuusmäärittämiä. Ympäristöstä kerätään säännöllisen ohjelman mukaan muun muassa ilma-, sadevesi-, maa-, kasvi-, maito-, merivesi-, sedimentti- ja kalanäytteitä. Näiden mukana ihmiseen voi joutua radioaktiivisuutta tai niiden avulla radioaktiivisten aineiden kulkeutumista voidaan helposti seurata.

Radioaktiivisten päästöjen valvonta

Päästöt ympäristöön voivat tapahtua vain valvottuja reittejä pitkin ilmastointipiipun kautta ilmakehään tai jäähdytysveden purkukanavan kautta mereen. Kaasumaiset päästöt tapahtuvat keskitetysti laitoksen ilmastointipiipun kautta. Piipussa on näytteenottolaitteisto, jonka kautta osa ulos menevästä kaasusta kulkee. Näytevirtauksessa olevat hiukkasmaiset aineet jäävät näytteenottosuodattimeen, joka vaihdetaan ja analysoidaan määrävälein. Kaasumaisten aineiden radioaktiivisuus mitataan jatkuvatoimisella aktiivisuusmittarilla. Määrävälein otetaan myös kaasusta näytteitä isotooppikohtaista analyysia varten. Vastaavanlaisella näytteenottomenettelyllä valvotaan myös laitokselta vesistöön päästettävien jätevesien aktiivisuutta.

Ympäristövalvonnan näytteiden keruusta vastaa pääosin voimalaitoksen käyttäjä. Näytteiden analysointi tapahtuu erikoislaboratorioissa, joissa on käytettävissä hyvin vähän aktiivisuutta sisältävien näytteiden mittaamiseen tarvittava tekniikka. Viranomaisten suorittama riippumaton näytteenotto ja analysointi varmentavat ja kontrolloivat laitoksen käyttäjän suorittamaa ympäristönvalvontaa.

Radioaktiivisten aineiden päästöt

Ydinvoimalaitoksen sallittu radioaktiivisten aineiden päästö ympäristöön on määritelty niin, ettei kukaan laitoksen lähistöllä asuva voi saada suurempaa kuin 0,1 millisievertin säteilyannoksen vuodessa. Suomen ydinvoimalaitosten ympäristölle aiheutuvat säteilyannokset ovat olleet enintään muutaman prosentin sallitusta raja-arvosta. Mittaamalla on mahdoton havaita tämän suuria annoksia ympäristössä, koska ne peittyvät tuhansia kertoja suuremman luonnon taustasäteilyn ajallisiin vaihteluihin.

Yleisimpiä kevytvesireaktoreista ilmaan pääseviä aineita ovat fissiossa syntyneet jalokaasut (xenon ja krypton), kaasumaiset aktivoitumistuotteet (lähinnä hiili-14) sekä halogeenit (jodit). Suurin osa ympäristöön pääsevistä radionuklideista on niin lyhytikäisiä, että niitä on havaittavissa vain aivan laitoksen lähiympäristössä. Lisäksi radioaktiiviset jalokaasut laimenevat ilmakehässä eivätkä laskeudu maan pinnalle. Lähiympäristön asukkaiden mittauksissa ei ole havaittu ydinvoimalaitokselta peräisin olevia radioaktiivisia aineita.

Reaktorin jäähdytysvedessä olevat korroosiotuotteet ja lisäaineet aktivoituvat veden virratessa reaktorin läpi. Myös polttoaineesta peräisin olevia aktiivisia aineita saattaa joutua veteen. Radioaktiiviset aineet poistetaan vedestä primääripiirin puhdistuslaitoksessa. Puhdistuslaitosten käytetyt aktivoituneet ioninvaihtohartsit siirretään nestemäisten jätteiden varastoon, jossa jätteet kiinteytetään ennen loppusijoitusta. Suurimmat radioaktiiviset päästöt veteen koostuvat tritiumista, jonka poistaminen vedestä ei käytännössä onnistu. Silti myös tritiumpäästöt ovat käytännössä vain noin 10 prosenttia sallitusta.

“Ydinvoimalaitoksen ympäristöä valvotaan monipuolisten säteilyannos- ja radioaktiivisuusmittausten avulla.”

Jäähdytysvesi

Jäähdytysvesi lämpiää laitoksen läpi kulkiessaan runsaat 10 astetta. Lämmön vaikutusalue meressä on muutama neliökilometri. Selvimmin jäähdytysveden vaikutuksen huomaa talvella, jolloin se saa purkukohdalle aikaan sulan ja heikon jään alueen, mikä vaikeuttaa alueella liikkumista ja talvikalastusta.

Ydinvoimalaitosta ympäröivällä merialueella valvotaan lämpimän veden vaikutuksia ympäristöön. Veden lämpötiloja tarkkaillaan jatkuvasti mittauksin. Veden erilaisia epäpuhtauksia seurataan määrävällein otetuilla näytteillä. Veden biologisen tilan valvontaan sisältyy planktonitutkimuksia sekä pohjaeläin- ja pohjakasvimäärityksiä. Alueen kalakantoja ja kalansaaliita seurataan määrärajojen tehtävillä kalatalousselektiviteyksillä.

Lämpötilan nousu lisää biologista toimintaa purkualueella. Sama vaikutus on jääpeitteen puuttumisella, koska auringonvalo pääsee vaikuttamaan veteen pidemmän ajan vuodesta. Tämä aiheuttaa purkuaukon lähialueella lievää rehevöitymistä. Jäähdytysveden aiheuttamat muutokset virtauksissa ja lämpötiloissa saattavat vaikuttaa myös alueen kalojen lajisuhteisiin kalojen hakeutuessa niille sopiviin olosuhteisiin. Seuranta tutkimusten perusteella näyttää kuitenkin siltä, että lämmentyneellä vedellä on positiivinen vaikutus paitsi kalojen kasvuun myös kalastoon.



Uraanivarat

Uraania on maapallolla suuria määriä. Maankuoressa on keskimäärin noin 4 g uraania tonnissa.

Yleisesti uraania louhitaan sellaisista esiintymistä, joissa sitä on kymmeniä kiloja malmitonnissa. Joissakin kaivoksissa uraania saadaan sivutuotteena muiden malmien louhinnasta.

Suurimmat tunnetut uraanivarat ovat Australiassa, Kazakstanissa, Venäjällä, Etelä-Afrikassa, Kanadassa, USA:ssa ja Namibiassa, joissa tuotetaan yhteensä noin 80 prosenttia uraanista.

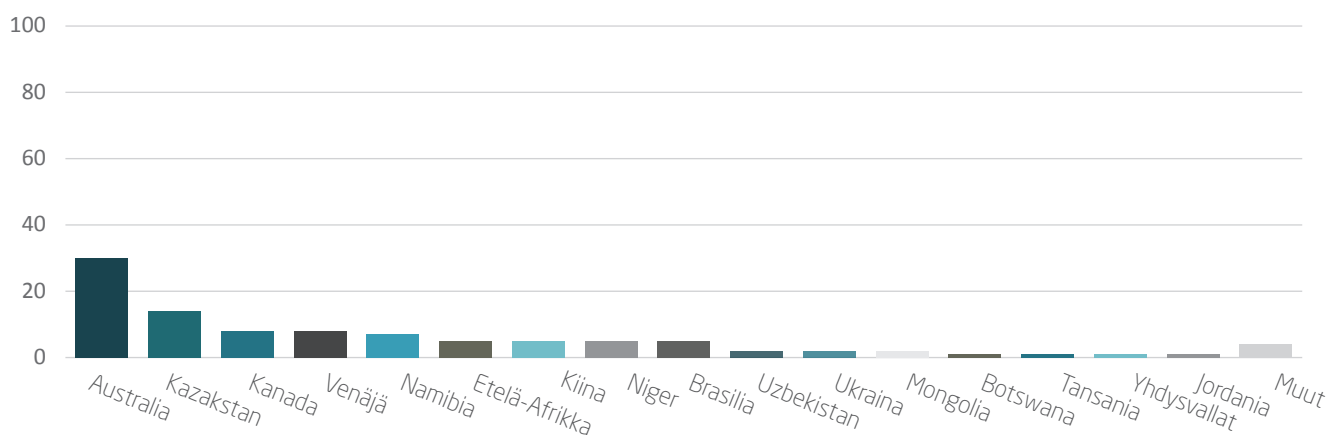
Maankuoren uraanivarat voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: tunnetut ja identifioitavat varat, joiden sijainti on tiedossa ja joiden määrästä on vähintään karkea mittauksiin perustuva arvio sekä arvioidut lisävarat, joiden olemassaolo on päätelty tilastollisesti yleiseen geologiseen tietämykseen perustuen. Tunnettujen uraanivaroja on noin 4,5 miljoonaa tonnia. Vaikeammin ja kalliimmin hyödynnettäviä sekä toistaiseksi spekulatiivisia uraanivaroja arvioidaan edellisten lisäksi olevan noin 11 miljoonaa tonnia.

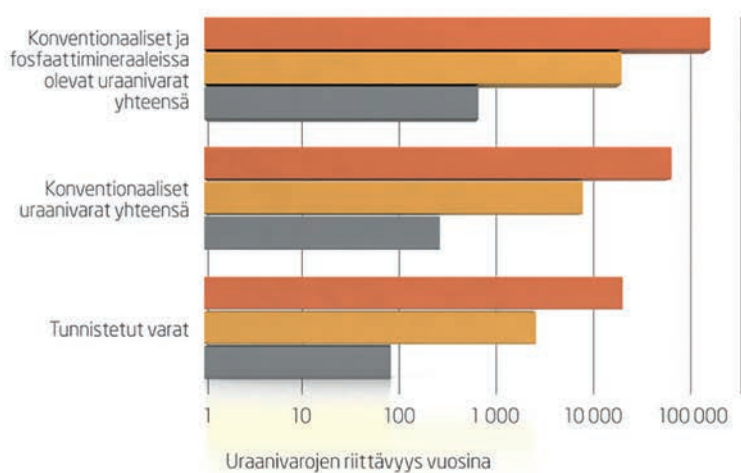
Maailman ydinvoimalaitosten nykyinen uraaninkulutus on runsaat 68 000 tonnia vuodessa, joten nykykulutuksellakin olemassa olevat tunnetut uraanivarat riittävät useiksi kymmeniksi vuosiksi.

Uraanin riittävyyttä on mahdollista lisätä myös reaktorin polttoainetaloutta parantamalla ja ottamalla käyttöön uraania tehokkaammin hyödyntäviä reaktorityyppejä. Nykyiset kevytvesireaktorit tuottavat yhdestä uraanikilosta noin 40 000 kilowattituntia sähköenergiaa. Kierrättämällä käytetty ydinpolttoaine uuden polttoaineen valmistukseen saadaan energiaa noin 30 prosenttia enemmän. Parannukset kevytvesireaktorin sydämen rakenteessa voivat edelleen lisätä uraanikilosta saatavaa sähkömäärää 10–20 prosenttia.

Raakauraanin ohella ydinvoimalaitoksen polttoainetta voidaan valmistaa kierrätysaineista. Niitä ovat jälleenkäsitelty käytetty ydinpolttoaine ja laimennettu aseuraani.

Maailman tunnetut, kohtuullisin kustannuksin hyödynnettävät uraanivarat vuonna 2017





- Nopeisiin reaktoreihin perustuva polttoainekierto; kaikkien aktinidien kierrätys
- Nopeisiin reaktoreihin perustuva polttoainekierto; plutoniumin kierrätys
- Nykyinen polttoainekierto (kevytvesireaktorit); ei jälleenkäsittelyä

Uraanivarojen riittävyys vuoden 2004 käyttötasolla perustuen erilaisiin polttoainekierto- ja kierrätysratkaisuihin ottaen huomioon tunnistetut uraanivarat, todennäköiset lisävarat sekä fosfaattimineraaleihin sisältyvä uraani.

Polttoainekierto

Kaivos

Uraanin keskimääräinen pitoisuus maankuoressa on muutama gramma tonnissa, ja louhinta alkaa olla kannattavaa, jos uraanin osuus malmin tonnista on vähintään noin kilo, eli 0,1 %.

Konversio

Kaivoksella uraanimalmi rikastetaan ja puhdistetaan uraanioksidiksi (U3O8).

Väkevöinti

Väkevöittäessä halkeamiskelpoisen uraani-isotoopin U-235:n pitoisuus nostetaan luonnonuraanin 0,7 prosentista vähintään 3 prosenttiin.

Polttoaineen valmistus

Väkevöity uraanista puristetaan 10 mm:n läpimittaisia ja korkuisia tabletteja, jotka ladotaan polttoainesauvoihin. Sauvat suljetaan kaasutiiviisti polttoaineriipiksi, jotka toimitetaan voimalaitoksille.

Polttoaineen käyttö

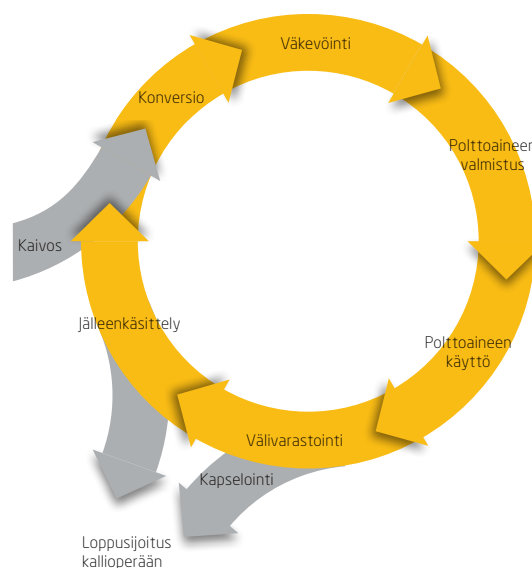
Reaktorissa uraanin halkeamiskelpoisen isotoopin määrä vähenee. Kun polttoaine poistetaan reaktorista, sen uraani-235-pitoisuus on suunnilleen luonnonuraanin luokkaa.

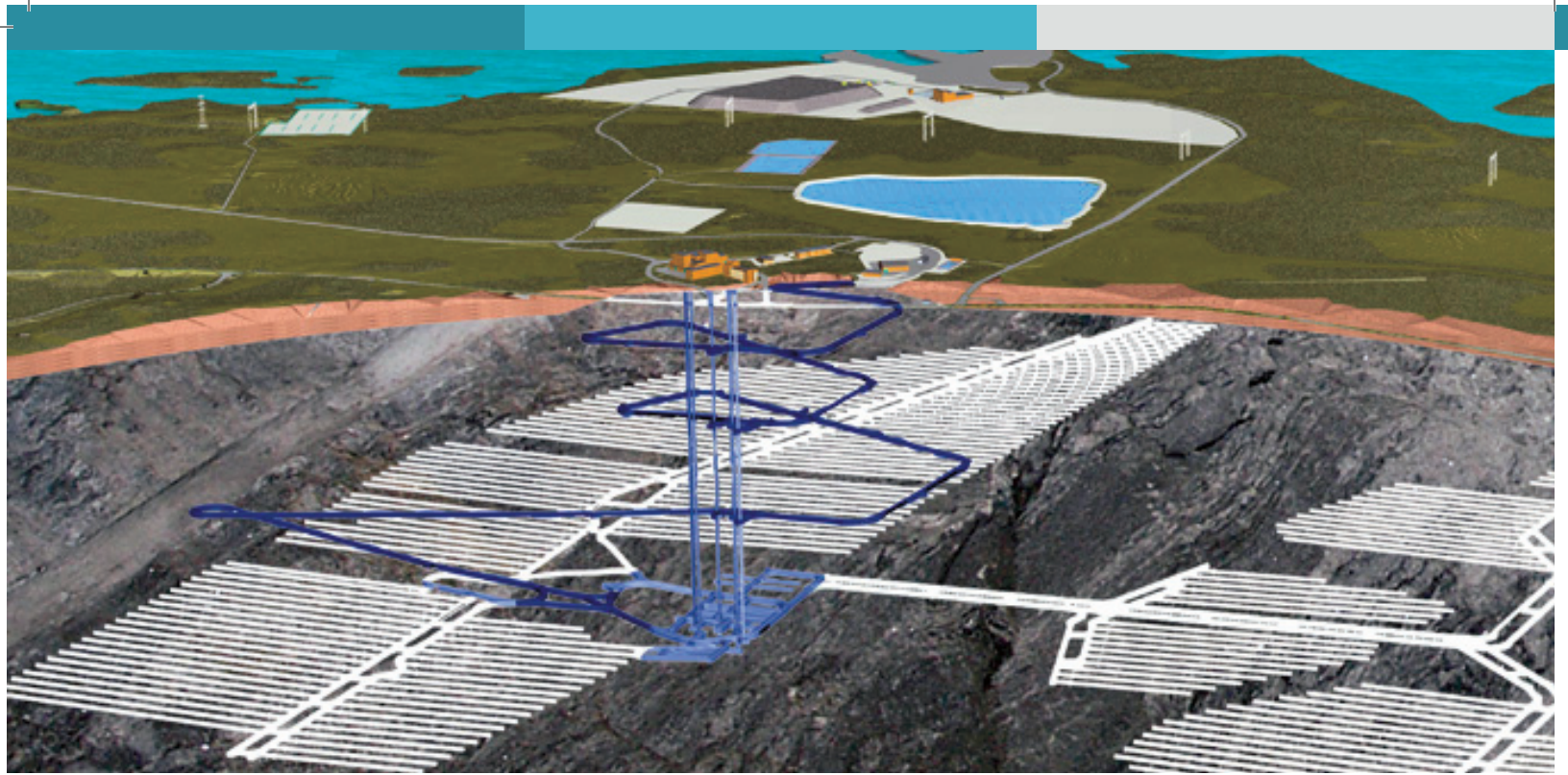
Välivarastointi

Reaktorista poistettu ydinpolttoaine varastoidaan aluksi voimalaitoksella. Muutaman vuoden kuluttua polttoaineriiput siirretään erilliseen välivarastoon.

Jälleenkäsittely

Käytetystä ydinpolttoaineesta voidaan jälleenkäsittelyn avulla kierrättää uusi polttoaineeksi uraani ja plutonium. Jälleenkäsittely ei poista loppusijoituksen tarvetta. Suomessa ei jälleenkäsittellä käytettyä polttoainetta.





Ydinjätehuolto Suomessa

Suomen ydinenergialain mukaan kaikki Suomessa syntyvä ydinjäte on käsiteltävä ja loppusijoitettava Suomessa.

Jätehuoltovelvolliset ydinvoimayhtiöt ovat vastuussa ydinjätteiden huollon turvallisesta toteuttamisesta ja siitä aiheutuvista kustannuksista, kunnes jätteet on Säteilyturvakeskuksen hyväksymällä tavalla loppusijoitettu.

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) määrää ydinjätehuoltovelvollisille vuosittain ydinjätehuutomaksun, jonka voimayhtiöt maksavat valtion ydinjätehuutorahastoon jätehuollon tulevien kustannusten kattamiseksi. Tarvittavat varat voimayhtiöt keräävät etukäteen ydinsähkön hinnassa.

Jätehuoltovarojen on katettava kaikki ydinjätteiden käsittelystä ja loppusijoituksesta sekä näiden valmisteluista aiheutuvat kustannukset sekä itse ydinvoimalaitoksen purkamiskustannukset ja purkujätteen loppusijoituksesta aiheutuvat kustannukset.

Voimalaitosjätteet

Voimalaitosjätteillä tarkoitetaan kaikkia voimalaitoksella syntyviä radioaktiivisia jätteitä kuten prosessivesien puhdistuksessa syntyviä käytettyjä ioninvaihtohartseja ja suodatinmateriaaleja, käytöstä poistettuja koneenosia, putkia sekä suojavaatteita.

Voimalaitosjätteissä on vain murto-osa siitä aktiivisuudesta, joka sisältyy käytettyyn polttoaineeseen. Radioaktiivisten aineiden puoliintumisajat vaihtelevat muutamasta vuodesta muutamaankymmeneen vuoteen. Voimalaitosjätteitä kertyy Suomessa yhteensä runsaat 400 kuutiometriä vuodessa.

Suomessa matala- ja keskiaktiivisia ydinjätteitä on loppusijoitettu Olkiluodossa vuodesta 1992 ja Loviisassa vuodesta 1997 alkaen. Matala- ja keskiaktiiviset voimalaitosjätteet loppusijoitetaan tynnyreihin pakattuina voimalaitosalueelle noin 70–100 metrin syvyydelle louhittuihin kallioluoliin. Myös voimalaitosten purkujätteet sijoitetaan näihin tiloihin louhittaviin lisätunneleihin.

“Loppusijoitustila muodostuu noin 420 metrin syvyydelle kalliooperään louhittavasta tunneliverkostosta.”

Käytetty ydinpolttoaine

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen suunnittelu aloitettiin Suomessa jo Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten rakentamisvaiheessa. Vuonna 2001 eduskunta vahvisti valtioneuvoston tekemän periaatepäätöksen loppusijoituslaitoksen rakentamisesta Olkiluotoon. Keväällä 2002 eduskunta hyväksyi periaatepäätöksen loppusijoituslaitoksen laajentamisesta Suomen viidennen ydinreaktorin käytetylle polttoaineelle. Loppusijoitustilat ja maanpäälliset rakennukset rakennetaan siten, että loppusijoitus voi alkaa 2020-luvulla. Loppusijoitustilat on tarkoitus sulkea vuoden 2100 jälkeen.

Loppusijoitus

Noin kaksi miljardia vuotta vanhaan, seismisesti vakaaseen peruskallioon rakennettava loppusijoitustila tarjoaa turvalliset olosuhteet käytetyn ydinpolttoaineen sijoitukseen. Loppusijoitustila muodostuu noin 420 metrin syvyydelle kallioperään louhittavasta tunneliverkostosta.

Kaksinkertaisiin metallikapseleihin pakattava polttoaine sijoitetaan tunnelien pohjaan porattaviin pystysuoriin reikiin tai pitkiin vaakatunneleihin. Kapselin ja reiän seinämän välit täytetään bentoniittisavella, joka paisuu pohjaveden imeytyessä siihen muodostaen tiiviin suojakerroksen kapselin ympärille.

Käytetyn ydinpolttoaineen luolastot ja ajotunnelit täytetään lopuksi kovaksi puristetuilla savilohkoilla. Jätteet eristetään monin teknisin vapautumisestein, jotka estävät ja hidastavat radioaktiivisten aineiden vapautumista loppusijoitustilasta kallioperään ja niiden kulkeutumista elolliseen luontoon. Kallio toimii itsessään luonnollisena päästöesteenä radionuklidien kulkeutumiselle.

Loppusijoituksen turvallisuus varmistetaan ottamalla laskelmissa huomioon myös erittäin epätodennäköiset tapahtumat. Analysoituihin tapauksiin kuuluvat pienelläkin todennäköisyydellä odotettavissa olevat häiriötilanteet kuten jääkaudet siirrosliikuntoineen, maankohoaminen, maanjäristykset ja uusien heikkousvyöhykkeiden syntyminen. Myöskään ihmisen tahaton toiminta sijoituspaikan läheisyydessä ei vaaranna sijoituksen turvallisuutta.

Suomen nykyisten laitosten ydinjätehuollosta vastaa Posiva Oy

Posiva Oy:n tehtävänä on huolehtia omistajiensa, Fortumin ja Teollisuuden Voima Oyj:n, käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen liittyvistä tutkimuksista, tilojen rakentamisesta ja käytöstä. Loppusijoituksen toteutustavasta ja aikataulusta päättää työ- ja elinkeinoministeriö (TEM), joka myös valvoo jätehuoltotoimia sekä alan tutkimus- ja kehitystyötä. Laitosten ja toiminnan turvallisuuden valvonnasta vastaa Säteilyturvakeskus.

Ydinjätehuolto maailmalla

Ydinjätehuollon suunnittelu ja valvonta kuuluvat ensisijaisesti kansallisille viranomaisille, joita Suomessa edustavat työ- ja elinkeinoministeriö ja Säteilyturvakeskus. Wienissä toimivalla Kansainvälisellä atomienergiajärjestöllä (IAEA) on ylikansallinen, ohjaava rooli. Ydinjätehuoltoaan valmistelevat maat hyväksyivät 1997 IAEA:n puitteissa laaditun yleissopimuksen, jonka mukaan kukin maa raportoi ydinjätehuollostaan määräajoin muille allekirjoittajamaille. Globaalia ydinjätehuoltoa seuraa mm. OECD-maiden ydinenergiajärjestö NEA (Nuclear Energy Agency).

Keski- ja matala-aktiivisten jätteiden huollossa on monissa maissa edetty jo loppusijoitusvaiheeseen, muun muassa Ruotsissa, Ranskassa, Espanjassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa. Korkea-aktiivisen jätteen huollossa ollaan suunnitteluvaiheessa. Ydinjätteen loppusijoitusta maa- tai kallioperään tarvitaan kaikissa nykyisin tunnetuissa käsittelytavoissa.

Geologisen loppusijoituksen vaihtoehdoksi on esitetty käytetyn ydinpolttoaineen jatkuvaa välivarastointia. Jos nykypolvi viivyyttää loppusijoitusta siksi, että odotetaan tekniikan kehittymistä tai että välivarastointi on tulevaisuudessa mahdollisesti halvempaa, päätöstä loppusijoituksesta ei voi odottaa tulevilta sukupolvilta. Vastuun siirtämistä tuleville polville voidaan pitää eettisesti vääränä.

Lisätietoa

www.posiva.fi

www.stuk.fi www.tem.fi

www.iaea.org

Ydinjätteen kuljetukset

Vaarallisten aineiden kuljettamiseksi on erityiset määräykset, joissa aineet jaetaan ominaisuuksiensa mukaan mm. räjähdys-, palo- tai säteilyvaarallisiin ryhmiin.

Radioaktiivisten aineiden kuljetukset ovat noin pari prosenttia kaikista vaarallisten aineiden kuljetuksista. Radioaktiivisia aineita kuljetetaan sairaaloiden, teollisuuden ja tutkimuksen käyttöön sekä ydinvoimalaitosten polttoaine- ja jätehuollon yhteydessä.

Radioaktiivisia aineita kuljetetaan kaikilla eri kuljetusmuodoilla: maanteitse, rautateitse, ilmaitse ja meritse. Useimmat radioaktiivisia aineita sisältävät pakkaukset kuljetetaan muun tavaran mukana normaalina rahtitavarana. Kuljetuksen aikana ne pidetään erillään matkustaja- ja miehistötiloista eikä niitä saa jättää tiloihin, joihin ulkopuolisilla on pääsy.

Ydinvoimalaitosten polttoaineen valmistusta varten kuljetettavat ydinaineet ja tuore polttoaine eivät ole niin aktiivisia, että niiden käsittelyyn liittyisi olennaista säteilyvaaraa. Tuoreen polttoaineen kuljetuksia on Suomessa muutama vuosittain. Myös voimalaitoksessa syntyvistä ydinjätteistä suurin osa on melko matala-aktiivista. Näitä laitoksilla syntyviä matala- ja keskiaktiivisia jätteitä ei Suomessa juurikaan kuljeteta yleisillä teillä, koska ne käsitellään ja loppusijoitetaan laitosalueelle.

Käytetty ydinpolttoaine

Kaikkein eniten radioaktiivisia aineita sisältyy ydinvoimalaitoksen käytetyn polttoaineen tai siitä peräisin olevan korkea-aktiivisen jätteen kuljetuksiin. Käytettyä polttoainetta säilytetään reaktorista poistamisen jälkeen ydinvoimalaitoksella muutamia vuosia ennen sen kuljettamista laitokselta välivarastoon. Varastoinnin aikana polttoaineen radioaktiivisuus vähenee huomattavasti.

Korkea-aktiivisen jätteen kuljetuspakkauksilta vaaditaan monia sellaisia lujuus- ja materiaaliominaisuuksia, että ne kestävät mahdolliset onnettomuustilanteet. Onnettomuustestien aiheuttamat rasitukset ovat suuremmat kuin ne rasitukset, joiden kohteeksi pakkaus voi todellisen kuljetuksen aikana joutua. Lisäksi niiden rakenteen on johdettava polttoaineessa tai jätteessä syntyvä jälkilämpö ulkoilmaan sekä taattava alikriittisyys ja riittävä säteilysuoja gamma- ja neutronisäteilyä vastaan.

Käytettyä polttoainetta kuljetaan yleensä erityisvalmisteisella kalustolla. Maantie- ja rautatiekalustolta vaaditaan erityisrakennetta jo kuljetuspakkausten suuren painon vuoksi. Merikuljetuksia varten maailmassa on kymmenkunta erikoisvarusteista laivaa.

Maailmalla käytettyä polttoainetta on kuljetettu runsaasti jo vuosikymmenien ajan, eikä tiettävästi ole tapahtunut yhtään sellaista kuljetusonnettomuutta, jossa kuljetettava radioaktiivinen aine olisi aiheuttanut terveyshaittaa. Useasta Euroopan maasta ja Japanista viedään käytettyä polttoainetta Ranskaan ja Iso-Britanniaan jälleenkäsittelyyn, jossa polttoaineesta erotetaan vielä raaka-aineeksi käyttökelpoinen uraani ja plutonium. Jälleenkäsittelymaat palauttavat kaikki jätteet sekä erotetun uraanin ja plutoniumin lähettäjämälle. Japanista on kuljetuksia tehty erityisrakenteisilla laivoilla noin sata kertaa. Ruotsin kaikilta ydinvoimalaitoksilta käytetty polttoaine kuljetetaan meriteitse yhteisvarastoon Oskarshamnin ydinvoimalaitokselle. Näitä kuljetuksia on vuosittain noin 15.

Ydinvoimalaitosten käyttöikä ja käytöstäpoisto

Ydinvoimalaitosten teknisen käyttöiän määräävät lähinnä laitteiden vanheneminen, kuluminen ja muu käytettävyyden aleneminen.

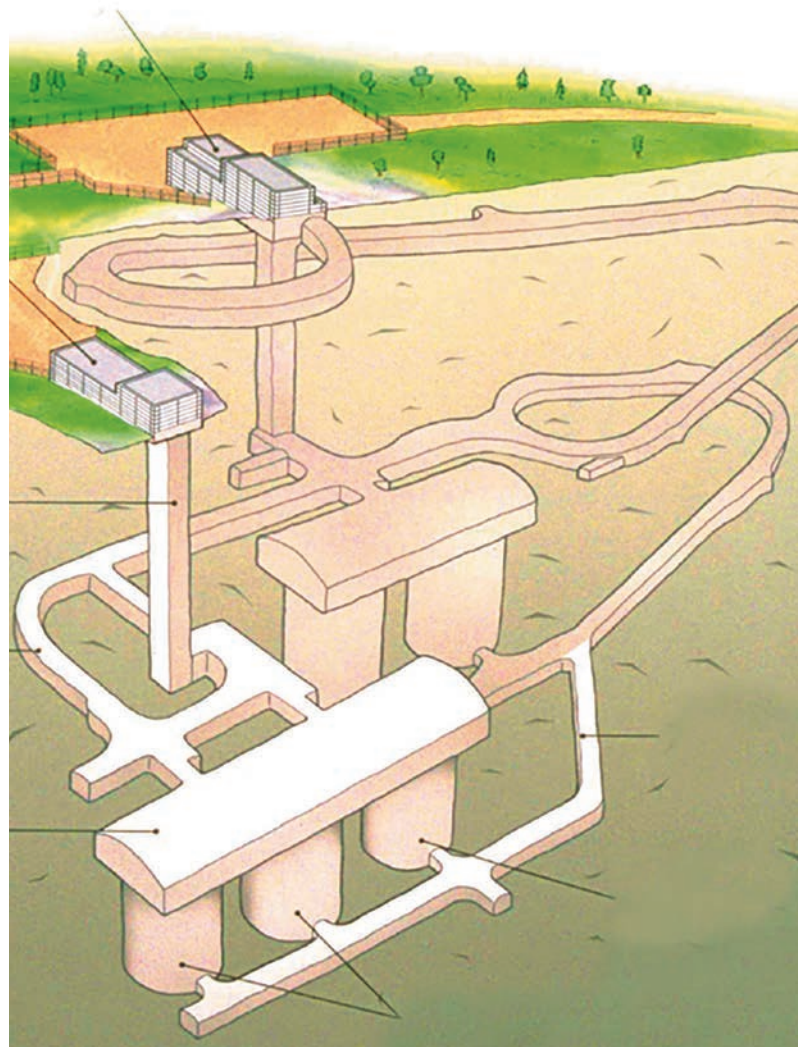
Näihin kuuluvat myös rakennemateriaalien väsyminen erilaisten kuormitusten alaisena. Laitoksen käytön aikana seurataan kaikkia käytön ja turvallisuuden kannalta tärkeitä laitososia erilaisin tarkastuksin ja kokein, joiden avulla saadaan viime kädessä viitteet siitä, milloin ollaan lähestymässä laitoksen teknisen käyttöiän päättymistä.

Reaktorin paineastian käyttöikä saattaa olla laitoksen käyttöiän määräävä tekninen tekijä. Neutronisäteilyn aiheuttama materiaaliominaisuuksien huononeminen rajoittaa paineastian ikää. Paineastian suuri koko ja paino sekä astian materiaalin ja ympäröivien rakenteiden korkea säteilytaso vaikeuttavat sekä vanhan paineastian purkua että uuden asennusta.

Käytöstäpoistokokemukset

Loviisan laitossyöksiköiden käyttöluvut ovat voimassa vuoden 2050 loppuun. Olkiluodon laitossyöksiköitä käytetään ainakin 60 vuotta. Pitkän käyttöiän edellytyksenä on, että laitosten todetaan olevan turvallisuusvaatimusten edellyttämässä kunnossa ja että käyttö on myös taloudellisesti kannattavaa. Purkamista varten on laadittu alustavat suunnitelmat, joita tarkennetaan jatkuvasti muualta saatujen kokemusten sekä tutkimus- ja kehitystyön perusteella. Rakennusten radioaktiiviset purkujätteet loppusijoitetaan laitosalueella sijaitseviin maanalaisiin kallioiloihin yhdessä voimalaitosjätteen kanssa.

Ydinvoimalaitosten loppuun saatetusta käytöstäpoistosta on maailmassa vasta melko vähän kokemusta. Laitosten iän lisäksi käytöstäpoiston syynä on tavallisimmin ollut se, että on pidetty taloudellisesti kannattamattomana uudistaa jo vanhentunutta laitosta vastaamaan tiukentuneita turvallisuusmääräyksiä. Useimmat tähän asti käytöstä poistetut laitokset ovat olleet lähinnä kokeiluluontoisesti rakennettuja laitostyyppisiä.



Ydinvoimalaitoksen käytöstäpoisto on laitoksen omistavan yhtiön vastuulla. Useissa maissa, mm. Suomessa, käytöstäpoistoon tarvittavat varat on myös rahastoitava etukäteen.

Käytöstäpoiston toteutus

Käytöstäpoiston ensimmäisessä vaiheessa laitokselta poistetaan polttoaine, radioaktiiviset jätteet ja muu "irtonainen" voimakkaasti radioaktiivinen materiaali. Laitoksen prosessijärjestelmät suljetaan niin, että niiden sisäpinoilla olevat radioaktiiviset aineet eivät pääse leviämään laitostiloihin. Tämä vaihe kestää yleensä muutamia vuosia.

Purkamiskustannusten ja turvallisuuden kannalta on edullista säilyttää laitosta tässä tilassa muutamien vuosikymmenien ajan. Radioaktiivisuus ehtii tänä aikana alentua murto-osaan alkuperäisestä, mikä tekee lopullisen purkamistyön helpommaksi ja purkuhenkilökunnalle vähemmän säteilyä aiheuttavaksi.

Laitoksen purkaminen on mahdollista myös välittömästi käytön lopettamisen jälkeen. Voimakkaimmin radioaktiiviset osat joudutaan tällöin käsittelemään kauko-ohjattuja laitteita käyttäen. Viivästetyssä purkamisessa voidaan laajemmin soveltaa normaaleja teknisiä menetelmiä.

Säteily ja radioaktiivisuus

Radioaktiiviset aineet lähettävät hajotessaan terveydelle haitallista ionisoivaa säteilyä.

Pääosa ihmiseen kohdistuvasta säteilystä tulee maaperässä olevista radioaktiivisista aineista, avaruuden kosmisesta säteilystä ja ihmisen kehossa luonnostaan olevista radioaktiivisista aineista. Noin 15 % suomalaisten keskimääräisestä säteilyannoksesta aiheutuu ihmisen toiminnasta, kuten säteilyn lääketieteellisestä käytöstä, ja vain alle 0,1 % ydinvoimasta.

Radioaktiivisessa hajoamisessa epävakaat atomiydin hajoaa itsestään toiseksi ytimeksi. Hajoamisessa ytimeksi poistuu pieni määrä massaa joko energiana tai neutronin, alfa- tai beetahiukkasen muodossa. Energiana poistuva gammasäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä samoin kuin näkyvä valo ja röntgensäteet.

Hajoamisen jälkeen ydin on tavanomainen pysyvä atomiydin tai se voi olla edelleen radioaktiivinen ja muuttua uudestaan, kunnes pääsee pysyvään tilaan. Radioaktiivisuus on aineen ominaisuus, joka ei siirry toiseen aineeseen säteilyn mukana. Säteilylle altistunut aine ei muutu radioaktiiviseksi.

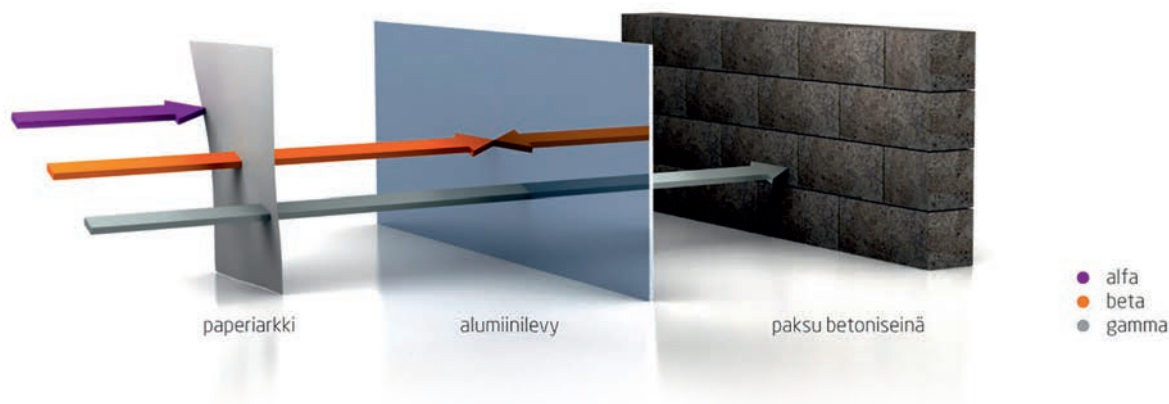
Radioaktiivisuuden mitta on tarkasteltavassa aineessa yhdessä sekunnissa hajoavien ytimien lukumäärä ja mittayksikkö on becquerel (Bq). Jos aineen aktiivisuus on yksi becquerel, siinä tapahtuu yksi hajoaminen sekunnissa.

Hajoamisen nopeutta mittaa käsite puoliintumisaika. Puoliintumisaikojen kuluessa puolet kyseisistä ytimistä hajoaa ja puolet jää ennalleen. Toisen puoliintumisaikojen jälkeen on jäljellä puolet puolesta eli neljäsosa jne. Puoliintumisaikat vaihtelevat huomattavasti. Joillakin radioaktiivisilla aineilla on hyvin lyhyt puoliintumisaika, jopa vain sekunnin murto-osia. Joidenkin aineiden puoliintumisaika voi olla miljardeja vuosia.

Säteilyn terveysvaikutukset ihmiselle

Säteilyn biologisia vaikutuksia mitataan säteilyannoksella, jonka yksikkö on sievert (Sv). Yleensä sievert on epäkäytännöllisen suuri annosmitta ja usein käytetään sievertin tuhannesosaa, millisievertiä (mSv) tai millisievertin tuhannesosaa, mikrosievertiä (μSv).

Säteilyn biologiset vaikutukset perustuvat sen soluissa aiheuttamiin ionisaatioihin eli sähkövarattujen atomien syntyymiseen. Ne voivat joko suoraan tai epäsuorasti vahingoittaa soluja ja erityisesti solutuman perimää. Soluvaurion vakavuuteen ei vaikuta se, onko säteily keinotekoisista vai luonnonsäteilyä, mutta siihen vaikuttaa se, missä ajassa kudos on säteilyannoksen saanut.



Eri säteilylajit vaimenevat aineessa eri tavoin. Alfahiukkanen menettää energiaansa nopeasti, joten sen kantama aineessa on lyhyt. Beetahiukkanen pystyy tunkeutumaan alfahiukasta syvemmälle. Gammasäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, joka pystyy tunkeutumaan paksujenkin ainekerrosten läpi. Säteilyn voimakkuus vähenee kuitenkin sitä enemmän mitä paksumman ainekerroksen läpi se on kulkenut.



Säteilyannoksen suuruuteen vaikuttavat radioaktiivisen aineen määrä, sen lähettämän säteilyn ominaisuudet sekä se, mihin elimen tai kudokseen radioaktiivinen aine kulkeutuu.

Säteilyn terveysvaikutukset voidaan jakaa kahteen ryhmään: suoriin laajasta solutuhosta johtuviin vaikutuksiin ja tilastollisiin haittavaikutuksiin, jotka johtuvat satunnaisesta geneettisestä muutoksesta yhdessä solussa.

Suorat säteilyvaikutukset liittyvät aina suuriin, lyhyessä ajassa saatuihin annoksiin. Noin 1000 mSv:n annos on raja, jonka alapuolella ei todennäköisesti synny ihmiselle välittömiä oireita. Säteily aiheuttaa välittömiä sairausoireita, jos annos lyhyessä ajassa, noin vuorokaudessa, ylittää 1000 mSv. Ensimmäisiä oireita ovat pahoinvointi ja kuume sekä suuremmilla annoksilla myöhemmin myös sisäiset verenvuodot. Alle 2000 mSv:n annoksen saaneen henkilön toipumisen todennäköisyys on hyvin suuri. Ennuste huononee annoksen kasvaessa. 6000 mSv:n annoksen saaneista toipuu enää vain pieni osa. Satunnaisia haittoja ovat mahdollisuus sairastua syöpään ja mahdollisuus perinnöllisten vaurioiden ilmenemiseen jälkeläisissä.

Satunnaiset haitat tulevat ilmi vasta vuosia altistuksen jälkeen. Haitan todennäköisyys pienenee annoksen pienentyessä. Mitä suurempi annos, sitä useamman solun perimään se vaikuttaa. Vaurio solun perimässä ei välttämättä johda terveyshaittaan. On hyvin todennäköistä, että se korjaantuu tai vauriosta ei ole haittaa. Jotta vaurioituneesta solusta syntyisi terveyshaitta, sen täytyy monistua. Edes silloin ei terveyshaitta ole varma, sillä vaurioiden syntymiseen vaikuttavat myös monet säteilystä riippumattomat tekijät kuten esimerkiksi hormonit.

Jos sukuolosuhteissa tapahtuu säteilystä tai muusta syystä johtuva mutaatio ja juuri tästä solusta kehittyy uusi yksilö, mutaatio löytyy uuden yksilön jokaisesta solusta. Tämä saattaa aiheuttaa yksilölle tai hänen jälkeläisilleen terveyshaitan.

Säteilyn ja syövän välistä yhteyttä ihmisellä on voitu tutkia muun muassa Hiroshiman ja Nagasakin uhritilastoista ja 1900-luvun alun röntgenlääkäreitä koskevista tilastoista. Seurantatutkimuksissa on selkeimmin havaittu leukemian lisääntyminen. Myös keuhko-, iho- ja kilpirauhassyövät lisääntyivät huomattavasti.

Tshernobylin ydinvoimalaitoksen onnettomuudessa säteilytautiin kuoli 134 henkilöä. Muita seurauksia oli 1990-luvulta alkaen havaitut noin 5000 kilpirauhassyöpätapausta. Tshernobylin on arvioitu aiheuttavan tulevana vuosikymmeninä noin 4000 ylimääräistä syöpäkuolemaa 600 000 säteilylle altistuneen asukkaan joukossa. Samana aikana muista syistä aiheutuvia syöpäkuolemia odotetaan noin 100 000. Pienten säteilyannosten aiheuttamaa syöpäriskiä ei voi väestössä havaita. Syöpä on hyvin tavallinen sairaus, eikä säteilyn aiheuttamaa syöpää voi erottaa muuten saadusta syövästä.

Lisätietoa

www.stuk.fi, www.unscear.org

Säteilyannosrajat

Työssään säteilyalaisiksi joutuvien henkilöiden annoksia valvotaan henkilökohtaisin annosmittarein.

Työntekijöiden valvonta

Säteilyannokset raportoidaan säännöllisesti säteilyturvallisuusviranomaiselle, joka säilyttää säteilyalaisessa työssä olleiden henkilöiden annoshistorian koko elämän ajan. Yksilökohtainen annosten mittaaminen ja seuranta on yksi syy siihen, että tälle ryhmälle sallittu vuotuinen annos on korkeampi kuin muille.

Säteilyturvakeskus valvoo ydinvoimalaitostyöntekijöiden henkilökohtaisia säteilyannoksia, jotta säteilytyöntekijän henkilökohtaiset annosrajat eivät ylittyisi. Säteilytyöstä työntekijälle aiheutuva efektiivinen annos ei saa ylittää arvoa 20 millisievertiä (mSv) vuodessa. Suomalaisen ydinvoimalaitostyöntekijän suurin säteilyannos oli 14 mSv vuonna 2018. Asetetut raja-arvot alitettiin selvästi.

Ydinvoimalaitosten ympäristön asukkaat

Säteilylähteen vaikutuspiirissä olevien henkilöiden annoksia ei aina seurata henkilökohtaisilla mittauksilla. Useimmiten annokset lasketaan teoreettisten mallien avulla. Esimerkiksi ydinvoimalaitoksen ympäristössä aiheutuvien annosten laskentaperusteena ovat laitoksella mitatut radioaktiivisten aineiden päästöt.

Ydinvoimalaitosten ympäristössä aiheutuvien annosten mittaaminen on käytännössä mahdotonta, sillä päästöistä aiheutuvat annokset ovat liian pieniä erottuakseen luonnollisen taustasäteilyn ajallisista ja paikallisista vaihteluista. Ydinvoimalaitoksen ympäristön asukkaan laskennallinen säteilyannos ei saa ylittää 0,1 mSv vuodessa. Loviisan ja Olkiluodon ympäristön eniten altistuneen asukkaan laskennallinen säteilyannos on ollut viime vuosina alle prosentin luokkaa sallitusta raja-arvosta.

Elintarvikkeiden pitoisuusrajoista

Viranomaiset ovat asettaneet pitoisuusrajoja esimerkiksi hengitysilman, juomaveden ja elintarvikkeiden sisältämälle radioaktiivisuudelle. Näiden rajojen määrittelyssä on lähtökohtana se, että kyseisen pitoisuuden sisältämää elintarviketta voi jatkuvasti käyttää ravintona eikä kehoon joutuva aktiivisuus saa aiheuttaa annosrajaa suurempaa vuotuista säteilyannosta nyt tai tulevaisuudessa. STUK seuraa jatkuvasti kotimaisten elintarvikkeiden radioaktiivisuutta. Elintarvikkeiden luonnollinen radioaktiivisuus aiheuttaa suomalaiselle vuodessa kaikkiaan 0,3 millisievertin säteilyannoksen. Keinotekoisien radioaktiivisten aineiden aiheuttama säteilyaltistus on alle 10 prosenttia tästä.

Säteilyannos	Vaikutus tai raja
1 mSv	Elintarvikkeiden sallittujen pitoisuuksien lähtökohtana oleva vuosiansios jatkuvaan altistuksessa.
2 mSv	Suomessa 50 vuoden kuluessa saatava kokonaisannos Tshernobylin laskeumasta.
5,9 mSv/vuosi	Suomalaiselle säteilystä (sisäilman radon, röntgentutkimukset jne.) aiheutuva keskimääräinen annos vuodessa.
20 mSv	Säteilytyöntekijöille suurin sallittu säteilyannos vuoden aikana.
250 mSv	Terveystieteellisiä vaikutuksia ei juuri havaittavissa
1000 mSv	Säteilynsairausoireita alkaa esiintyä.
3000-4000 mSv	Noin puolet annoksen saaneista kuolee muutaman viikon kuluessa, ellei tehokasta hoitoa ole saatavissa

Lisätietoa: www.stuk.fi



Suomalaiset ja säteily

Suomalaisten kannalta tärkein luonnosta tulevan säteilyn aiheuttaja on maaperän radon.

Radonia syntyy kallioperässä olevan uraanin hajoamisketjun yhtenä välivaiheena. Kaasumaisena aineena radon tiheuu maaperästä ja vaikuttaa ihmisiin lähinnä hengitysilman kautta. Joillakin alueilla ihmiset voivat myös altistua porakaivojen veden radonille.

Radon aiheuttaa suomalaisille keskimäärin noin 1,6 mSv:n vuosittaisen annoksen, mutta suurimmat mitatut annokset ovat moninkertaisia keskiarvoon verrattuna. Radon sinänsä ei ole erityisen vaarallinen, koska se jalokaasuna poistuu elimistöstä melko hyvin. Sen hajoamistuotteet sen sijaan ovat kiinteitä aineita, joista osa jää hengitysilman tai juomaveden mukana elimistöön säteilyttäen kudoksia sekä alfa-, beeta- että gammasäteilyllä.

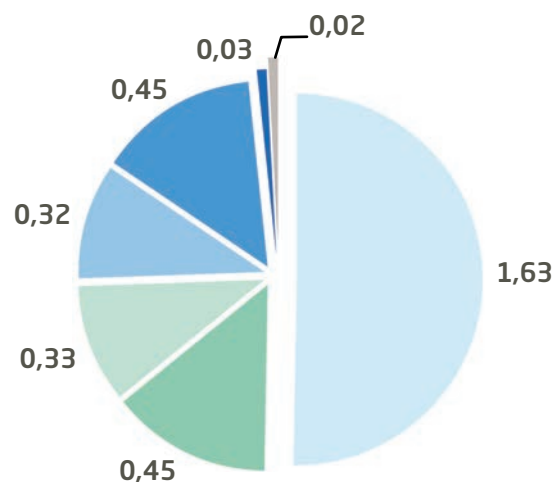
Kosminen säteily aiheutuu auringossa ja muissakin linnunradan tähdissä tapahtuvista ydinreaktioista. Maan pinnalle saapunut kosminen säteily on vaimentunut huomattavasti ilmakehän läpi kulkiessaan. Ylempänä säteily on paljon voimakkaampaa. Keskimääräinen säteilyannos Suomessa merenpinnan tasolla on noin 0,3 mSv vuodessa, mutta esimerkiksi vuoristossa 2 kilometrin korkeudessa vuosittainen säteilyannos on noin kaksinkertainen.

Ihmisen keho sisältää luonnostaan keskimäärin 140 grammaa kaliumia, josta noin 0,01 % on radioaktiivista kalium-40 -isotooppia. Lisäksi kehossa on pieniä määriä mm. uraania, toriumia ja radiumia. Kaikki nämä aiheuttavat yhteensä samansuuruisen säteilyannoksen kuin kosminen säteily.

Säteilyn lääketieteellisen käytön aiheuttamasta altistuksesta suurin osa tulee erilaisista laboratoriotutkimuksista, joissa käytetään röntgensäteilyä tai radioaktiivisia merkkiaineita. Suomessa tehdään vuosittain yli 5,5 miljoonaa lääketieteellistä tai hammaslääketieteellistä röntgentutkimusta. Eri tutkimuksista saatava annos vaihtelee huomattavasti, mutta on keskimäärin selvästi alle 1 mSv tutkimusta kohti. Yhteensä kaikki tutkimukset aiheuttavat suomalaiselle keskimäärin noin 0,5 mSv:n vuosittaisen annoksen.

Myös ilmakehässä suoritettut ydinkokeet aiheuttavat ihmisille edelleen pienen altistuksen. Ilmakehässä on tehty eri paikkakunnilla yhteensä runsaat 500 ydinkoetta, joista suurin osa 1950- ja 1960-luvuilla. Eniten ydinkoelaskesumaa tuli maanpinnalle 1960-luvun alkupuolella ilmakehässä tehtyjen räjäytysten jälkeen, jolloin se aiheutti suomalaisille suurimmillaan 0,4 mSv:n vuosittaisen altistuksen. Nykyään suomalaisten saama keskimääräinen annos ydinkokeista on noin 0,01 mSv vuodessa.

Ydinvoimalaitosten normaalin toiminnan ihmisille aiheuttama säteilyannos on suurimmillaan joitakin millisievertin tuhannesosia vuodessa. Annos on vain tuhannesosa siitä annoksesta, jonka saamme luonnon taustasäteilystä, radonista ja lääketieteellisestä säteilyn käytöstä.



- Sisäilman radon
- Röntgentutkimukset
- Ulkoinen säteily: maaperä ja rakennusmateriaalit
- Isotooppitutkimukset
- Kosminen säteily avaruudesta
- Luonnon radioaktiiviset aineet ravinnon ja hengitysilman kautta
- Ydinasekokeet + Tšernobyli



Ydinvoimalaitosten turvallisuus

Ydinvoimalaitoksen turvallisuuden edellytys on polttoaineen jäähtymisestä huolehtiminen kaikissa tilanteissa.

Reaktorin polttoaineeseen käytön aikana kertyy radioaktiivisia aineita, joiden säteilyenergia kehittää lämpöä vielä pitkään reaktorin sammuttamisen jälkeen. Tämä ns. jälkilämpö on aluksi muutaman prosentin reaktorin toiminnan aikaisesta lämpötehosta, mutta pienee vähitellen.

Jos lämpöä ei kuljetettaisi pois reaktorin sydäntä jäähdyttämällä, lämpö riittäisi sulattamaan polttoaineen kaasutiivit suojuoret ja itse polttoaineen. Radioaktiivisilla aineilla olisi tällöin mahdollisuus vapautua reaktorista suojarakennukseen.

Ydinvoimalaitosten turvallisuus perustuu monivaiheiseen "turvallisuuden syvyyssajatteluun". Kaikki laitteet ja toiminnot suunnitellaan erityisten turvallisuustarkastelujen pohjalta, joissa sovelletaan korkeita laatuvaatimuksia ja riittäviä turvallisuusmarginaaleja.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät suunnitellaan aina huomioiden sekä laitevikojen että inhimillisten virheiden mahdollisuus. Kaikki turvallisuudelle merkitykselliset toiminnot varmistetaan useilla rinnakkaisilla järjestelmillä ja laitteilla, jotta saavutettaisiin korkea luotettavuustaso. Erityisillä suojauslaitteilla ja -rakenteilla lievennetään mahdollisen onnettomuuden vaikutuksia.

Inhimillisiä virheitä pyritään välttämään käyttökannan tehostelulla koulutuksella ja kehittämällä käyttöä koskevia ohjeita. Henkilökunta harjoittelee säännöllisesti laitoksen käyttöä sekä normaali- että häiriötilanteissa.

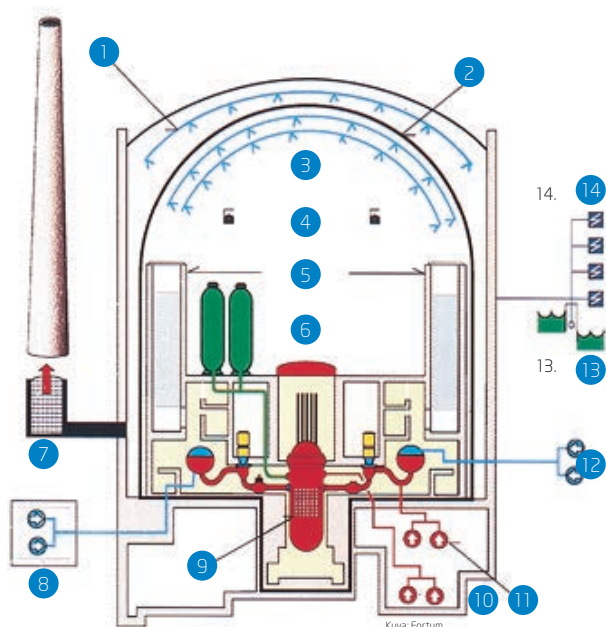
Riskianalyysit

Riskillä tarkoitetaan ei-toivotun tapahtuman todennäköisyyttä määrätyn ajan kuluessa. Ydinvoimaan liittyvä riski koetaan usein todellista paljon suurempana, koska riski ei ole vapaaehtoinen.

Ydinvoimalaitoksista aiheutuva riski on nykyisen laitostekniikan tasolla niin vähäinen, ettei sen poistaminen passiivisiin turvajärjestelmiin perustuvien reaktoreiden avulla käytännössä merkitse mitään muutosta verrattuna ihmisen elämässään kohtaamaan kokonaisriskiin.

Ydinvoimalaitosten aiheuttamat riskit arvioidaan tilastopohjan puuttuessa laskennallisesti. Kunkin onnettomuustyyppin riski määräytyy seurausten suuruuden ja onnettomuustilanteen todennäköisyyden mukaan. Menettelyä kutsutaan todennäköisyyspohjaiseksi turvallisuusanalyysiksi.

Riskianalyysit osoittavat laitoksen eri toimintojen ja laitteiden turvallisuustason toisiinsa nähden. Niiden perusteella tekniset parannukset suunnataan turvallisuuden kannalta tehokkaimmalla tavalla. Käyttöhäiriöitä voivat aiheuttaa tekniset tai ulkoiset tekijät tai inhimillinen toiminta. Äärimmäisen epätodennäköisessä tilanteessa häiriö voi johtaa vakavaan onnettomuuteen.



Kuva: Fortum

Ydinvoimalaitoksen ulkoiset vaaratekijät

Ydinvoimalaitokset suojataan mahdollisimman hyvin myös ulkopuolisia vaaratekijöitä vastaan. Niitä voivat olla esimerkiksi erilaiset luonnonilmiöt, lentokoneen törmäys, terrori-iskut tai sotatila.

Ydinvoimalaitos on rakenteellisten turvallisuustekijöitensä vuoksi vaikea hyökkäyskohde. Erityisesti reaktori lähimpine järjestelmineen sijaitsee säteilysuojauksen takia vankkatekoisten betonirakenteiden sisällä. Näitä ympäröi paineenkestävä suojarakennus.

Turvallisuudesta huolehtivat laitteet on sijoitettu erillisiin huone-tiloihin, jotta niiden yhtäaikainen vahingoittuminen ulkoapäin suuntautuvien tahallisten tai tahattomien syiden takia ei olisi mahdollista. Samoin voimalaitoksen varavoimalähteet sijoitetaan laitosalueen eri puolille, jotta energiansaanti voidaan varmistaa myös onnettomuustilanteissa.

Vakavaa vahinkoa aiheuttava terrorihyökkäys ydinvoimalaitokseen vaatisi tarkkaa tietoa laitoksen rakenteesta ja laitteiden toiminnasta. Tahallisen terrorin estämiseksi ydinvoimalaitoksissa on valvontajärjestelmiä, joiden tehtävänä on havaita luvaton tunkeutuminen, varoittaa siitä ja tehdä tunkeutuminen mahdollisimman vaikeaksi. Lisäksi reaktorin erilaiset suojaustoiminnot suojaavat sitä vääriä käyttötöimenpiteiltä pyrkien aina palauttamaan reaktorin turvalliseen tilaan.

Ydinvoimalaitoksen rakenteessa otetaan huomioon kullekin alueelle ominaiset luonnonolosuhteet. Esimerkiksi maanjäristykset ovat keskeinen laitteiden ja rakenteiden mitoitukseen vaikuttava seikka erityisesti maanjäristysherkillä alueilla. Suomi sijaitsee peruskallioalueella, jossa voimakkaita maanjäristyksiä ei esiinny. Hyvin rakennetuille rakennuksille eivät Suomen alueella todennäköisesti esiintyvien maanjäristysten tärähtelyt aiheuta vahinkoja.

Loviisan ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät



Reaktorin suojaus

Ydinreaktorin tulee luontaisesti pyrkiä vastustamaan tehossa tapahtuvia muutoksia ja pysyä vakaana ilman säätöjärjestelmien jatkuvaa toimintaa.

Esimerkiksi polttoaineen ja jäähdytteen lämpötilan tai jäähdytteen höyrypitoisuuden kasvu vähentää luontaisesti reaktorisydämen reaktiivisuutta. Reaktori pysyy turvallisessa tilassa passiivisten ominaisuuksiensa vuoksi eikä vakavien reaktiivisuusonnettomuuksien syntyminen käyttöhäiriön seurauksena ole mahdollista.

Laitosyksikkö varustetaan myös monilla turvallisuusjärjestelmillä, jotka perustuvat useisiin rinnakkaisiin ja riippumattomiin osajärjestelmiin.

Nykyisissä ydinvoimalaitoksissa ensisijaiset turvallisuustoiminnot kuten reaktorin toiminnan pysäyttäminen ja polttoaineen jälkilämmön poisto perustuvat erilaisiin automaattisesti toimiviin järjestelmiin. Uusissa ydinvoimalaitoksissa turvallisuus perustuu yksinkertaisiin fysikaalisiin perusilmiöihin.

Reaktorin suojaus estää sydämen vaurioitumisen tilanteissa, joissa reaktorin normaali jäähdytystoiminta häiriintyy. Laitteet mitoitetaan toimimaan vuototilanteessa, joka syntyisi, jos suurin reaktoriin vettä johtava putki katkeaisi. Reaktorissa vallitsevan korkean paineen takia vesi purkautuisi tällaisessa tapauksessa suurella nopeudella katkeamiskohdasta. Höyrystyvä vesi kohottaisi suojarakennuksen painetta ja lämpötilaa. Niitä mittaavat laitteet havaitsisivat epänormaalien tilanteen.

Ydinpolttoaineen radioaktiiviset aineet ovat usean sisäkkäisen suojavyöhykkeen sisällä. Vaikka yksi vyöhyke pettäisikin, muut suojavyöhykkeet ovat silti varmistamassa turvallisuutta. Radioaktiivisuuden ensimmäisenä vapautumisesteenä on itse uraanioksidista tehty polttoainetabletti, joka pidättää itsessään

syntyneitä halkeamistuotteita. Toisena suojamuurina on polttoainesauvojen kuorena käytetty metalliputki ja kolmantena reaktorin paineastia. Viimeisenä esteenä on reaktoria ympäröivä kaasutiivis suojarakennus.

Suojaustoiminnot

Jos reaktorissa tapahtuu jotakin yllättävää, ensimmäisenä käynnistyy reaktorin pikasulku. Pikasulku työntää säätösauvat muutamassa sekunnissa reaktoriin pysäyttäen sen toiminnan. Samalla käynnistyy hätäjähdytys, joka pumppaa korvaavaa vettä reaktoriin vedenpinnan laskiessa.

Riittävän toimintavarmuuden saavuttamiseksi järjestelmät ovat runsaasti ylimitoitettut niin, että jo osa laitteista pystyy takamaan tarvittavan jäähdytyksen. Joukko dieselgeneraattoreita saa myös käynnistyskäskyn, jotta turvalaitteet saavat sähköä, jos laitos menettäisi yhteytensä sähköverkkoon.

Suojaustoimintojen käynnistäminen on tapahtuma, josta automatiikka huolehtii itsenäisesti. Käyttöhenkilökunnan ei tarvitse puuttua tapahtumien kulkuun tilanteen alkuvaiheessa, jolloin on tehtävä runsaasti toimenpiteitä lyhyessä ajassa. Näin varmistetaan se, ettei mikään toimenpide jää suorittamatta inhimillisen virheen takia.

Kaikkien hätäjähdytyslaitteiden samanaikainen vika on erittäin epätodennäköinen tilanne. Arkikielessä niin pieni todennäköisyys ilmaistaisiin sanomalla, että kyseistä tilannetta ei esiinny lainkaan. Yksi mahdollisuus samanaikaiselle vialle olisi täydellinen sähkön syötön menetys.

Tällöin kaikki laitoksen yhteydet sähköverkkoon katkeaisivat. Mikään laitoksen dieselkäyttöisistä varageneraattoreista ei myöskään saisi toimia. Dieselgeneraattoreita on käytettävissä laitoksesta riippuen 3-6 kappaletta. Yhden tai kahden varageneraattorin antama sähkö riittää kaikkiin hätätapauksiin.

Jos onnettomuustilanteessa mikään hätäjähdytyslaitteistoista ei toimi, lopulta reaktorista kiehuu pois kaikki vesi. Kun vesi ei enää siirrä lämpöä pois polttoaineesta, sen lämpötila nousee sulamispisteeseen. Sulanut polttoaine ja sydämen metalliosat valuvat reaktorin paineastian pohjalle sulattaen sen vähitellen puhki. Sulan metallin ja polttoaineen seos putoaa reaktorin suojarakennuksen pohjalle.

Polttoaineen sulaessa siinä olevat kaasumaiset ja helposti höyrystyvät halkeamistuotteet vapautuvat. Osa pysyy kaasuna ja osa (esim. kesium) tiivistyy jäähtyessään hiukkasiksi. Hiukkasmaiset aineet laskeutuvat osittain suojarakennuksen pinnoille, osittain ne jäävät aerosoleina leijumaan suojarakennuksen kaasutilaan.

Suojarakennuksen pohjalle valunut sydänmassa alkaa kuumentaa alla olevaa betonia, jolloin siitä vapautuu kaasuja. Jos suojarakennuksen pohjalla on vettä, osa siitä kiehuu sulan massan vaikutuksesta höyryksi. Ellei paineastiaa jäähdytetä ulkopuolelta, höyry ja kaasu nostavat vähitellen suojarakennuksen painetta.

Suojarakennus

Reaktorin suojarakennus on mitoitettu kestäämään paine, jonka reaktorista purkautunut vesihöyry aiheuttaa. Paineen nousun suuruus riippuu reaktorin vesimäärästä ja suojarakennuksen tilavuudesta sekä suojarakennukseen mahdollisesti kuuluvista paineenalennusjärjestelmistä.

Eri laitosten suojarakennusten suunnittelupaine voi siten olla hyvin erilainen. Silti ne täyttävät yhteisen suunnitteluvaatimuksen, jonka mukaan suunnittelun perustana olevan onnettomuuden vaikutukset rajoittuvat käytännöllisesti katsoen kokonaan suojarakennuksen sisälle. Painetta voidaan alentaa esimerkiksi suojarakennusta jäähdyttämällä tai päästämällä kaasuja ulos suodattimen kautta. Suodattaminen poistaa suurimman osan kaasujen sisältämistä hiukkasmaisista aineista, jotka muuten aiheuttaisivat pintamaan radioaktiivisen saastumisen voimalaitoksen ympäristössä.

Vaikka sydämen sulaminen on äärimmäisen epätodennäköistä, se on otettu huomioon uusimmissa turvallisuusvaatimuksissa. Monissa maissa on käytössä oleviin laitoksiin tehty muutoksia, joilla sydämen sulamisonnettomuuden vaikutukset ympäristössä voidaan rajoittaa vähäisiksi.



Polttoaineesta pommi?

Ydinräjähteeseen tarvitaan halkeamiskelpoista materiaalia uraania tai plutoniumia. Luonnosta saatavan uraanin rikastaminen asemateriaaliksi on erittäin vaativa prosessi eikä siihen vaadittavaa teknologiaa löydy monestakaan paikasta.

Ydinvoimalaitoksen reaktorissa polttoaine on yleensä 3-5 vuotta ja polttoaineen väkevöintiaste on noin 3-5 prosenttia. Suurin osa reaktorissa syntyvästä plutonium-239:stä muuttuu neutronisäteilyssä raskaammiksi plutonium-isotoopeiksi. Tällainen eri isotoopeista koostuva seos on huonosti, jos ollenkaan käyttökelpoinen ydinräjähteen raaka-aineeksi. Valmistettaessa plutoniumia sotilaallista käyttöä varten pidetään polttoainetta reaktorissa vain muutamia viikkoja, jotta raskaampia plutoniumisotoppeja ei ehdi muodostua. Aseplutoniumin on oltava vähintään 80-90-prosenttisesti plutonium-239:ää.

Käytetyn ydinpolttoaineen soveltaminen räjähteen tekemiseen olisi käytännössä ylivoimainen toimenpide yksittäiselle henkilölle tai pienelle terroristiryhmälle. Jo käytetyn polttoaineen salakuljettaminen ulos ydinvoimalaitoksesta on mahdotonta. Voimakas radioaktiivisuus vaatii käytetyn polttoaineen kuljettamiseen ja käsittelyyn suurikokoiset ja raskaat erityislaitteet.

Plutoniumin erottaminen uraanista ja ominaisuuksiltaan hankalasti käsiteltävän plutoniumin saattaminen räjähteeksi ovat nekin teknisesti vaativia vaiheita, jotka onnistuakseen edellyttävät asianmukaisia tuotantolaitoksia.



Ydinaineiden valvonta

Ydinvoimalaitoksen on täytettävä Suomessa voimassa olevat turvallisuusvaatimukset, joiden yleisperiaatteet sisältyvät valtioneuvoston päätöksiin ja yksityiskohdat Säteilyturvakeskuksen ohjeisiin.

Ydinpolttoaineen maahantuontiin, hallussapitoon ja käyttöön tarvitaan työ- ja elinkeinoministeriön myöntämä lupa. Ydinpolttoaineen valmistusta, kuljetuksia, varastointia, käsittelyä ja käyttöä valvoo Säteilyturvakeskus.

Maaliskuussa 1970 voimaan astuneen ydinsulkusopimuksen puitteissa ydinpolttoaineita valvoo myös kansainvälinen atomienergiajärjestö, IAEA. Valvonnan tarkoituksena on todeta, että ydinaineita käytetään vain rauhanomaisiin tarkoituksiin. Suomen tultua vuonna 1995 EU:n jäseneksi ovat käytännön valvontatoimenpiteet siirtyneet Euratomin hoidettaviksi.

IAEA:n kanssa tehdyn valvontasopimuksen mukaisesti atomienergiajärjestön tarkastajilla on oikeus päästä kaikkiin paikkoihin, joissa on valvonnan alaista ydinmateriaalia. Säännöllisin tarkastuksin järjestön edustajat tarkastavat valvonnan alaisen materiaalin sijainnin, määrän ja koostumuksen. Ydinaineita koskevan kirjanpitojärjestelmän avulla järjestö seuraa Suomessa vastaanotetun, tuotetun ja pois lähetetyn ydinaineen määriä.

Ydinpolttoaineen hallussapitolupa edellyttää vartiointia, jolla estetään sivullisten pääsy käsiksi ydinmateriaaliin. Turvajärjestelyjen on täytettävä viranomaisten asettamat vaatimukset. Järjestelmien toimivuus tarkistetaan määräajoin.

Ydinonnettomuuteen varautuminen

Ydinvoimalaitosten ympäristön varautumisalue onnettomuustilanteissa ulottuu noin 20 km:n etäisyydelle voimalaitoksilta. Varautumisalueen pelastussuunnitelmaa ylläpitävät pelastusviranomaiset yhteistoiminnassa ydinvoimalaitosten kanssa. Suomessa reaktorionnettomuuden aikaisen pelastustoimen johtaminen kuuluu pelastusviranomaisille.

Pelastustoimen lisäksi yhteistyöhön osallistuvat muun muassa poliisi, terveydenhuolto- ja sosiaaliviranomaisia. Varautumisalueen väestölle toimitetaan onnettomuustilanteen varalle toimintaohjeet, jotka löytyvät myös puhelinluetteloista.

Vakavassa onnettomuustilanteessa väestö evakuoidaan suojavyöhykkeeltä noin viiden kilometrin etäisyydeltä laitokselta. Varautumisalueella noin 5-20 km etäisyydellä väestö suojautuu sisätiloihin, nauttii joditabletteja sekä valmistautuu viranomaisten ohjeiden mukaan osittaiseen evakuointiin.

Säteilyturvakeskuksessa toimii onnettomuustilanteiden aikana johtoryhmä, joka antaa toimintasuosituksia tilanteen edetessä. Säteilyturvakeskus tekee onnettomuustilanteessa kansainvälisten sopimusten edellyttämät ilmoitukset muiden maiden viranomaisille.

Mediatiedottamista hoitaa onnettomuustilanteessa paikallisella tasolla pelastuspalvelutoiminnan johtaja. Hänellä on apunaan tiedotusryhmä, johon kuuluu myös voimalaitosta edustavaa asiantuntemusta. Valtakunnallisen tiedottamisen ja yhteydet keskushallinnon viranomaisiin hoitaa Säteilyturvakeskus.

Voimalaitoksen käyttäjä on velvollinen arvioimaan nopeasti ja riittävällä tarkkuudella ympäristöä uhkaavan tilanteen vakavuus ja antamaan siitä toimenpidesuosituksia viranomaisille heti tilanteen alkuvaiheessa. Ydinvoimalaitoksen käyttäjältä edellytetään myös laitoksen sisäistä valmiussuunnitelmaa onnettomuusaikaisen toiminnan varalle. Suunnitelmien toimivuutta harjoitellaan muun muassa säännöllisten valmiusharjoitusten avulla.



Tokyo Electric Power Co., TEPCO

Fukushima, INES 7

Japanin itärannikolla sijaitseva Fukushima Daiichi -ydinvoimalaitos vaurioitui pahoin 11. maaliskuuta 2011 voimakkuudeltaan 9 magnitudin maanjäristyksestä ja sitä seuranneesta tsunamista. Radioaktiivisia aineita levisi usean päivän ajan sekä merelle että laitoksen lähialueelle.

Maanjäristyksen jälkeen käynnissä olleet reaktorit sammuiivat automaattisesti, kuten pitikin. Valitettavasti järjestyksen jälkeinen tsunami vaurioitti laitokselle sähköä tuottaneita generaattoreita, eikä reaktoreita saatu riittävästi jäädytettyä, joten reaktorit ylikuumenivat ja vaurioituivat.

Radioaktiivisen jodin (I-131) ja cesiumin (Cs-137) päästöjen on arvioitu olleen 10 prosenttia Tšernobylin ydinvoimalaitoksen onnettomuuden päästöistä.

Kukaan ydinvoimalaitoksen työntekijä tai väestön edustaja ei sairastunut säteily sairauteen tai saanut hoitoa vaativia paikallisia säteilyvammoja. Kuolintapauksia liittyy evakuointiin ja muihin kuin säteilyyn aiheuttamiin terveysvaikutuksiin.

Lähialueilta evakuoitiin noin 170 000 henkilöä. Säteilyannokset jäivät vähäisiksi suojelutoimenpiteiden ansiosta. Evakuoituidut saivat 1 - 10 millisievertin suuruisen säteilyannoksen, ja 1-vuotiaalle lapselle säteilyannos on noin kaksinkertainen. Muilla alueilla Japanissa väestön säteilyaltistus jäi vähäisemmäksi.

Voimalaitoksen onnettomuuden jälkitöihin osallistuvia työntekijöitä seurataan perusteellisilla, säännöllisillä terveystarkastuksilla. WHO:n, UNSCEARin ja IAEA:n asiantuntija-arvioiden mukaan onnettomuudesta johtunut säteilyaltistus ei oleellisesti lisää väestön sairastumista syöpään.

Ydinvoimalaitoksen työntekijöillä psyykkiset ongelmat lisääntyivät muuhun väestöön verrattuna. Onnettomuuteen liittyvien elämän muutosten on todettu aiheuttavan muun muassa mielialaongelmia sekä lisäävän monien sairauksien riskitekijöitä.

Fukushiman onnettomuuden jälkeen aloitettiin lukuisia selvityksiä siitä, mitä tästä onnettomuudesta voi oppia ydinvoimalaitosten turvallisuuden parantamisessa. Myös Suomessa tehtiin kansallisia selvityksiä ja niin sanotut EU-stressitestit. Erityistä huomioita selvitelyssä kiinnitettiin sähkön saannin varmistamiseen poikkeusoloissa.

Lähteet: STUK ja IAEA

INES-asteikko

Ydinvoimalaitosten onnettomuuksien ja tapahtumien vakavuutta kuvataan kansainvälisellä INES-asteikolla (International Nuclear Event Scale).

Näin väestölle pystytään tiedottamaan eri maissa ja erilaisilla laitoksilla sattuneiden tapahtumien ja onnettomuuksien ydin- ja säteilyturvallisuusmerkityksestä. Vakavuusasteikkoa voidaan käyttää myös muiden ydinlaitosten, kuten ydinjätevarastojen, jälleenkäsittelylaitosten ja tutkimusreaktoreiden sekä ydinjätehuollon kuljetusten tapahtumien luokitteluun.

Alemmilla luokilla 1-3 kuvataan laitosturvallisuutta heikentäneitä tapahtumia ja luokilla 4-7 onnettomuuksia, joista voi aiheutua sellaisia päästöjä ympäristöön, että erilaiset säteilysuojelutoimenpiteet voivat olla tarpeen.

Vakavuusasteikko on laadittu Kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n (International Atomic Energy Agency) ja Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n välisenä yhteistyönä. INES-asteikkoa käytetään yli 60 jäsenmaassa. Asteikon laadintaan on osallistunut myös muita asiantuntijoita monista eri maista. Vakavuusluokitus tehdään välittömästi tapahtuman jälkeen ja merkittävät tapahtumat raportoidaan IAEA:lle. Vakavin, luokkaan 7 kuuluva onnettomuus sattui Tshernobylin ydinvoimalaitoksella vuonna 1986 sekä Fukushima Daiichin laitoksella vuonna 2011.

Suomen ydinvoimalaitosten tapahtumien luokittelusta päättää STUK. Tapahtuma luokitellaan alle kolmen, mikäli työntekijöille ei aiheudu välittömiä terveyshaittoja eivätkä laitoksen ympäristön radioaktiiviset päästöt ylitä viranomaisten hyväksymiä päästörajoja.

Suomessa sattuneet vakavimmat tapahtumat on luokiteltu INES-asteikolla luokkaan 2 eli merkittäväksi turvallisuuteen vaikuttavaksi tapahtumaksi. Vuosina 1977-2008 Suomessa on sattunut yhteensä seitsemän INES 2-luokan tapahtumaa. Luokan 1 tapahtumia sattuu vuosittain keskimäärin muutamia.

Esimerkkejä Suomen ydinvoimalaitoksilta luokan 2 tapahtumista

Olkiluoto 2:n kytkinlaitosrakennuksessa oli vuonna 1991 tulipalo, jonka seurauksena laitosyksikkö menetti yhteydet ulkoiseen sähköverkkoon. Yksikkö oli 7,5 tuntia neljällä vara-voimadieselillä tuotetun sähkön varassa. Tapahtuma osoitti puutteita ulkoisen sähkönsyötön varmistamisessa. Tämän perusteella tapahtuma kuuluu luokkaan 2.

Loviisa 2:lla sekundääripiirin syöttövesiputki katkesi vuonna 1993 laitosyksikön ollessa käynnissä täydellä teholla. Syynä katkeamiseen oli eroosiokorroosiosta aiheutunut putken syöpyminen. Tilanteen aikana reaktorin ohjaajan toimenpiteet olivat oikeita ja nopeita, ja vuoto saatiin päättymään yhdeksässä minuutissa. Loviisa 1:llä syöttövesiputki oli vuonna 1991 katkennut vastaavalla tavalla. Loviisa 1:n tapahtuman jälkeen putkistojen kunnonvalvontaa tehostettiin. Tehdyistä toimenpiteistä huolimatta Loviisa 2:lla eroosio-korroosio johti putken katkeamiseen. Tapahtuma luokiteltiin luokkaan 2. Luokituksessa on käytetty luokitussääntöjen sallimaa korotusta tapahtuman toistumisen takia.

Luokkaan 1 kuuluu esimerkiksi pienen primääripiirin putken katkeaminen edellyttäen, että kaikki katkeamisen varalle olevat turvajärjestelmät toimivat suunnitellusti. Luokkaan 1 voi kuulua myös jonkin turvajärjestelmän usean rinnakkaisen osan toimimattomuus, vaikka turvajärjestelmää ei kyseisessä tilanteessa tarvittaisikaan.

Luokkaan 0 kuuluu esimerkiksi reaktorin nopea pysäytys (pika-sulku), jos kaikki laitoksen järjestelmät toimivat tilanteessa suunnitellulla tavalla.



INES 0 - Poikkeuksellinen tapahtuma, jonka turvallisuusmerkitys on kuitenkin niin vähäinen, että sitä ei voida sijoittaa varsinaiselle asteikolle.

- Suuressa ydinvoimalaitoksessa olevien radioaktiivisia aineita vapautuu merkittävä määrä ympäristöön. Päästö saattaa aiheuttaa välittömiä terveyshaittoja, myöhemmin ilmeneviä terveyshaittoja laajoilla alueilla, jopa useissa maissa, sekä pitkäaikaisia ympäristövaikutuksia.
- Radioaktiivisia aineita vapautuu ympäristöön. Päästö johtaa todennäköisesti vastatoimenpiteiden käynnistämiseen täydessä laajuudessaan vakavien terveyshaittojen rajoittamiseksi.
- Radioaktiivisia aineita vapautuu ympäristöön. Päästö johtaisi vastatoimenpiteiden osittaiseen käynnistämiseen terveyshaittojen todennäköisyyden vähentämiseksi. Ydinlaitoksen syntyy vakavia vaurioita. Kysymykseen voi tulla ydinvoimalaitoksen reaktorin laaja vaurio, suuri hallitsematon tehon nousu (kriittisyysonnettomuus), tulipalo tai räjähdys, jonka seurauksena merkittävä määrä radioaktiivisia aineita leviää laitoksen tiloihin.
- Radioaktiivisten aineiden päästö ympäristöön aiheuttaa laitoksen ympäristössä asuvalle eniten altistuneelle henkilölle yli yhden millisievertin suuruusluokkaa olevan säteilyannoksen. Päästö saattaa aiheuttaa tarvetta joihinkin laitoksen ulkopuolisiin vastatoimenpiteisiin kuten paikalliseen elintarvikkeiden valvontaan. Ydinlaitokseen syntyy merkittäviä vaurioita. Esimerkki tällaisesta onnettomuudesta on ydinvoimalaitoksen reaktorin osittainen sulaminen tai vastaava tapahtuma muilla ydinlaitoksilla. Onnettomuus saattaa aiheuttaa pitkäaikaisen keskeytyksen laitoksen käyttöön. Yhden tai useamman laitoksen työntekijän saamat säteilyannokset, jotka mitä todennäköisimmin johtavat nopeaan kuolemaan.
- Radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön ylittävät viranomaisten hyväksymät päästöraajat. Päästöt ympäristöön aiheuttavat laitoksen ympäristössä asuvalle eniten altistuneelle henkilölle vajaan millisievertin säteilyannoksen. Laitoksen ulkopuolisia vastatoimenpiteitä ei tarvita. Tapahtuma, josta seuraa työntekijöille välittömiä terveyshaittoja aiheuttavia säteilyannoksia tai huomattava määrä radioaktiivisia aineita leviää laitoksen sisätiloihin siten, että ne voidaan ottaa talteen ja varastoida jätteenä. Tapahtuma, jossa yksittäinen turvajärjestelmän lisävikä saattaisi johtaa onnettomuuteen tai tarvittavat turvajärjestelmät olisivat toimintakyvyttömiä estämään onnettomuuden häiriötilanteen seurauksena. Radioaktiivisten aineiden leviämissesteet ovat heikentyneet merkittävästi.
- Tapahtuma, jossa on merkittävä puute turvallisuuteen vaikuttavissa tekijöissä, mutta jossa turvallisuus on edelleen varmistettu mahdollisesta lisäviasta huolimatta. Tapahtuma, josta aiheutuu työntekijälle annosrajan ylittävä säteilyannos. Tapahtuma, joka johtaa radioaktiivisten aineiden merkittävään vapautumiseen laitoksen sisätiloissa alueille, joihin niiden ei ole suunniteltu pääsevän. Saastuneet tilat vaativat puhdistuksen ennen uudelleen käyttöönottoa.
- Olennaisesti normaalista poikkeava toiminta tai laitoksen käyttötila, joka voi olla seurausta laiteviasta, käyttövirheestä tai puutteellisista menettelytavoista.

Lisätietoja

www.stuk.fi

IAEA:n Nuclear Events Web-based System NEWS, jäsenmaiden

toimittamia selvityksiä ja raportteja INES-luokitelluista tapahtumista:

www-news.iaea.org/news/



Tshernobyl, INES 7

Ydinvoiman historian vakavin ydinvoimaonnettomuus tapahtui 26.4.1986 Tshernobylistä. Voimalaitoksen 4. yksiköllä tapahtuneen onnettomuuden perimmäisenä syynä oli RBMK-reaktorityypin käyttäytymistä alhaisella tehotasolla säätelevä epäedullinen ominaisuus: reaktorin teho pyrkii kasvamaan jäähdytysveden höyrypitoisuuden lisääntyessä. Tehon lisäys puolestaan lisää höyrypitoisuutta, ja syntyy itseään kiihdyttävä tehon kasvu.

Onnettomuuden aikana laitoksella suoritettiin koetta, jonka takia käyttökäytökunta oli lisäksi turvallisuusmääräysten vastaisesti kytkenyt pois toiminnasta suurimman osan reaktorin turvalaitteista.

Voimakas lämmönkehitys aiheutti polttoaineen rikkoutumisen ja reaktorin paineen räjähdysmäisen nousun. Höyrynpaine rikkoi reaktorin sydäntä ympäröivän suojaasuvaipan ja avoimeksi jääneen reaktorin osia sinkoutui ympäristöön ja hajotti reaktorirakennuksen yläosan. Samalla syttyi lukuisia tulipaloja.

Radioaktiivisia aineita levisi usean päivän ajan monen maan alueelle. Onnettomuus saastutti laajoja alueita Ukrainassa, Valko-Venäjällä ja Venäjällä.

Onnettomuudessa kuoli 31 ihmistä. Kaikki kuuluivat laitospuolelta tapahtuma-aikana työskennelleisiin pelastusmiehiin. Kuolemantapausten lisäksi 134 laitosalueen henkilöä sairastui säteilytautiin; heistä 28 kuoli muutaman seuraavan viikon aikana. Ympäristön asukkaista ei kukaan sairastunut säteilyn välittömien vaikutusten takia, mutta noin 116 000 henkilöä jouduttiin evakuoimaan runsaan 30 kilometrin säteeltä laitoksesta.

Toistaiseksi ainoastaan lasten kilpirauhassyöpätapausten määrän on todettu lisääntyneen huomattavasti saastuneella alueella. Tauti ei kuitenkaan hyvin hoidettuna yleensä johda kuolemaan. Onnettomuuden seurauksena lapsena altistuneiden ikäluokilla on todettu kilpirauhassyöpiä vuoteen 2005 mennessä noin 5000, joista merkittävä määrä johtuu altistumisesta radioaktiiviselle jodille.

Kilpirauhassyöpätapausten ja laajojen psykosomaattisten ja psykososiaalisten seurausten lisäksi tieteellisesti ei ole pystytty osoittamaan yhteyttä muihin terveysvaikutuksiin. Esimerkiksi lasten leukemiatapausten määrässä ei ole tapahtunut muutosta seuranta-tutkimuksen aikana.

Pidemmillä aikavälillä joitakin syöpätapauksia aiheutuu onnettomuuden seurauksena. Kansainvälisten arvioiden mukaan Tshernobylin aiheuttama laskennallisten syöpäkuolemien lukumäärä on noin 4000 tulevina vuosikymmeninä. Syöpä on kuitenkin yleinen kuolinsyy, joten tilastollisesti onnettomuuden aiheuttamaa lisäystä ei pystytä osoittamaan.

Onnettomuuden seurauksena tehtiin käytössä oleviin RBMK-tyyppisiin ydinvoimalaitoksiin turvallisuutta parantavia muutoksia ja uusien RBMK-tyyppisten laitosten rakentamisesta luovuttiin. Myös laitoksen operaattorikoulutusta lisättiin. Vastaava onnettomuus ei ole mahdollinen länsimaisissa reaktorityypeissä, mutta onnettomuuden jälkeen myös länsimaissa on lisätty ydinvoimalaitosten turvallisuuteen liittyvää työtä. Myös avoimen tiedonkulun tärkeyteen on kiinnitetty huomiota.

*Loppusijoituksen
turvallisuus varmistetaan
ottamalla laskelmissa
huomioon myös erittäin
epätodennäköiset
tapahtumat.*

Viranomaiset ja valvonta

Ydinenergia-alan ylin johto ja valvonta kuuluvat työ- ja elinkeinoministeriölle. Ministeriö valmistelee ydinenergiaan ja ydinvastuuseen liittyvän lainsäädännön sekä valtioneuvostossa tehtäväksi säädetty lupapäätökset. Se myös ohjaa ydinjätehuollon suunnittelua ja toteutusta. Ministeriön yhteydessä toimii Valtion ydinjätehuoltorahasto.

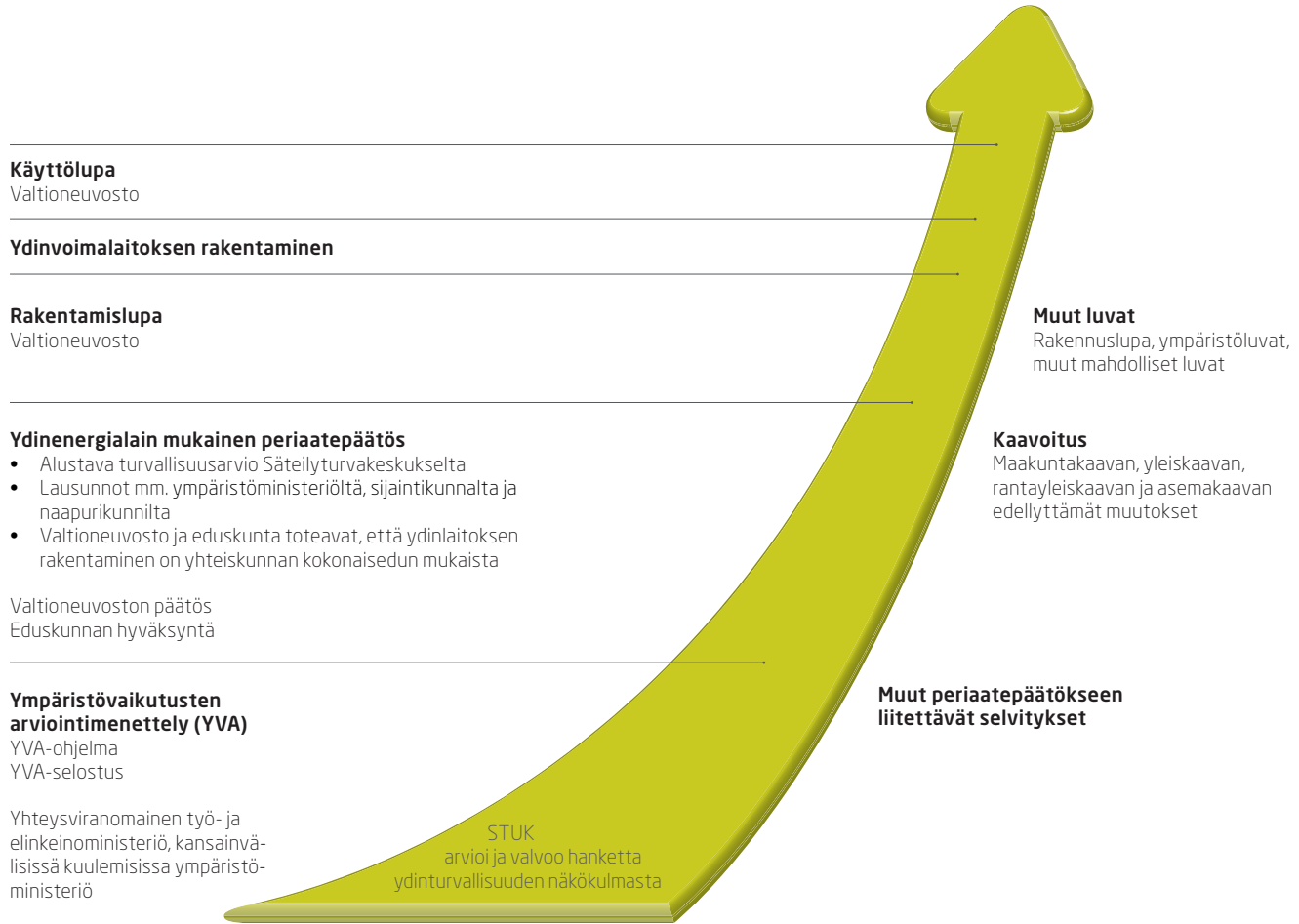
Ydinturvallisuuden ja säteilyn käytön valvonnasta vastaa Säteilyturvakeskus (STUK), joka on hallinnollisesti sijoitettu sosiaali- ja terveysministeriön alaisuuteen. STUKin laatima ja ylläpitämä ohjeistokokoelma määrittelee ne tekniset turvallisuusvaatimukset, jotka ydinvoimalaitoksen on Suomessa täytettävä.

Käytön aikana STUK tekee määräajoin laitoksen käyttö-, kunnossapito- ja valvontatoimien tarkastuksia. Lisäksi toiminnanharjoittaja raportoi laitoksen käytöstä säännöllisesti STUKille. Vuorokausiraportti sisältää tiedot laitoksen edellisen vuorokauden käyttötapahtumista. Tuotantotiedot ja eri järjestelmien valvontatulokset samoin kuin henkilökunnan säteilyannokset raportoidaan kuukausittain. Radioaktiivisten aineiden päästöt raportoidaan neljännesvuosittain. Erityistilanteet ja käyttöhäiriöt raportoidaan tapauskohtaisesti.

Monet muut valtionhallinnon ja aluehallinnon organisaatiot ja esimerkiksi ydinlaitoksien sijaintikunnat osallistuvat ydinenergiälainsäädännön ja muiden säädösten edellyttämään ydinlaitosten valvontaan.

STUKin toiminnan tarkoitus on ihmisten, yhteiskunnan, ympäristön ja tulevien sukupolvien suojeleminen säteilyn haitallisilta vaikutuksilta. Ydinturvallisuusviranomaisena STUK asettaa ydinenergian käyttöä koskevat turvallisuusvaatimukset ja varmistaa, että energiaa tuottavat voimayhtiöt toimivat vaatimusten mukaisesti.





Lupamenettely ja laitoksen käytön valvonta

Ydinvoimalaitoksen rakentamista edeltää mittava lupamenettely, jonka tavoitteena on varmistaa hankkeen turvallisuus ja yleinen hyväksyttävyys. Valtioneuvoston periaatepäätöshakemusta on edeltänyt ympäristövaikutusten arviointi ja joukko muita selvityksiä hankkeen toteutumismahdollisuuksista. Työ- ja elinkeinoministeriö hankkii periaatepäätöshakemuksesta säteilyturvakeskuksen alustavan turvallisuusarvion sekä lausunnot ympäristöministeriöltä, suunnitellun ydinlaitoksen sijaintikunnan kunnanvaltuustolta ja naapurikunnilta.

Ympäristövaikutusten arvioinnin ja periaatepäätöshakemuksen käsittelyn aikana järjestetään useita julkisia kuulemistilaisuuksia ja kirjallisia lausuntomahdollisuuksia, jossa kuka tahansa voi esittää kysymyksiä ja mielipiteitä hankkeesta.

Periaatepäätös käsitellään myös eduskunnassa, joka joko hyväksyy tai hylkää sen. Ennen periaatepäätöksen voimaantuloa luvanhakija

ei saa tehdä laitoksen rakentamiseen liittyviä taloudellisesti merkittäviä hankintasopimuksia.

Myönteinen periaatepäätös on edellytys rakentamislualle, jonka myöntää valtioneuvosto. Rakentamislupa edellyttää laitoksesta ns. alustavaa turvallisuusselostetta, joka on laaja tekninen asiakirja. Se sisältää yksityiskohtaiset tiedot laitoksen ympäristöstä, rakenteesta ja käyttäytymisestä sekä normaalitoiminnassa että ajateltavissa olevissa häiriötilanteissa.

Valtioneuvosto myöntää ydinvoimalaitokselle käyttöluvan, kun koko ydinvoimalaitos on valmis käyttöönottoa varten. Käyttölupa edellyttää, että rakentamisessa on noudatettu rakentamisluvan määräyksiä. Ennen käyttöluvan myöntämistä STUKin on todettava laitoksen täyttävän asetetut turvallisuusvaatimukset, ydinjätehuollon järjestelyiden ja rahoituksen on oltava riittävä ja laitoksen käyttöhenkilökunnan kelpoisuus ja koulutus ovat asianmukaiset.

Energian ja säteilyn yksiköitä ja käsitteitä

Yksiköitä

Megawatti (MW)

on tehon yksikkö. $1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} = 1\,000\,000 \text{ W}$.

Becquerel (Bq)

ilmaisee radioaktiivisen aineen ytimen hajoamisten lukumäärän aikayksikössä. 1 Bq vastaa yhtä hajoamista sekunnissa.

Gray (Gy)

ilmaisee aineeseen absorboituneen (imeytyneen) energianmäärää. 1 Gy vastaa yhden joulen (J) suuruisista energia-absorptiota yhteen kiloon ainetta, eli $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Sievert (Sv)

eli ekvivalentti annos ilmaisee samaa kuin Gray, mutta ottaa säteilyn biologiset vaikutukset huomioon säteilyn laadusta riippuvalla tekijällä.

Käsitteitä

Aktiivisuus

Suure, joka ilmaisee radioaktiivisessa aineessa tietyssä ajassa tapahtuvien ydinhajoamisten lukumäärän. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq).

Alfasäteily

Alfahiukkasen (heliumydin: 2 protonia ja 2 neutronia) sinkoutuminen radioaktiivisesti hajoavasta atomiytimestä.

Beetasäteily

Negatiivisen sähkövarauksen omaavien varattujen hiukkasten sinkoutuminen radioaktiivisesti hajoavasta atomiytimestä.

Dekontaminointi

Esineen tai aineen puhdistaminen siihen tarttuneesta radioaktiivisesta aineesta.

Gammasäteily

Sähkömagneettisena aaltoliikkeenä etenevä säteily, jonka aallonpituus on pienempi kuin röntgensäteilyn.

Halkeamis- eli fissiotuotteet

Atomiytimien halkeamisessa eli fissiossa syntyvät keskiraskaat atomiytimet. Useimmat ovat radioaktiivisia.

Hyötysuhde

Voimalaitoksen tuottaman sähköenergiansuhde kulutetun polttoaineen sisältämään energiaan.

Hyötöreaktori

Reaktorityyppi, joka toimiessaan tuottaa enemmän halkeamiskelpoista polttoainetta kuin se itse samanaikaisesti kuluttaa.

Isotooppi

Samanaikaisen alkuaineen atomit, jotka eroavat toisistaan atomin ytimessä olevien neutronien lukumäärän suhteen. Lähes kaikkia alkuaineita esiintyy luonnossa useampina isotooppeina.

Energian ja säteilyn yksiköitä ja käsitteitä

Jälkilämpö

Fission tuotteiden säteilyenergian aiheuttama lämmönkehitys ydinpolttoaineessa sen jälkeen kuin reaktorin toiminta on pysäytetty.

Jälleenkäsittely

Kemiallinen käsittely, jolla käytetystä ydinpolttoaineesta erotetaan uraani ja plutonium. Jäljelle jäävät halkeamistuotteet käsitellään ja lopputuotteita runsasaktiivisena jätteenä.

Ketjureaktio

Perättäisten fission muodostama tapahtumasarja, jota fissiona syntyvät neutronit ylläpitävät osuessaan uusiin uraaniytimiin.

Kontaminoituminen

Esineen likaantuminen radioaktiivisten aineiden tarttuessa sen pinnalle tai aineen (esim. veden) likaantuminen radioaktiivisilla epäpuhtauksilla.

Käyttökerroin

Käyttökerroin on voimalaitoksen vuodessa tuottama energia prosentteina siitä energiasta, minkä se olisi tuottanut toimiessaan koko vuoden keskeytysettä täydellä teholla.

Luonnonuraani

Uraani sellaisenaan isotooppiseoksena kuin se luonnossa esiintyy. Luonnonuraanissa on 99,27 % isotooppia 238, 0,72 % isotooppia 235 ja alle 0,01 % isotooppia 234.

Neutroni

Atomiytimen sähkövaraukseton rakenneosia. Atomin ytimet koostuvat neutroneista ja protoneista.

Plutonium

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Pu. Plutoniumin isotooppia Pu-239 syntyy reaktorissa uraani-238:sta neutronisäteilytyksen vaikutuksesta. Myös plutonium-239 soveltuu reaktorin polttoaineeksi. Plutonium-239:n puoliintumisaika on 24 300 vuotta.

Polttoaine-elementti

Polttoainesauvojen muodostama nippu. Painevesireaktorin polttoainepippu sisältää tyypillisesti 17x17 sauvaa ja kiehutusvesireaktorin 10x10 sauvaa. Sauvat on nipussatuettu toisistaan hiukan erilleen niin, että jäähdytysvesi pääsee kulkemaan sauvojen välitse.

Polttoainesauva

Polttoainetabletteja sisältävä ohut, päistään suljettu metalliputki, jonka halkaisija on noin 10 mm. Putken sisällä oleva polttoaine on yleensä uraanioksidista puristettuina tabletteina.

Puoliintumisaika

Aika, jossa aineen aktiivisuus pienenee puoleen alkuperäisestä. Radionuklidien puoliintumisajat vaihtelevat sekunnin murto-osista miljardeihin vuosiin. Biologisessa puoliintumisajassa elimestä tai eliöstä poistuu puolet siihen joutuneesta aineesta. Biologinen puoliintumisaika ei ole vakio vaan se vaihtelee eri eliöillä ja riippuu myös mm. kyseisen aineen kemiallisesta esiintymismuodosta.

Radioaktiivisuus

Atomiytimen spontaani hajoaminen toiseksi ytimeksi. Radioaktiivisessa hajoamisessa vapautuu aina energiaa säteilyn muodossa.

Säätösauva

Neutroneja sieppaavaa eli absorboivaa materiaalia sisältävä sauva, jolla säädetään reaktorisydämen neutronien määrää ja siten reaktorin tehoa. Voimalaitosreaktorissa säätösauvoja on useita kymmeniä.

Taustasäteily

Yhteinen nimitys luonnon säteilylähteistä peräisin olevalle säteilylle. Taustasäteilyn lähteitä ovat maaperän radioaktiiviset aineet kuten radon, avaruudesta tuleva säteily ja oman kehon sisältämät radioaktiiviset aineet.

Väkevöinti

Käsittelyprosessi, jossa uraani-235-isotoopin pitoisuutta lisätään suuremmaksi kuin se on luonnonuraanissa. Voimalaitosreaktorissa polttoaineen uraani-235-pitoisuus on yleensä 2-5 %.



Kannen kuva: Esteban Lopez Unsplash.com



Energiateollisuus

Energiateollisuus ry

Eteläranta 10, 00130 Helsinki

info@energia.fi

twitter @Energiateol

www.energia.fi