

Ydinvoiman rooli energiamurroksessa

Nadezda Pulkkinen

Opinnäytetyö

Joulukuu 2019

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Pulkkinen, Nadezda	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2019
	Sivumäärä 93	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Ydinvoiman rooli energiamurroksessa		
Tutkinto-ohjelma Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen, Kirsi Niininen		
Toimeksiantaja(t) JAMK Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Tiivistelmä <p>Globaalin energiamurroksen taustalla ovat yhteiskunnalliset tavoitteet ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi sekä energiantuotannon ja -käytön ympäristöhaittojen vähentämiseksi. Maailmalla tapahtuva energiamurros vaikuttaa koko energiajärjestelmään, se koskee energiantuotantoa, siirtoa sekä käyttöä. Tuotanto hajautuu. Älykkäiden sähköverkkojen myötä kuluttajista tulee tuottajakuluttajia. Edetessä kohti hiilineutraalia energiantuotantoa, kausi- ja sääriippuvaisen uusiutuvan energian määrä moninkertaistuu. Se tuo mukanaan koko energiasektoria koskevia ongelmia, jotka on ratkaistava. Millä keinoilla, oletuksilla ja prioriteetilla nämä haasteet ratkaistaan, pyrittiin tässä tutkimuksessa selvittämään.</p> <p>Työssä kerättiin globaalien energiasektorin ajankohtaista tietoa ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Tarkemmin tarkastettavaksi otettiin ydinvoiman rooli muuttuvilla energiamarkkinoilla, sen nykytilanne ja mahdolliset kehityssuunnat. Nämä materiaalit tulevat käytettäväksi Jyväskylän ammattikorkeakoululle, joka on opinnäytetyön toimeksiantaja.</p> <p>Tämä kehittämistutkimus tehtiin sekä kvantitatiivisilla, että kvalitatiivisilla tutkimusotteilla käyttämällä erilaisten energiajärjestöjen tilastoja, raportteja ja tutkimuksia, ydinenergian valvontaorganisaatioiden materiaaleja sekä ammattilaislehdistöä ja alan kirjallisuutta.</p> <p>Työssä tehdyt päätelmät osoittivat, että kasvihuonekaasupäästöille asetettuihin rajoihin ei tulla globaalissa mittakaavassa pääsemään ainoastaan korvaamalla saastuttavaa sähkön- tuotantoa uusiutuvalla energialla. Isot päästöt on leikattava myös niillä energiasektorin osa-alueilla, jossa fossiililla polttoaineilla tuotettu energia kulutetaan lämpönä. Tämän päivän akuuttinen ongelma voisi ratkaista ydinvoiman avulla, joka on vähäpäästöinen ja energiatiheä energiantuotantomuoto, säädettävä, säästä riippumaton sekä kelpaa nykyiseen infrastruktuuriin lisättäväksi ilman sen muuttamista.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ydinvoima, ydinvoimalaitos, energiasektori, energiamurros, energiantuotanto, uusiutuvat energialähteet, fossiiliset energialähteet		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Pulkkinen, Nadezda	Type of publication Bachelor's thesis	Date December 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 93	Permission for web publication: x
Title of publication The role of nuclear power in the energy transition		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari; Niininen, Kirsi		
Assigned by JAMK Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Abstract <p>The global energy transition is driven by societal goals to prevent climate change and reduce the environmental impact of energy production and use. The global energy transition affects the entire energy system, including energy production, transmission and use. Production is dispersing. With smart grids consumers are becoming producer-consumers. As we move towards carbon neutral energy production, the amount of seasonal and weather dependent renewable energy will multiply. It brings problems for the whole energy sector that need to be resolved. What ways, assumptions and priorities these challenges will be solved found out in this study.</p> <p>Actual information about the global energy sector and factors affecting it was collected in the thesis. The role of nuclear power in the changing energy market, its current situation and possible trends were examined in more detail. These materials will be used by JAMK University of Applied Sciences, which has assigned this thesis.</p> <p>This development study was conducted on the basis of the quantitative and qualitative research methods by using statistics, reports and studies from various energy agencies, materials from nuclear power control organizations, and the professional press and literature.</p> <p>The conclusions of the work showed that the limits on greenhouse gas emissions will not be reached on a global scale only by replacing polluting electricity production with renewable energy. Large emissions also need to be cut in those areas of the energy sector where fossil fuel energy is consumed as heat. Today's acute problem could be solved by nuclear power, which is a low-emission and energy-intensive form of energy production, an adjustable, weather independent and suitable for adding to existing infrastructure without its modification.</p>		
Keywords/tags (subjects) Nuclear power, nuclear power plant, energy sector, energy transition, energy production, renewable energy sources, fossil energy sources		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Tutkimuskysymykset ja -asetelma	5
3	Ilmasto vuonna 2019	7
4	Energiasektorin nykytila	12
4.1	Fossiiliset energialähteet.....	13
4.2	Uusiutuvat energialähteet	17
4.2.1	Vesivoima.....	19
4.2.2	Aurinkovoima	21
4.2.3	Tuulivoima.....	22
4.2.4	Maalämpö	23
4.2.5	Bioenergia	24
4.3	Ydinvoima	26
5	Energiatuotanto huomenna	26
6	Ydinvoiman rooli energiatuotannossa	36
6.1	Ydinvoima Euroopassa	48
6.2	Ydinvoima Suomessa	51
7	Ydinvoiman mahdollisuudet (kehityssuunnat)	53
7.1	Neljännän sukupolven reaktoritekniikka	55
7.2	Torium polttoaineena	64
7.3	Fuusio	67
7.4	Pienet modulaariset reaktorit	71
7.5	Lämmöntuotanto ydinenergialla	73
7.6	Ydinjäte.....	77
8	Pohdinta	83
	Lähteet	86

Kuviot

Kuvio 1. CO2 päästöt	9
Kuvio 2. CH4 päästöt	9
Kuvio 3. N2O päästöt	9
Kuvio 4. SF6 päästöt	10
Kuvio 5. Globaalit kasvihuonekaasupäästöt per tyyppi ja lähde	10
Kuvio 6. Globaalit energiasectoriin liityvät CO2 päästöt lähteittäin, 1990 - 2018.....	11
Kuvio 7. Globaali energiakysyntä ja sähkötuotanto lähteittäin	12
Kuvio 8. Primaarienergian kysynnän kasvu vuosina 2010-18	13
Kuvio 9. Globaalin primaarienergian kysynnän kasvu polttoaineittain ja alueittain vuosina 2017-18	13
Kuvio 10. Muutos sähköntuotannossa lähteittäin, 2017-18.....	13
Kuvio 11. Uusiutuvien energialähteiden vuotuinen kasvuvauhti vuosina 2000- 2018 OECD maissa	17
Kuvio 12. Polttoaineiden osuudet maailman primaarienergian kokonaismäärästä.....	18
Kuvio 13. Uusiutuvien osuudet kokonaismäärästä lähteittäin vuonna 2017	18
Kuvio 14. Sähköntuotannon kasvu uusiutuvilla alueittain ja teknologian mukaan vuonna 2017-18.....	19
Kuvio 15. Geotermisen sähköntuotanto ja sen kumulatiivinen kapasiteetti alueittain v.2017-2023	24
Kuvio 16. Biomassan ja jätteiden kulutus vuonna 2015	25
Kuvio 17. Kokonaiskulutuksen vuotuinen kasvu polttoaineen mukaan (vasen) ja sähkön osuus (oikea) New Policies Scenario:ssa.....	28
Kuvio 18. Maailman primaarienergian kysyntä ja CO2 päästöt eri IEA:n skenaarioiden mukaan	29
Kuvio 19. Primaarienergian saaminen uusiutuvilla eri skenarioiden mukaan.....	31
Kuvio 20. Eri sähköntoimitustekniikoiden elinkaaren päästötase	34

Kuvio 21. Maailman sähköntuotanto ydinvoimalla vuonna 2018 ja sen osuus globaalissa sähkötuotannossa	37
Kuvio 22. Globaali vähähiilinen sähköntuotanto lähteittäin, 2018	37
Kuvio 23. Kumulatiiviset hiilidioksidipäästöt, joita ydinvoiman käyttö auttanut välttämään tähän mennessä	38
Kuvio 24. Reaktoreiden käyttöönotto ja ydinvoiman osuus koko sähköntuotannosta	39
Kuvio 25. Ydinvoimakapasiteetin ikäprofiili alueiltaan	40
Kuvio 26. Vertailu ydinvoiman käyttöiän pidentämisen muihin teknologioihin .	43
Kuvio 27. Primäärienergia vuosina 2017 ja 2040 NPS:n ja SDS: n skenaarioiden mukaan.....	45
Kuvio 28. Käyttöydinvoimakapasiteetti kehittyneissä talouksissa ydinvoiman häivyttämistapauksessa	46
Kuvio 29. Kumulatiiviset sähkösektorin investoinnit kehittyneisissä talouksissa SDS skenaariossa ja ydinvoiman käytön laskiessa v. 2019–40 (IEA 2019c, 65) ...	47
Kuvio 30. ^{238}U ja ^{232}Th reaktiot	56
Kuvio 31. Ydinreaktoreiden aikajana	58
Kuvio 32. Fuusio reaktio	67
Kuvio 33. ITER	69
Kuvio 34. Stellaraattori Wendelstein 7-X	70
Kuvio 35. SMR:n nykytilanne	72
Kuvio 36. SECURE – reaktorikonsepti	75
Kuvio 37. Kiinan kaukolämpöreaktorit	75
Kuvio 38. NuScale reaktorimoduuli	76
Kuvio 39. Havainnekuva loppusijoituslaitos vuonna noin 2020.....	79
Kuvio 40. Kiinteytyslaitoksen periaatteellinen toimintaperiaate.....	81
Kuvio 41. Betoninen käyttämätön loppusijoitusastia	81

Taulukot

Taulukko 1. Neljännen sukupolven reaktortyytit.....	60
---	----

1 Johdanto

Maailman energiajärjestelmä on murroksessa. Tämä murros koskee koko energian arvoketjua: tuotantoa, siirtoa ja käyttöä. Ilmastonmuutoksen hillintä edellyttää, että kivihiilen, öljyn ja kaasun käyttöä ei tulevaisuudessa jatketa. Tuotannossa fossiiliset polttoaineet korvautuvat uusiutuvalla energialla – pääasiassa auringolla, tuulella ja biopolttoaineilla. Tuuli- ja aurinkoenergian tuotantokustannukset ovat kovassa laskussa, kun samalla hiilidioksidipäästöjen talteenotto on osoittautunut hyvin kalliiksi ratkaisuksi. Murros koskee myös keskitettyä sähkön ja lämmön tuotantoa, kun sen rinnalle tulee hajautetut järjestelmät - hajautettuja niin maantieteellisesti kuin omistuksellisesti. Hajautettu hiilidioksidivapaa sähköntuotanto on erinomainen askel ilmaston lämpenemisen hillinnässä, mutta samalla myös ongelmallinen sähköenergiajärjestelmien ja sähkömarkkinoiden näkökulmasta. Sähköjärjestelmän toiminnan ehdoton vaatimus on tehotasapainon ylläpito, eli tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa. Tuuli- ja aurinkovoimalan tehoa voi ohjata kuitenkin vain alaspäin. Kun uusiutuvan tuotannon määrä kasvaa nopeasti, sähkön alhainen ja nopeasti vaihteleva hinta on johtanut siihen, että voimalaitoksia ajetaan kannattamattomina alas eikä uusien laitosten rakentaminen markkinaehtoisesti ole kannattavaa. Riippuvuus tuonnista kasvaa, mutta siirtoyhteydet rajoittavat sähkön siirtämisestä maasta toiseen. Jos sähkötuotanto tulee vaikeasti ennakoitavaksi ja säädettäväksi, energiajärjestelmän vakaus ja tehokkuus vaarantuvat.

2 Tutkimuskysymykset ja -asetelma

Energiasta ja ilmastonmuutoksesta puhutaan paljon, mutta aiheet ovat keskittyneet uusiutuvan energiantuotannon ympärille, energiajärjestelmän tehostamiseen, älykkäiden sähköverkkojen ja akkuteknologian kehitykseen. Ydinvoima sen sijaan nostetaan ilmastoyhteyksissä keskusteluun harvoin. Vaikka perinteinen ydinvoimalaitos tuottaa energiaa sähkön muodossa samaten kuin tuuli- ja aurinkoenergiavoimalat. Tästä ilmiöstä muodostui ensimmäinen opinnäytetyön kysymys: mitkä

ovat nykyään eri energialähteiden osuudet sähköntuotannosta ja miten ne vaikuttavat kasvihuonekaasupäästöjen määrään. Toiseksi kysymykseksi asetettiin energiajärjestelmän muutosten suunnat meneillään olevalla vuosisadalla ja millä keinoilla energian saannin riittävyyttä ja varmuutta taataan tulevaisuudessa.

Ihmiskunnan kestävä kehityksen edellytyksenä on energiajärjestelmä, joka vastaa kysyntään kaikissa olosuhteissa, on tehokas ja sen ympäristövaikutukset ovat pienet. Se on johdonmukaista, pitkäjänteistä ja ennakoitavaa. Voiko ihminen nojata vain uusiutuviin energialähteisiin luodessaan sellaista systeemiä vai onko ydinvoimaa kumminkin tarpeen ottaa mukaan taisteluun ilmastonmuutosta vastaan? Jos ydinvoimaan suhtaudutaan positiivisesti, minkälaista ydinenergia sitten tulevaisuuden energiapaletissa olisikin? Näitä asioita on pyritty pohtimaan opinnäytetyössä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Jyväskylän ammattikorkeakoulun energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Tämän kehittämistutkimuksen kautta oli tarkoitus tuottaa käytettäväksi JAMK:lle viimeistä ja ajankohtaista tietoa energiasektorista maailmanlaajuisesti, jossa ydinvoiman rooli on muuttunut. Lisäksi tavoitteeksi oli koota ydinvoiman kehitystä kuvaavia materiaaleja, joita voisi hyödyntää koulutusaineistona.

Työssä käytettiin sekä kvantitatiivista että kvalitatiivista tutkimusotetta. Energiapaletin nykytila ja sen muutokset sekä ilmastoon vaikuttavia päästöjä esitettiin raportissa numeerisesti. Saadun tilaston perusteella on tehty analyysi energiamarkkinoiden kehitysskenaarioista ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Analyysin jälkeen kvalitatiivisilla menetelmillä on mallinnettu energia-alan ominaispiirteet lähitulevaisuudessa ja ydinenergian sijansa markkinoilla. Samojen menetelmien avulla on tutkittu ydinvoiman positiiviset ja negatiiviset puolet sekä faktorit, jotka vaikuttavat ydinvoimalan kannattavuuteen ja sen osuuden pienentämiseen energiatuotannossa. Laadullisen tutkimuksen kautta on kuvattu ydinenergian potentiaaliset teknologiat ja innovaatiot sekä pohdittu mitkä niistä voidaan toteuttaa.

Opinnäytetyötä tehtäessä apuna on käytetty muun muassa Kansainvälisen energiajärjestön, Kansainvälisen atomienergiajärjestön ja Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC tilastoja, raportteja ja tutkimuksia. Teoreettisia tietoja on saatu alan kirjallisuudesta. Lisäksi on hyödynnetty ydinenergian valvontaorganisaatioiden materiaaleja sekä ammattilaislehdistöä. Tietokanavana on ollut myös media- ja blogikirjoitukset.

3 Ilmasto vuonna 2019

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneeli IPCC:n on julkaissut kaksi raporttia ”Climate change and Land” ja ” Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)” elokuussa ja syyskuussa 2019. Raportit kuvaavat millaisia ovat ihmisten vaikutukset ilmastoon ja miten ilmastonmuutos vaikuttaa maahan, meriin, jäähän ja lumeen.

Climate change and Land (IPCC 2019a) raportin mukaan maankäyttö on kiihdyttänyt ilmaston lämpenemistä, aavikoitumista ja maaperän köyhtymistä viime vuosikymmeninä. Ilmastonmuutos vaarantaa ruokaturvaa ympäri maapallon. Kohonneet lämpötilat, sademäärien muutokset sekä sään ääri-ilmiöiden yleistyminen vaikeuttavat ruuantuotantoa ja veden saatavuutta. Kun viljelysmaat kuivavat ja kalakannat katoavat köyhien alueiden asukkaat jättävät kotiseutunsa ja syntyy ”pakolaiskriisi”.

Raportti toteaa, että ilmastomuutoksen hillitsemiseksi täytyy sekä vähentää päästöjä, että kasvattaa hiilinieluja.

Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) (IPCC 2019b) kertoo, että maapallon jäätiköt ovat pienentyneet, lumen ja ikeroudan peittämät alueet ovat kutistuneet, valtameret ovat lämmenneet ja merenpinnan nousu on kiihtynyt viime vuosikymmeninä.

Kryosfäärin muutosten vuoksi kylmien ja lumisten vuoristojen lajit ovat siirtyneet yhä ylemmäs ja niiden tilalle ovat tulleet lämpimiltä alueilta levittäytyneet lajit. Lämpeneminen ja ikiroudan sulaminen on lisäksi maastopalojen syy. Ikirouta on sitonut huomattavan määrän kasvihuonekaasuja, joita vapautuu taas ilmakehään ilmaston lämmitessä. Näin ollen ihmisen aiheuttama ilmakehän hiilidioksidimäärän kasvu on laukaissut luonnollisen kasvihuonekaasujen lähteen.

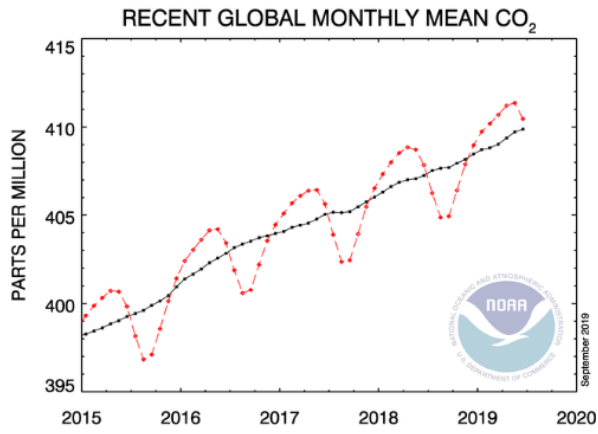
Kryosfäärin muutokset vaikuttavat vesivaroihin ja siten energiantuotantoon ja kasteeluun. Muutokset vaikuttavat myös puhtaan veden saatavuuteen vuoristoalueiden alaosissa sekä elintarviketurvaan ja ihmisten toimeentuloon arktisella alueella.

Merten lämpeneminen ja jääpeitteen pieneneminen muuttaa rannikoiden ekosysteemiä. Valtamerten pinta nousee ennusteen mukaan kasvihuonekaasupäästöjen kasvusta riippuen noin 28–110 cm vuosisadan loppuun mennessä. Äärimäiset tulvavaHINGOT arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa. Tulvien vaikutuksille jäävät erityisesti rannikoiden miljoonakaupungit ja saarivaltiot.

Hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa ilmakehässä osa hiilidioksidista liukenee mereen ja happamoittaa vettä. Merten happamoittaminen vaikuttaa valtameren ravintoketjuihin ja ekosysteemiin, ja lopulta ihmisten ravinnoksi käyttämiin kalakantoihin.

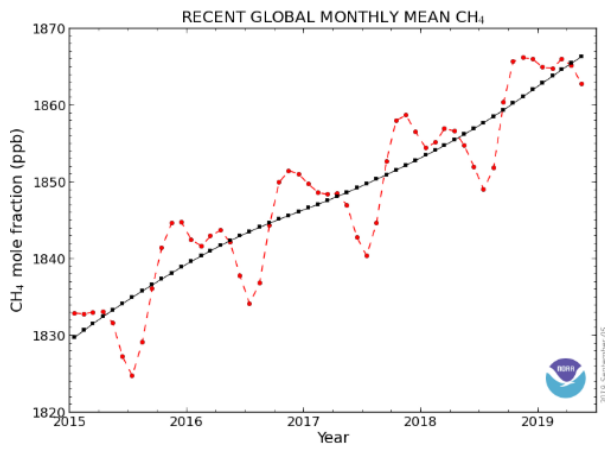
Raportin mukaan merien, jäätiköiden, lumipeitteen ja ikiroudan muutokset jatkuvat. Niiden voimakkuus kuitenkin riippuu siitä, kuinka paljon kasvihuonekaasujen pitoisuudet kasvavat ilmakehässä.

Kioton pöytäkirjassa säädeltäviä kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O) sekä ns. F-kaasut, joita ovat fluorihilivedyt (HFC), perfluorihilivedyt (PFC) ja rikkiheksafluoridi (SF₆). Tilaston mukaan niiden määrät ilmassa ovat jatkuvassa kasvussa, kuten kuviossa 1-4 näkyy.



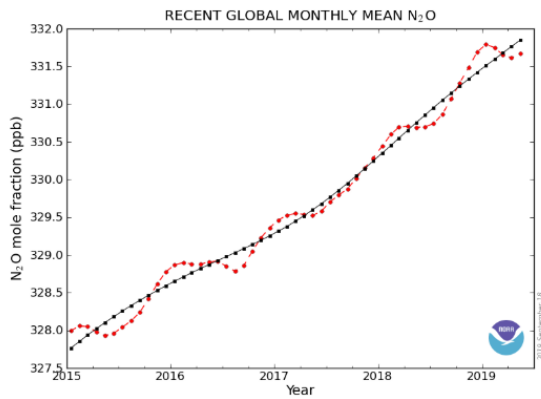
June 2019: 410.45 ppm
June 2018: 407.84 ppm
Last updated: September 5, 2019

Kuvio 1. CO2 päästöt (Trends in Atmospheric Carbon Dioxide 2019)



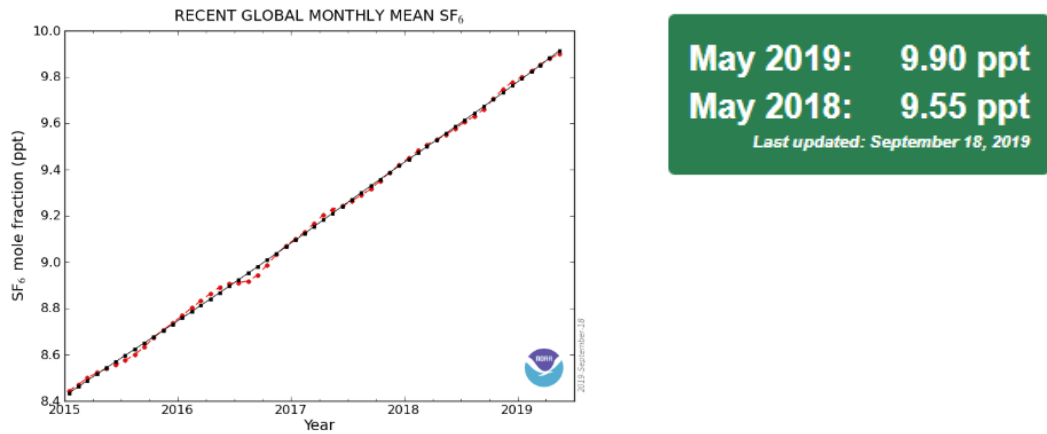
May 2019: 1862.8 ppb
May 2018: 1854.8 ppb
Last updated: September 05, 2019

Kuvio 2. CH4 päästöt (Trends in Atmospheric Methane, 2019)



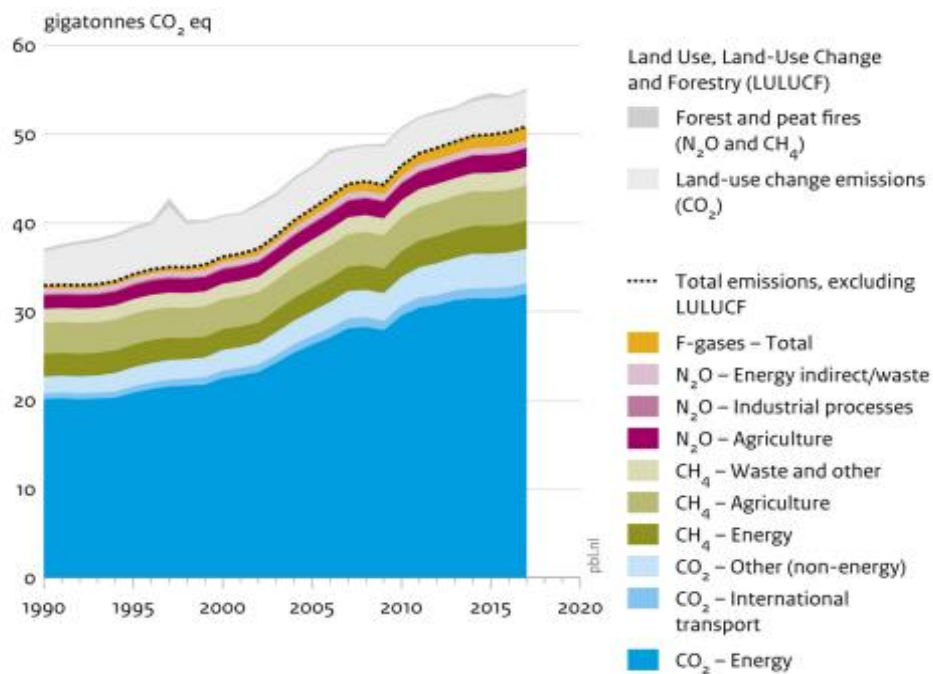
May 2019: 331.7 ppb
May 2018: 330.7 ppb
Last updated: September 18, 2019

Kuvio 3. N2O päästöt (Trends in Atmospheric Nitrous Oxide 2019)



Kuvio 4. SF₆ päästöt (Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride 2019)

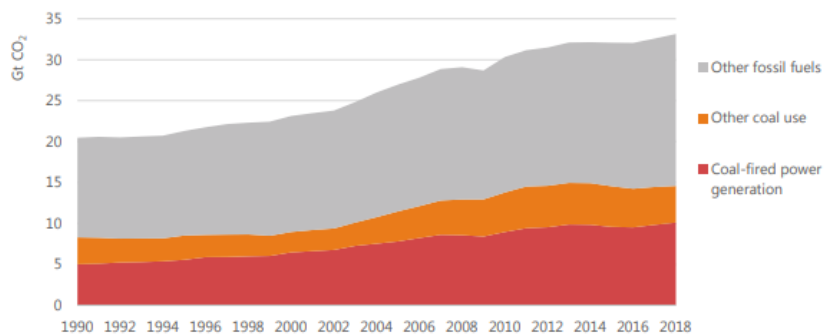
Hiilidioksidi on ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista merkittävin ja valtaosa siitä on peräisin fossiilisten polttoaineitten käytöstä. (Ks. kuvio 5.)



Source: EDGAR v5.0/v4.3.2 FT 2017 (EC-JRC/PBL, 2018); Houghton and Nassikas (2017)

Kuvio 5. Globaalit kasvihuonekaasupäästöt per tyyppi ja lähde (Olivier & Peters 2018, 12)

Vuoden 2018 korkeamman energian kysynnän johdosta globaalit energiaan liittyvät hiilidioksidipäästöt nousivat 1,7% ja saavuttivat historiallisen korkean 33,1 Gt. (Ks. kuvio 6.)



Kuvio 6. Globaalit energiasektoriin liittyvät CO₂ päästöt lähteittäin, 1990 - 2018 (IEA 2019)

Tämä kasvuvauhti oli korkein vuodesta 2013 lähtien. Voimakas globaalitalous ja siitä johtuva energiakulutuksen kasvu sekä eri puolilla maailmaa sattuneet sääolosuhteet, jotka vaativat lisää energiaa lämmitykseen ja jäähdytykseen, aiheuttivat hiilidioksidipäästöjen nousun.

Energiatohokkuuden parantaminen ja vähähiilinen tekniikka edellisinä 2014-2016 vuosina auttoi pysäyttämään hiilidioksidipäästöt, mutta vuodesta 2017 lähtien ne keinot eivät enää kyenneet vastaamaan korkeamman talouskasvun tarpeisiin.

Jos jatkamme samalla tavalla, maapallon pintalämpötila nousee vuoteen 2100 mennessä 3,7 – 4,8 C esiteollisuuden aikaan verrattuna. Pariisin ilmastokonferenssin sopimuksen mukainen alle kahden asteen ilmaston lämpeneminen on mahdollista vain, jos ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ei ylity pitkäaikaisesti 450 ppm. Monien tutkijoiden mielestä oikea tavoite on vielä pienempi 350-400 ppm. Tämä tarkoittaa sitä, että maailmanlaajuisesti päästöjen tulee pienentyä 40-70 prosenttia vuoteen 2050,

ja lähes 100 prosenttia vuoteen 2100 mennessä. Eli energiasektorin täytyy olla käytännössä täysin päästötön. (Korhonen & Partanen 2016, 26.) Seuraava työn osa kuvaa mitä energia-alalla on tapahtunut ja millaisia muutoksia on tulossa.

4 Energiasektorin nykytila

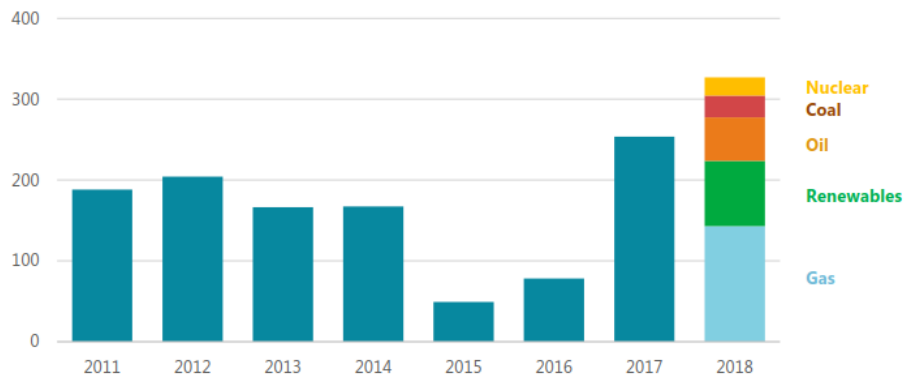
International Energy Agency (IEA) mukaan 3,7 % kasvanut globaalitalous, lämmitys- ja jäähdytystarpeet johtuvat 2,3 % energiakulutuksen nousuun vuonna 2018 (Ks. kuvio 7.), tämä vauhti on lähes kaksikertainen verrattuna vuoteen 2010.

Energy Demand (Mtoe)	Growth Rate (%)		Shares (%)	
	2018	2017-2018	2000	2018
Total Primary Energy Demand	14 301	2.3%	100%	100%
Coal	3 778	0.7%	23%	26%
Oil	4 488	1.3%	36%	31%
Gas	3 253	4.6%	21%	23%
Nuclear	710	3.3%	7%	5%
Hydro	364	3.1%	2%	3%
Biomass and waste	1 418	2.5%	10%	10%
Other renewables	289	14.0%	1%	2%

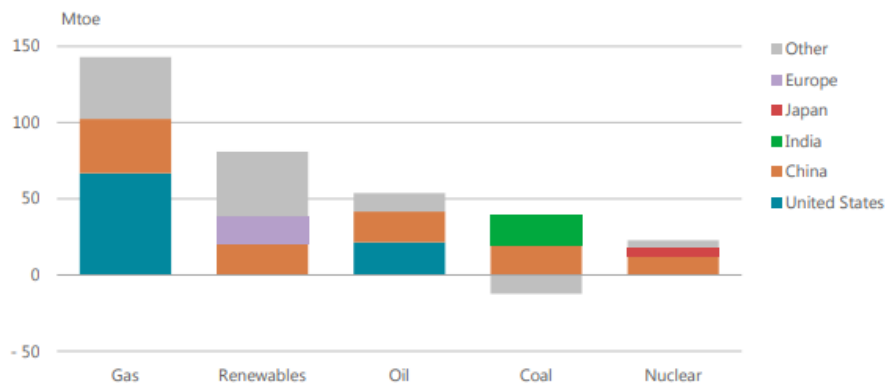
Electricity Generation (TWh)	Growth Rate (%)		Shares (%)	
	2018	2017-2018	2000	2018
Total Generation	26 672	4.0%	100%	100%
Coal	10 116	2.6%	39%	38%
Oil	903	-3.9%	8%	3%
Gas	6 091	4.0%	18%	23%
Nuclear	2 724	3.3%	17%	10%
Hydro	4 239	3.1%	17%	16%
Biomass and waste	669	7.4%	1%	3%
Wind	1 217	12.2%	0%	5%
Solar photovoltaics	570	31.2%	0%	2%
Other renewables	144	4.2%	0%	1%

Kuvio 7. Globaali energiakysyntä ja sähkötuotanto lähteittäin (IEA 2019a)

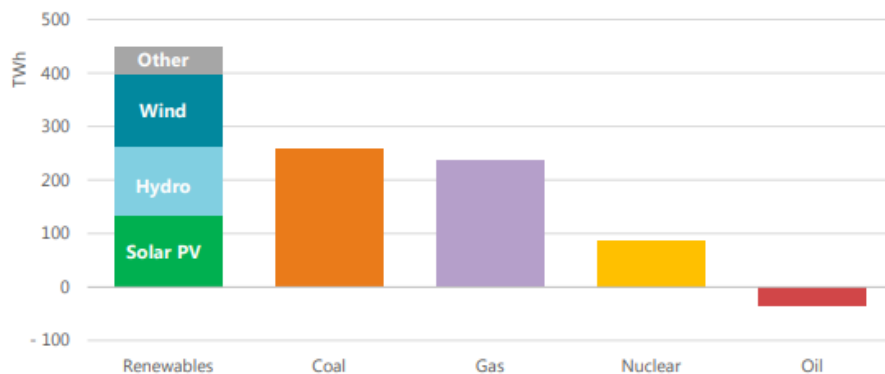
Kuvioiden 8, 9 ja 10 luvut antavat ymmärtää, että ihmiskunnan energiataloudessa tapahtumassa suunnanmuutos. Maailmanlaajuinen siirtymä fossiilista polttoaineista muihin energialähteisiin on alkanut.



Kuvio 8. Primaarienergian kysynnän kasvu vuosina 2010-18 (IEA 2019a)



Kuvio 9. Globaalin primaarienergian kysynnän kasvu polttoaineittain ja alueiltain vuosina 2017-18 (IEA 2019a)



Kuvio 10. Muutos sähköntuotannossa lähteittäin, 2017-18 (IEA 2019a)

4.1 Fossiiliset energialähteet

Kuten edellä on mainittu öljyn, hiilen ja maakaasun eli fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyy ilmakehään haitallisia päästöjä. Polttamisessa syntyvät savukaasut sisältävät hiilidioksidia, rikkidioksidia, typen oksideja sekä hiukkaspäästöjä. Suurin osa

päästöistä on kuitenkin hallittavissa puhdistus- ja polttotekniikalla. Suurissa hiilivoimalaitoksissa on rikinpoistolaitos ja typen oksideja vähennetään polttoteknisesti ja katalysaattoreilla. Nämä keinot todennäköisesti eivät ole riittäviä, kun päästöjen pitoisuus kasvaa joka vuosi ja suuresta vaarasta huolimatta ihmiskunta jatkaa fossiilisten polttoaineiden käyttämistä energiantuotannossa ja teollisuuslaitoksessa.

IEA:n raportissa (IEA 2019a) kerrottiin öljyn kysynnän hidastumisesta vuonna 2018 ja öljyn keskimääräisten hintojen kasvusta 30 prosenttiin edelliseen vuoteen nähden.

Enemmän kuin 150 vuotta energialähteenä käytetyn öljyn hyödyntäminen nykyään vaikenee. Perinteistä öljyntuotantoa rajoittavat geologiset seikat. Uuden öljylöydöt ovat nykyisin harvinaisia eikä niin suuria kuin ennen. Öljyn etsinnän ja tuotannon kehittämisen kustannukset ovat jatkuvassa nousussa. Tulevaisuuden öljyn esiintymät sijaitsevat merenpohjan alla tai ympäri Pohjoista jäämerta, jossa tavataan kelluvia jäävuoria ja vaikeita ilmasto-olosuhteita. Toinen öljyn lähde on liuskekivi tai öljyhiekka, joka myöskään ole halpaa tuoda markkinoille. Sitä ei voi porata ja pumpata, vaan tarvitaan porakaivokset, jotka tuhoavat maiseman. Öljy-yhtiöt käyttävät tekniikkaa, jossa hiekassa sisältävä bitumia kuumennetaan maan alla ja laitetaan putkiin. Tämä tuotantoprosessi vaatii paljon energia itsestään, joten sen hyötysuhde on heikko perinteiseen öljykentältä pumpatun öljyyn nähden. (Brown 2017, 33-36.) Tästä huolimatta raakabitumin tuotannon osuus globaalista kulutuksesta kasvoi vuonna 2018 3,1 prosenttiin vuoden 2017 2,9 prosentista (Government of Alberta Canada 2018 – 2019).

Yhdysvalloissa liuskeöljyn horisontaalinen poraaminen ja vesisärötys saivat suosion. Mutta sen esiintymät ovat niin hajanaisia, että kaivoja on porattava lukuisia, ja ne kuivavat nopeammin kuin perinteiset kaivot. Vesisärötys vaatii paljon vettä ja kuluttaa paikallisia vesivaroja. Se on aiheuttanut myös pohjavesien pilaantumista. Liuskekaasun positiivisena piirteenä voidaan mainita hiilidioksidipäästöt, jotka ovat EU:n tekemän selvityksen mukaan tuotettua energiamäärää kohden laskettuna hiukan suuremmat kuin perinteisen maakaasun, ja jopa puolet pienemmät kuin kivihiilen tuottamat päästöt (Vesisärötys N.d.).

Vaikka maailmanlaajuisesti öljyn kulutus jatkuu, esimerkiksi vuonna 2018 suurin kokonaiskasvu oli Yhdysvalloissa, yhä useammassa teollisuusmaissa se on savuttanut huippunsa ja alkanut laskea. Syitä siihen on muutama. Yksi niistä on muutos liikenteessä ja sen energiakäytössä. Nykyään autolla ajetaan vähemmän, ihmiset kulkevat töihin pyörällä, jalan tai julkisilla liikennevälineillä tai jopa tekevät työtä kotona. Ajoneuvoteknologia kehittyy ja ajamisen tehokkuus paranee, polttomootoreista siirrytään sähkömootoreihin. Autojen käyttöä rajoitetaan kaupungeissa, joissa on havaittu voimakkaat saasteet, melu ja liikenneuhkat. Jossain on otettu käyttöön sisäänpääsymaksu kaupunkialueelle ja asetettu rajoituksia myytävien autojen määrille. Esimerkiksi Shanghaissa rekisterikilpiä huutokaupataan ja nyt kilpi voi maksaa enemmän kuin itse auto. (Brown 2017, 41-50.)

Näyttävä esimerkki voi olla Kiina. Sen öljyn kysyntä hidastui, kun maa on siirtynyt vähemmän öljyn intensiiviseen kehitysmalliin ja hillinnyt ajoneuvojen käyttöä, joka parannettaisi kaupunkien ilmanlaatua. Kiinan ollessa maailman suurin automarkkina sen henkilöautojen kokonaismyynti laski 4,1 % vuonna 2018 edellisvuoteen verrattuna, mutta sähköisten henkilöautojen myynti puolestaan yli kaksinkertaistui noin 600 000:sta vuonna 2017 yli 1,2 miljoonaan vuonna 2018 (IEA 2019a).

Viime vuonna öljyn kysyntä Japanissa jatkoi supistumistaan teollisuuden ja liikenteen energiatehokkuustoimien ansiosta. Öljypohjainen sähkön tuotanto on vähentynyt, koska neljä ydinreaktoria palasi verkkoon ensimmäistä kertaa Fukushima onnettomuuden jälkeen vuonna 2011. Kysyntä supistui myös Koreassa, kun energia-alalla tuotanto muuttui merkittävästi öljystä kaasuun. Euroopan öljyn kysyntä pysyi ennallaan, vaikka Saksassa se laski merkittävästi. Euraasian öljyn kysyntä kasvoi voimakkaasti Venäjän öljyn kysynnän palautumisen myötä. Afrikassa matala talouskasvu ja Egyptin siirtyminen maakaasuun syrjäytti öljyn. Latalaisen Amerikan öljyn kysyntä kärsii edelleen taloudellisista vaikeuksista Argentiinassa, Venezuelassa ja Brasiliassa. Lähi-idässä öljyn kysyntä laski huomattavasti vuonna 2018 lähinnä Saudi-Arabian kysynnän jyrkän laskun seurauksena, mikä johtui rakentamisen vähentymisestä, hintauudistuksista, siirtymisestä maakaasuun energiasektorilla ja suuresta maastamuutosta. Tammikuussa 2018 hallitus yli kaksinkertaisti bensiinin hinnan ja vaikutti kysyntään.

Hiilen maailmanlaajuinen kysyntä kasvoi 0,7% vuonna 2018 Aasian korkean kysynnän takia. Kivihiilen rooli globaalisti kuitenkin hitaasti vähenee. Euroopan ja Pohjois-Amerikan ympäristöpolitiikka, halvemmat uusiutuvat energialähteet ja Yhdysvaltojen tapauksessa runsas maakaasun toimitus syrjäytyvät kivihiiltä. Siitä huolimatta kivihiili on edelleen suurin sähkön lähde ja toiseksi suurin primäärienergian lähde. Satoja uusia hiilivoimaloita suunnitellaan monissa eri maissa. Merkittävä määrä hiilivoimaloita on tulossa Intiaan. Vaikka sen pääministeri viisi vuotta sitten ilmoitti ajavansa aurinkovoimaloiden laajentamista voimakkaasti kansallisella tasolla, samaan aikaan hänen hallinto vaatii kotimaisten hiilenkulutuksen kaksinkertaistamista vuoteen 2020 mennessä. Näin olleen Intiasta tuli maailmaan toiseksi eniten hiiltä kuluttava valtio ja sen kaupunkien saastunut ilma kilpailee jo Kiinan kanssa, joka kuluttaa enemmän hiiltä maailmassa.

Kiinan hiilen kulutuksen vuotuinen kasvu on kumminkin hidastunut, siihen on muutama syy. Kansalaiset ovat huolestuneet hiilivoimaloiden aiheuttamasta saastumisesta ja vaikutuksesta terveyteen. Tämän lisäksi voimaloiden aseman heikentävä tekijä on suuren veden määrän kulutus jäähdytykseen. Kiinan poliittiset päätökset kuten esimerkiksi vuonna 2014 solmittu Yhdysvaltojen kanssa sopimus päästöjen vähentämiseksi luonnollisesti vaikuttavat hiilen käytön rajoittamiseen.

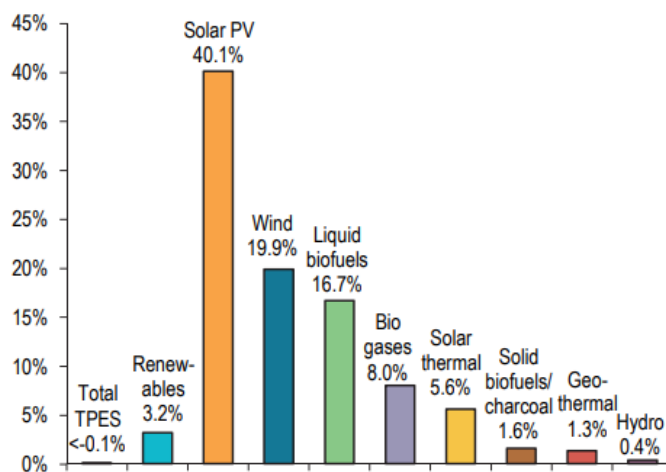
Hiilen käytön kasvua on jonkin verran hidastanut rahoituksen saannin vaikeudet. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ei enää käytetä julkisia varoja hiilivoimaloiden kansainväliseen rahoittamiseen. Maailmanpankki ei rahoita enää myöskään hiilivoimaloita. Euroopan investointipankki asetti tiukkoja rajoitteita hiilidioksidipäästöjen arvoille, kun haetaan lainaa uusille tai uudistetuille hiilivoimaloille. EU:n päästökaupan ansiosta uusien hiilivoimaloiden rakentaminen ei enää ole kannattavaa, koska vaatimus päästöoikeuksien ostamisesta nostaa energiatuotantokustannukset korkealle.

Maakaasu on ”puhtain” fossiilinen energianlähde, sillä sen palamisessa ei synny rikkiä tai raskasmetalleja. Maakaasun hiilidioksidipäästöt ovat myös selkeästi alhaisemmat kuin öljyn tai kivihiilen. Näin ollen maakaasu on mahdollinen siirtymävaiheen polttoaine siirryttäessä kohti ilmastoneutraaliutta. Siirtyminen hiilestä kaasuun sähkötuotannossa ja rakennusalalla aiheutti sen kulutuksen nousua maailmanlaajuisesti

4,6% vuonna 2018. Yhdysvaltojen ja Kiinan osuus globaalista kasvusta oli 70%. Noin puolet kaasuun kysynnästä aiheutti keskimääräistä kylmempi talvi ja lämpimämpi kesä. (IEA 2019a.)

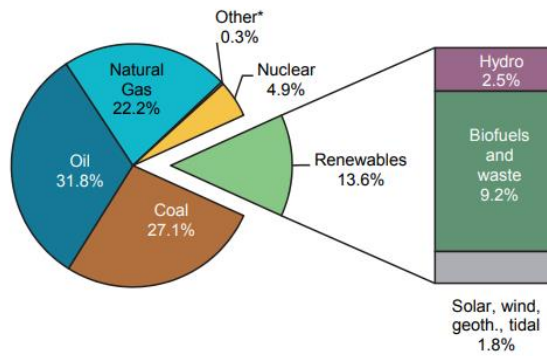
4.2 Uusiutuvat energialähteet

Keskustelu energiasta ja ilmastomuutoksen torjunnasta usein päätyy uusiutuvan energian tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Sen kasvulukemat ovatkin vaikuttavia. (Ks. kuvio 11.)

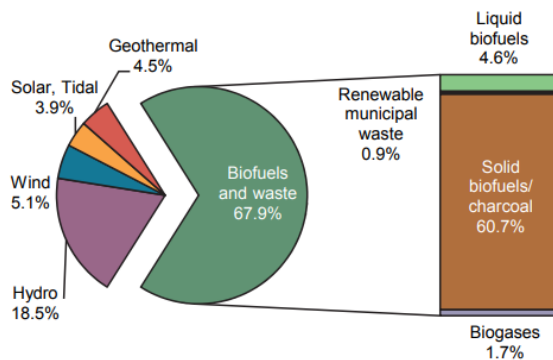


Kuvio 11. Uusiutuvien energialähteiden vuotuinen kasvuvauhti vuosina 2000-2018 OECD maissa (IEA 2019b)

Vuonna 2017 maailman primaarienergian kokonaismäärä oli 13 972 Mtoe, josta 13,5% eli 1 894 Mtoe tuotettiin uusiutuville energialähteillä. (Ks. kuvio 12). Kotien lämmitys ja ruonlaitto kehitysmaissa pääsääntöisesti toteutetaan kiinteällä biopolttoaineella ja puuhiilillä, sen takia niiden osuus uusiutuvien kokonaismäärästä on suurin. (Ks. kuvio 13.)

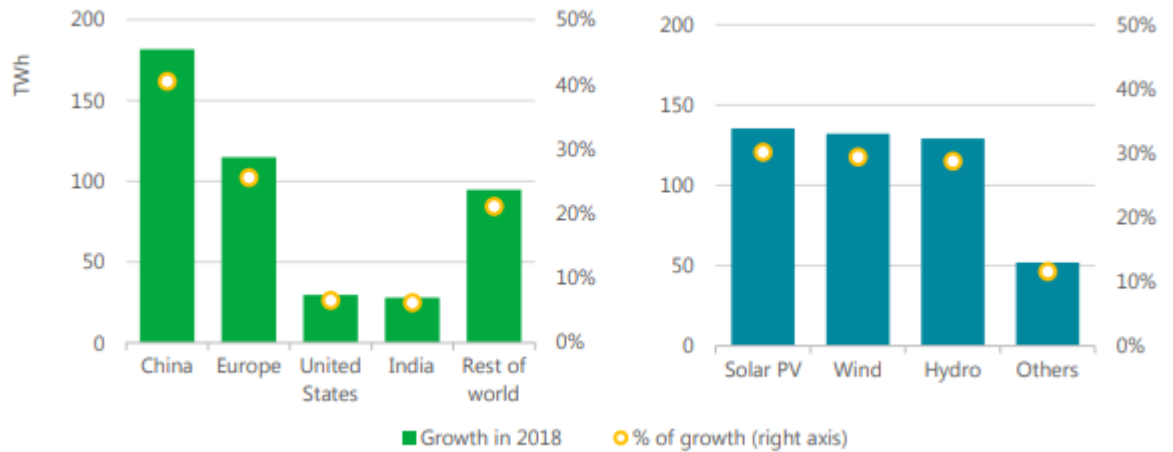


Kuvio 12. Polttoaineiden osuudet maailman primaarienergian kokonaismäärästä (IEA 2019b)



Kuvio 13. Uusiutuvien osuudet kokonaismäärästä lähteittäin vuonna 2017 (IEA 2019b)

Uusiutuvan energian kysyntä kasvoi 4% vuonna 2018, se on toiseksi eniten kasvava kaasun jälkeen. Uusiutuvat energialähteet vastasivat lähes 45 prosenttia maailman sähköntuotannon kasvusta. Kiinan osuus uusiutuvan sähköntuotannon kasvusta oli yli 40%, sen jälkeen Euroopan, jonka osuus oli 25%. Yhdysvaltojen ja Intian osuudet olivat 13%. Uusiutuvien energialähteiden käyttö kasvoi myös nopeasti näiden suurten markkinoiden ulkopuolella. (Ks. kuvio 14.)



Kuvio 14. Sähköntuotannon kasvu uusiutuvilla alueittain ja teknologian mukaan vuonna 2017-18 (IEA 2019a)

Uusiutuvien energialähteiden kasvu on nopeinta sähköalalla, ja IEA ennustaa niiden osuuden kasvua energiankulutuksessa 30 prosenttiin vuoden 2023 mennessä. Silloin uusiutuvat energialähteet vastaisivat yli 70%:n maailmanlaajuisesta sähköntuotannon kasvusta (IEA 2018a).

Rakennusten ja teollisuuden lämmityksessä uusiutuvien käyttö kasvaa hitaammin kuin sähköntuotannossa. Jatkuvassa talous- ja väestökasvussa ennusteiden mukaan sen odotetaan kasvavan 20 prosenttiin.

Liikenteen uusiutuvien energialähteiden osuus on alhaisin kaikista kolmesta sektorista, ja niiden osuus kasvaisi vain vuoden 2017 3,4 prosentista 3,8 prosenttiin vuonna 2023. Vaikka uusiutuvat energialähteet kasvavat melkein viidenneksellä ennustejakson 2018 - 2023 aikana, uusiutuvat energialähteet kattavat vain pienen osan energian kysynnästä liikenteessä jatkuvan öljytuotteiden kulutuksen takia.

4.2.1 Vesivoima

Uusiutuvaan energialähteisiin kuuluvan vesivoiman tuotanto kasvoi 3% vuonna 2018, kasvu oli nopeampaa kuin vuonna 2017. Kiina on suurin sähkötuoittaja vesivoimalla,

sitä seuraavat ovat Brasilia, Kanada ja Yhdysvallat. Monet pienemmät valtiot tuottavat vesivoimalla kaiken tai melkein kaiken sähkönsä vesivoimalla. Jotkut maat pystyvät viemään ylimääräistä sähköä naapurimaihin, kuten esimerkiksi Kanada.

Vesivoima on uusiutuva ja suhteellisen luotettava energianlähde, sitä voidaan säiden salliessa hyödyntää lähes tauotta ja tarvittaessa tuotantoa voidaan nopeasti kasvattaa esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkön saatavuuden vaihtelun tasoittamiseksi. Sähkötuotannon ohella patoja voidaan käyttää veden varastointiin sekä keinokasteluun. Vesivoimalla on olemassa haittapuoletkin. Isot vesivoimalapadot ja niiden tekojärvet peittävät laajoja alueita, ihmiset joutuvat muutamaan pois sieltä, veden alle jäävät historialliset ja kulttuurilliset kohteet. Tulvat hävittävät paikallisia kasveja ja vahingoittavat ekosysteemiä. Vaelluskalakannat eivät pääse vaeltamaan lisääntymisalueille ja tämä voi aiheuttaa pahimmillaan lajin sukupuuton. Padot uhkaavat alemman jokivarren maa-alueiden vakautta, alavirralla sijaitsevat vesistöt voivat kutistua tai kuivua. Vesisähkön tuotanto itsessään altistaa kuivuuden aiheuttamille häiriölle. Vaikka vesivoima on uusiutuva, se ei ole ilmastoneutraali, jos otetaan huomioon sitä varten tarvittava betonin määrää. Se voi aiheuttaa metaanipäästöjä, joita syntyy tekojärvissä ja patojen takana maatuovasta kasviaineksesta. Lisäksi patojen rakentaminen ja tekojärvien luominen voi laukaista maanjäristyksiä. Isojen patojen rakentaminen rasittaa maankuoren lisäksi myös taloutta. Niiden rakentamisen lopulliset kustannukset ovat tyypillisesti kaksinkertaiset verrattuna alkuperäiseen budjettiin. Lisäksi projektit eivät pysy aikataulussa ja kestää pitkään, silloin hankeihin vaikuttavat valuuttakurssit, inflaatio, poliittiset päätökset, sähkön hinnan heittely jne. Mutta taloudellisista ongelmista huolimatta IEA ennustaa vesivoimasähkön tuotannon kasvua vuoteen 2040 70 prosenttia, vaikka teollistuneissa maissa joen potentiaali on jo lähes kokonaan käytetty.

Virtaavien jokien lisäksi ihmiskunta voi hyödyntää vuorovesivirtausta ja aaltojen energiaa. Nämä hankkeet ovat kehitysvaiheessa. Lisäksi yritetään käyttää valtameren lämpöenergiaa, teknologia perustuu meren pintavesien ja syvien vesien väliseen lämpötilaeroon, jonka avulla pyöritetään sähköä tuottavaa turbiinia. Toinen menetelmä, jolla hyödynnetään vesienergiaa, on pumppausvarastointi. Pumppausvarastointi toimii siten, että kun sähkön kysyntä on alhaista, käytetään ylimääräistä sähköä veden

pumppaamiseen ylemmille tasoille, jotta sen alaspäin suuntautuva virtausta voidaan käyttää sähkön tuottamiseen tarpeen vaatiessa. (Brown 2017, 169-184.)

4.2.2 Aurinkovoima

Aurinkoenergiatuotannon tilasto todistaa, että sen käyttö etenee vauhdikkaasti ja vahvistuu joka vuosi. (Ks. kuvio 11, 14.)

Aurinkosähkön tuotanto yleistyy maailmalla niin asuin- ja liikerakennusten katoilla kuin useiden hehtaarien laajuisissa aurinkopuistoissa. Tuotannon kasvaessa maailmanlaajuisesti kysyntään vastatakseen aurinkopaneelien hinnat putosivat, ja aurinkosähkö pystyy kilpailemaan sähköverkosta otetut sähkön kanssa. Tavallisen aurinkojärjestelmän omistuksen lisäksi joissakin maissa asuinrakennukseen asetetun aurinkovoimajärjestelmän omistaa joku muu kuin kiinteistön omistaja itse, silloin järjestelmän omistaja asentaa ja kunnossapitää laitteistoa ja asiakas joko maksaa kiinteäksi sovittua hintaa sähköstä tai vuokraa itse järjestelmää. Molemmissa tapauksissa suuri osa alkukustannuksesta poistuu kuluttajalta. Nykyään monet rakennuttajat tarjoavat uutta taloa ostavalle aurinkopaneelioptiota.

Kun yhä useammat asiakkaat tuottavat ”omaa sähköä” ja ostavat energiayhtiöltä vähemmän heidän tuotteitansa, yhtiöt menettävät rahaa. Vaikka näin tapahtuu, energiayhtiöiden on silti pidettävä voimalaitoksensa toiminnassa ja ylläpidettävä infrastruktuuria, minkä seurauksena on taas hintojen nousu. Tämä puolestaan vauhdittaa entisestään katoille asennettavien aurinkovoimajärjestelmien yleistymistä. Energiayhtiöt joutuvat nyt sopeutumaan muutokseen ja niistä on tulossa enemmän energiapalveluyhtiöitä, jotka hallinnoivat ja yhdistävät sähköverkkoon aurinkovoimaa, tarjoavat asiakkaille energiatehokkuusneuvontaa ja myyvät energiaa säästäviä laitteita.

Aurinkokennot ovat tällä hetkellä yleisin keino muuntaa auringon energia sähköksi, myös toisia menetelmiä on olemassa. Nykyään perinteistä turbiinia tai moottoria voidaan pyörittää keskittävässä aurinkovoimassa peilien avulla keskitetyn aurinkovalon avulla. Tässä teknologiassa käytetään kaareutuvia peilejä, joilla aurinkovalo kohdennetaan kouruja myöten kulkevaan, nestemäisellä väliaineella täytettyyn putkistoon.

Kuumennetun väliaineen avulla tuotetaan höyryä pyörittämään turbiinia. Toisessa keskittävän aurinkovoiman menetelmässä (aurinkoenergiatorni) ohjattuja peilejä keskittävät aurinkovaloa tornin huipulla sijaitsevaan keskusvastaanottimeen, väliaine kuumenee, tuottaa höyryä, joka pyörittää turbiinia. Nämä teknologiat soveltuvat alueille, joilla on riittävästi aurinkoenergiaa. Aurinkoenergiatornin menetelmää kehitetään Chilen aavikolla, sillä tavalla että, lämpöenergiaa pystytään varastoimaan sulaaan suolaan jopa 18 tunniksi, eli kyseessä on ympäri vuorokauden toimiva aurinkosähkölaitos. (Brown 2017, 106-113.)

Aurinkosähkön lisäksi aurinkovoiman käyttöä on hyödynnetty aurinkokeräimien avulla veden lämmityksessä kotitalouksissa maailmalaajuisesti.

4.2.3 Tuulivoima

Valtioilla on monia syitä ottaa tuulivoimaa käyttöön. Tuulivoima on hiilivapaa, ei tule loppumaan, ei kulutta vettä eikä polttoainetta, tuulivoimaloita saadaan nopeasti käyttöön. Tuulivoimalat ovat edullisia, kun tuulipuisto on kerran pystytetty, kuluja syntyy vain sen ylläpidosta.

Tuulivoiman heikkous on sen saatavuuden vaihtelevuus. Ongelmaa jonkun verran ratkaistaan tuulipuistojen määrällä, koska kahta tuulipuistoa, joilla on identtiset tuuliolosuhteet, ei ole. Toinen useasti esitetty voimaloiden negatiivinen puoli on lintukuolemat pyöriviin lapoihin. Tämä on otettu huomioon teknologian kehittämisessä ja nykyaikaisten turbiinien lavat pyörivät hitaammin, kuin varhaisemmissa maaleissa. Lisäksi tuulipuistot sijoitetaan lintujen muuttoreittistä pois.

Maapallon tuulivoimaresurssien hyödyntäminen energiatuotantoon on tapahtunut pääasiassa manneralueella, mutta yhä useammat maat ovat alkaneet rakentaa tuulivoimaloita merillä, missä tuulet ovat voimakkaampia. Sellaisella tuulivoimaloilla haasteena on sähköasemien ja kappeleiden asentaminen, jotta merellä sijaitsevat turbiinit saadaan yhdistettyä sähköverkkoon. Yksikään tänään olevasta suuresta tuulipuistosta ei sijaitse reilua kolmeakymmentä kilometriä kauempana rannikosta.

Maalla sijaitsevan tuulivoiman (onshore wind) kapasiteetin odotetaan kasvavan seuraavien vuosien aikana ja saavuttavan lähes 839 GW vuoteen 2023 mennessä (65 % kasvua vuosina 2018-2023). Kiina johtaa kasvua, sitä seuraavat Yhdysvallat, Eurooppa ja Intia.

Myös merituulivoiman odotetaan kasvavan nopeasti. Uudet offshore - turbiinit kykenevät saavuttamaan huomattavasti enemmän täyden kuormituksen tunteja, jotka vaihtelevat 40-55% resurssien saatavuudesta riippuen. Vuoteen 2023 mennessä globaalin offshore kumulatiivisen kapasiteetin odotetaan olevan 52 GW. Sitä johtavat Euroopan unioni ja Kiina. (Wind N.d.)

4.2.4 Maalämpö

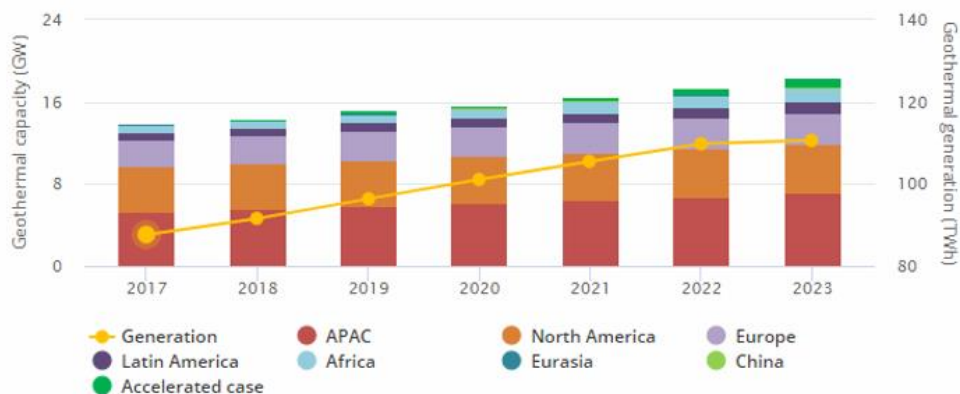
Geotermiset resurssit ovat runsaimmillaan siellä, missä maapallon mannerlaatat kohtaavat. Maailman geotermisen energian keskuksena voidaan pitää Islantia, jossa geotermisen energia on läsnä kaikkialla, sähkötuotannossa, kotien lämmityksessä, kasvi- maapidossa, kalankasvatuksessa ja kylpemisessä. Geotermisellä energialla saadulla sähköllä Islanti on voimatekijä alumiiniteosuudessa, joka on energiaintensiivinen. Maassa lämmitetään katuja ja pysäköintialueita kuumalla vedellä jään muodostamisen estämiseksi.

Islanti toki ei ole ainoa maa, jossa kehitetään geotermisiä teknologioita, Kiina on maailman geotermisen johtaja, toisella sijalla on Turkki. On olemassa maita, jotka pystyisivät tuottamaan kaiken tarvitsemansa sähkön yksinomaan geotermisellä energialla, kuten esimerkiksi Costa Rica, Ecuador, Kenia. (Brown 2017, 141-148.)

Monet maat käyttävät geotermiset resurssinsa kuuman veden tarpeisiin ja sisätilojen lämmittämiseen. Niiden lisäksi geotermistä energiaa hyödynnetään maalämpöpumpuilla. Yhdysvalloissa on kehitteillä binäärikierron menetelmä, jossa maaperän kuumalla vedellä kuumennetaan esimerkiksi isobutaania, jolla on alhaisempi kiehumispiste. Nesteen höyrystyessä höyry pyörittää turbiinia.

Vielä yksi uusi teknologia on keinotekoinen kuuma lähde (enhanced geothermal system EGS). EGS menetelmä tekee mahdolliseksi geotermisen energian hyödyntämisen alueilla, joilla kuumuutta on varastoituneena kallioperään, mutta kuumia vesivarantoja ei ole. Silloin ruiskutetaan vettä syvälle maan sisään kalliiossa jo olemassa olevien halkeamien laajentamiseksi ja uuden geotermisen reservin luomiseksi. Kallioperässä kuumennettu vesi tuodaan toisen kaivon kautta maan pinnalle, missä se muuttuu höyryksi ja pyörittää turbiinia.

Vuonna 2017 globaali geotermisen energiantuotanto oli arviolta 84,8 TWh, ja kumulatiivinen kapasiteetti oli 14 GW. Globaalisesti geotermisen voiman kapasiteetin odotetaan nousevan hieman yli 17 GW vuoteen 2023 mennessä, ja eniten kapasiteetin kasvua odotetaan tapahtuvan Indonesiassa, Keniassa, Filippiineillä ja Turkissa. (Ks. kuvio 15.)



Kuvio 15. Geotermisen sähköntuotanto ja sen kumulatiivinen kapasiteetti alueitain v.2017-2023 (Geothermal power generation N.d)

4.2.5 Bioenergia

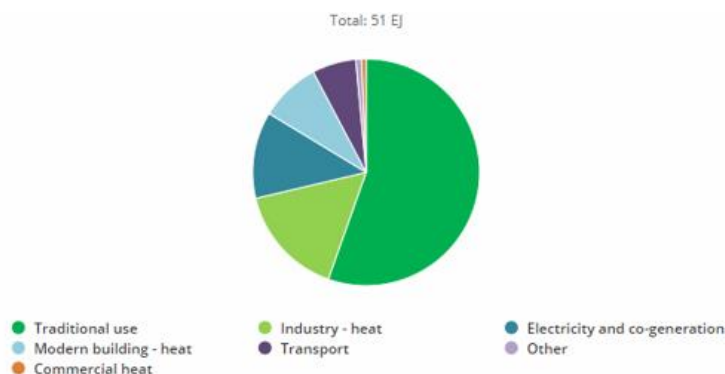
Bioenergian osuus maailman primaarienergian kokonaistuotannosta on noin 10%. Yli puolet tästä liittyy biomassan perinteiseen käyttöön kehitysmaissa ruoanlaittoon ja lämmitykseen. (Ks. kuvio 16.)

Näin sanotusti moderni bioenergia on tärkeä uusiutuvan energian lähde. Sen osuus loppukulutuksen kysynnässä kaikilla aloilla on viisinkertainen verrattuna tuulen ja aurinkoenergian yhteenlaskettuna. Viime vuosina sähkön ja liikenteen bioenergia on kasvanut nopeimmin lähinnä poliittisen tuen vuoksi.

Bioenergian käyttö on yleistä teollisuusaloilla, jotka tuottavat biomassan paikan päällä, kuten sellu- ja paperiteollisuus, sekä elintarviketeollisuus, jossa bioenergian avulla tuotetaan prosessilämpöä matalassa ja keskilämpötilassa. Nykyaikaista bioenergiaa käytetään myös laajasti tilan ja veden lämmitykseen joko suoraan rakennuksissa tai kaukolämpöjärjestelmissä.

Nestemäisiä biopolttoaineita voidaan käyttää liikennealan dekarbonisaatiossa, joka on edelleen öljystä riippuvainen.

Bioenergialla on pitkällä tähtäimellä keskeinen rooli vähähiilisessä energiajärjestelmässä. IEA:n 2 ° C-skenaariossa bioenergian globaalissa energiankulutuksessa pitää kasvaa nelinkertaisesti vuoteen 2060 mennessä. Tässä skenaariossa bioenergialla on erityisen tärkeä rooli liikennealalla, jolla se auttaa vähentämään hiilidioksidipäästöjä kaukoliikenteessä (lentoliikenne, meri- ja kaukoliikenne).



Kuvio 16. Biomassan ja jätteiden kulutus vuonna 2015 (Bioenergy N.d.)

4.3 Ydinvoima

Ydinvoiman tuotanto kasvoi 3,3% vuonna 2018. Puolet tästä johtui uusien laitosten käyttöönotosta Kiinassa. Neljä ydinvoimalaitosta uudelleen käynnistettiin Japanin Fukushima -tapaturman jälkeen. Tuotanto kasvoi Ranskassa, Sveitsissä, Taiwanissa, Pakistanissa ja Ruotsissa. Mutta se väheni Etelä-Koreassa uuden kunnossapitosäänösten vuoksi ja Belgiassa turvallisuuteen liittyvien ongelmien takia. (IEA. 2019a.)

5 Energiatuotanto huomenna

Vuonna 2050 maailmassa ennustetaan elävän noin 10 miljardia ihmistä. Vuosisadan loppuun mennessä määrä kasvaa tuoreimpien ennusteiden mukaan karkeasti 11 miljardiin. Väestönkasvu johtuu nykyisin eliniän pitenemisestä. Ihmisten kaipaama elintason parantaminen ei onnistu ilman energiankulutuksen kasvua. Toisaalta energiankäyttö per ihminen ei vaikuta kasvavan loputtomasti. Länsimaissa kulutus on pysynyt viime vuosikymmenet melko tasaisena ja jopa laskenut. Monien tutkimusten mukaan energiankulutus tulee kasvamaan tulevaisuudessa nykyisestä noin 550 eksajoulesta (EJ) vuodessa. (Korhonen & Partanen 2016, 45.) Maailmanlaajuisesti energiajärjestelmät ovat alkaneet irrottautumaan fossiilisista luonnonvaroista ja siirtymään puhtaampien, ehtymättömien energialähteiden käyttöön. Tämän muutoksen taustalla on ensisijaisesti tarve lieventää ilmastonmuutosta, mutta se tapahtuu myös samanaikaisesti teknisen innovoinnin ja sosiaalisten muutosten kanssa. Seuraavat tekijät tulevat vaikuttamaan tulevaisuuden energiajärjestelmän muodostumiseen

- Energian kysyntä. Kun maailman väestö ja varakkuus kasvavat, energian kysynnän odotetaan kasvavan eksponentiaalisesti. Suuren osan tästä kysynnästä oletetaan kohdistuvan sähkөөn, joka on nopeimmin kasvava energian lähde. Energiasektoriin investoidaan nyt jo enemmän kuin öljyyn ja kaasuun yhdessä, muuttuvan tuotantomuodon ja infrastruktuurin ikääntymisen vuoksi.

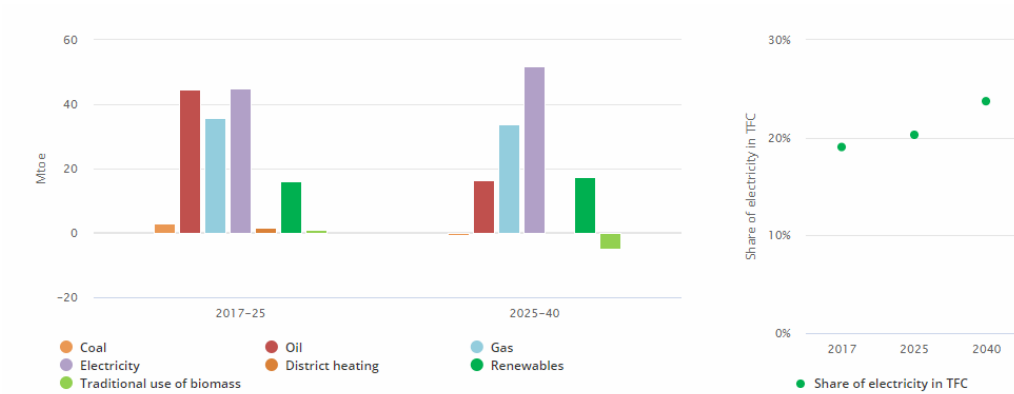
Globaalia sähköntuotantoa muuttaa myös uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen. Tämä toki edesauttaa siirtymään puhtaaseen energiaan, tarjoamalla sille

pääsyn lähes miljardille ihmiselle, joilta se puuttuu tällä hetkellä, auttaa vähentämään ilman pilaantumista ja saavuttamaan ilmastotavoitteet, mutta nämä muutokset lisäksi edellyttävät uutta lähestymistapaa energiajärjestelmien suunnitteluun ja toimintaan.

Nykyään sähkön osuus energian kokonaiskulutuksesta on 19%. IEA:n ”New Policies Scenario”¹ :ssa sähköenergian osuus saavuttaa 24% vuonna 2040 (Ks. kuvio 17), ja se on vielä kaukana täysimääräisestä sähköistyksestä. Tämä osuus pystytään todennäköisesti ylittämään, mutta kaikki loppukäytöt ei voida sähköistää, kuten korkean lämpötilan kysyntä teollisuudessa tai kaukolento- ja meriliikenne, joissa sähköistämistä on vaikeampaa saavuttaa taloudellisista ja teknisistä syistä.

¹ IEA:n kolme tulevaisuuden skenaariota:

- Current Policies Scenario, CPS eli ”Nykyisen linjan skenaario” kuvaa energiasektorin kehitystä, jos ilmastomuutoksen vuoksi ei ryhdytä toimenpiteisiin. Tässä skenaariossa otetaan huomioon vain niiden politiikkojen ja toimenpiteiden vaikutukset, jotka on kirjattu lainsäädäntöön vuoden 2018 puolivälissä. Se antaa varovaisen arvioinnin siitä, mihin nykyinen politiikka voi viedä energia-alaa, ellei hallituksilta tule mitään muita impulssia.
- New Policies Scenario, NPS eli ”Uuden linjan skenaario”:n tavoitteena on antaa käsitys siitä, missä nyky päivän poliittiset tavoitteet vievät energia-alaa. Siihen sisältyvät paitsi politiikat ja toimenpiteet, jotka hallitukset ympäri maailmaa ovat jo ottaneet käyttöön, myös ilmoitetun politiikan todennäköiset vaikutukset, mukaan lukien Pariisin sopimusta koskevat kansallisesti määritellyt panokset.
- The Sustainable Development Scenario, SDS eli ”Kestävän kehityksen skenaario” tarjoaa integroidun strategian tärkeimpien energiaan liittyvien elementtien saavuttamiseksi, mukaan lukien energian saatavuus, ilmanlaatu ja ilmastotavoitteet. Tämän skenaarion mukaan päästöjen määrät ovat yhdenmukaisia Pariisin sopimuksen pitkän aikavälin tavoitteiden saavuttamisen kanssa. Skenaarion mukaan energia-ala etenee nopeammin ottamalla käyttöön vähäpäästöinen tuotanto. Uusiutuvien energialähteiden tekniikat takaavat energian saatavuuden. Kaikkia taloudellisesti toteuttamiskelpoisia tapoja tehokkuuden parantamiseen on realisoitu ja kokonaiskysyntä vuonna 2040 säilyy nykytasolla.



Kuvio 17. Kokonaiskulutuksen vuotuinen kasvu polttoaineen mukaan (vasen) ja sähkön osuus (oikea) New Policies Scenario:ssa (IEA 2018b)

Kehittyvien talouksien osuus tulevasta kysynnästä on suurin, johtuen nopeasta talous- ja väestömäärän kasvusta, uusien tavaroiden ja palvelujen tarpeesta sekä lisääntyvästä pyrkimyksestä kohti sähköistymistä. Jäähdytystarpeiden kasvun odotetaan myös kasvavan, kun kehitysmaiden kotitalouksien ilmastointilaitteiden määrä nousee 600 miljoonasta 2,5 miljardiin yksikköön. Sähköajoneuvojen ja sähköisten vedenlämmittimien käyttö kiihtyy entisestään.

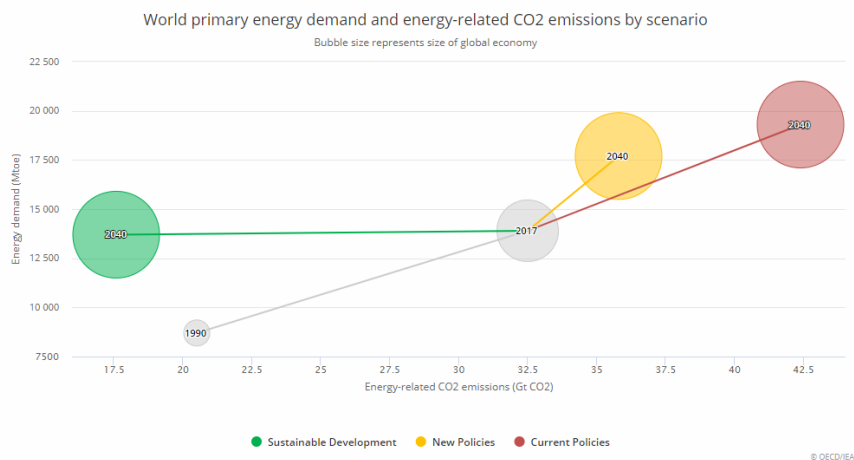
Samaan aikaan kehittyneissä talouksissa sähkön kysynnän kasvu on hitaampaa. Energian tehokas käyttäminen ja sen säästäminen johtavat sähkön kysynnän pysymiseen suhteellisen tasaisena. Esimerkiksi tehokkaammat sähköajoneuvot ja lämpöpumput positiivisesti vaikuttavat sähkön kysynnän alentamiseen. (IEA 2018b.)

Ilmastomuutos. Maailmanlaajuisilla ponnistuksilla ilmastomuutoksen pienentämiseen on merkittävä vaikutus tulevaisuuden energijärjestelmien suunnitteluun. Ilmastomuutos aiheuttaa valtavia taloudellisia ja sosiaalisia seurauksia. IEA:n ”Kestävä kehitys skenaarion” mukaan on toteutettava seuraavat toimenpiteet, jotta saadaan globaalin lämpötilan nousu alle 2°C ja saavutetaan energiaan liittyvistä kasvihuonekaasupäästöjen huippu aika pian, jota seuraa iso lasku (Ks. kuvio 18.):

- energian loppukäytön tehostaminen
- investointeja uusiutuviin energialähteisiin lisääminen

- vähemmän tehokkaiden hiilivoimalaitosten käytöstä poistaminen
- tehostomien fossiilisten polttoaineiden tukien poistaminen
- öljyn ja kaasun tuotannon metaanipäästöjen vähentäminen.

Vaikka nämä toimet eivät yksinään riitä välttämään ilmastonmuutoksen vakavia vaikutuksia, nämä toimenpiteet lähes puoleksi auttavat savuttamaan hiilidioksidipäästötavoitteet. Tarvittavien päästövähennysten toisen puolen saavuttaminen edellyttää näiden samojen toimenpiteiden syvempää toteuttamista sekä muiden puhtaan energian tekniikoiden ja CCUS²:n laajentamista.



Kuvio 18. Maailman primaarienergian kysyntä ja CO₂ päästöt eri IEA:n skenaarioiden mukaan (IEA 2018b)

- **Vähenevät polttoaineet:** Fossiilisten polttoaineiden varannot ovat saavuttaneet tai ylittäneet maailmanlaajuisen huipputason. Hinnat ovat olleet viime vuosina epävakaita johtuen pääasiassa vaihtelevasta öljyntuotannosta. Muut fossiilisten polttoaineiden hinnat ovat yleensä seuranneet raakaöljyn maailmanmarkkinahintaa. Fossiilisten polttoaineiden hintojen odotetaan nousevan edelleen, ja näiden polttoaineiden, erityisesti kivihiilen, laatu saattaa heikentyä.
- **Energian saatavuuden epäoikeudenmukaisuus.** Suurilla Intian ja Afrikan väestöillä ei ole pääsyä nykyaikaisiin tai luotettaviin energiapalveluihin tällä hetkellä.

² CCUS – ”Carbon capture, utilisation and storage” hiilen talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi on tärkeä päästöjen vähentämistekniikka, jota voisoin soveltaa teollisuudessa ja sähköntuotannossa.

Samaan aikaan rikkaiden maiden johtajat kovistelevat köyhiä maita ilmastotavoitteiden kiristämiseksi jatkamalla itse fossiilisten polttamista. Mutta kun fossiiliset ovat ”helppoja” energialähteitä kehittyville maille ja ne maat eivät ole ilmastokriisin syyllisiä, ja koska myös näiden maiden asukkailla on sama oikeus riittoisaan energiaan kuin rikkaiden maiden asukkailla, fossiiliset polttoaineet ja päästökiintiöt tulisi säästää mahdollisuuksien mukaan nimenomaan köyhien maiden käytettäväksi, silloin kun rikkaissa maissa löytyy toiset vaihtoehdot polttamiselle.

- Raskasmetallit ja muut päästöt. Fossiilisten polttoaineiden, erityisesti hiilen, palamisessa syntyvät raskasmetalli- ja muut päästöt (SO_x, NO_x, hiukkaset), jotka aiheuttavat sairauksia ja kuoleman tapauksia.
- Energiatuet. G20-maat ovat monesti kommentoineet, että fossiilisten polttoaineiden ja ydinvoiman käyttö on voimakkaasti tuettu, ja tuet vääristävät energiamarkkinoita, mutta ovat kuitenkin tehneet vain vähän tämän ongelman torjumiseksi. Uusiutuvan sähkön tuotanto voisi kasvaa huomattavasti nopeammin maailmanlaajuisesti, jos luodaan tasapuolisemmat toimintaedellytykset.
- Energiajärjestelmän hallinta: Nykyisillä energiajärjestelmillä on pitkät ja monipuoliset arvoketjut, jotka muodostuvat ennen energian käyttöä kaivostoiminta ja louhinta, jalostaminen, kuljetus, varastointi ja esikäsitteily. Ydinenergian tapauksessa on olemassa myös toiminta käytön jälkeen: jätteiden varastointi, kuljettaminen, loppusijoitus ja laitosten käytöstäpoisto. Uusiutuvien energialähteiden tekniikoilla, kuten aurinkosähkön ja tuulienergian arvoketjut ovat paljon lyhyemmät, ja ne voivat edistää hajautetumpia energiajärjestelmiä.
- Energiaturvallisuus: Energian puute tai sen mahdollinen menetys voi häiritä monia elämän osa-alueita. Siksi energiavarmuutta on etsittävä luomalla luotettavia kotimaisia resursseja tai muuntamistekniikoita. Vaihtoehtoisesti toimitusketjut voidaan joutua turvaamaan suhteilla naapureihin. Ulkoisiin paineisiin tai uhkiin kestävän energiajärjestelmän tulisi olla maan tärkeä tavoite.

- Ekologinen jalanjälki. Keskittyminen vain yhteen ympäristökriteeriin, kuten kasvi-huonekaasupäästöihin, auttaa vain vähän sellaisten ongelmien ratkaisemisiin kuin biologisen monimuotoisuuden menetys, kemiallinen ja radioaktiivinen pilaantuminen, makean veden kulutus, maankäytön muutokset ja ilmakehän aerosolikuormitukset. Maailmassa kasvavat energiantarpeet tulisi tyydyttää lisäämättä ekologista jalanjälkeä. (Child 2018, 27 – 29.)

Jotta onnistutaan savuttamaan tulevaisuuden tavoitteita ja vastamaan haasteisiin, monet ilmasto- ja energiastrategiat määrittelevät seuraavat keinot: energiansäästö, energiatehokkuuden kasvattaminen ja uusiutuvien energialähteiden käyttö sekä CCUS.

Vuonna 2011 IPCC:n julkaisussa raportissa “Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN)” on tutkittu 164 skenaariota, jossa arvioidaan uusiutuvien rooli vuonna 2030 ja 2050 (IPCC 2011). Yli 50% skenaarioista uusiutuvilla saimme vuonna 2050 yli 173 EJ /a, joissain tapauksissa jopa yli 400 EJ/a. (Ks. kuvio 19.)

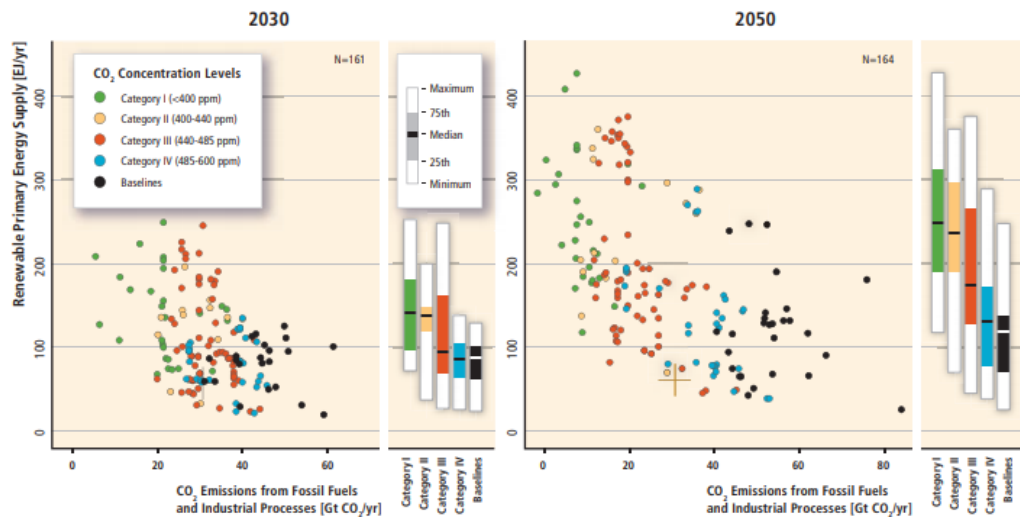


Figure SPM.9 | Global RE primary energy supply (direct equivalent) from 164 long-term scenarios versus fossil and industrial CO₂ emissions in 2030 and 2050. Colour coding is based on categories of atmospheric CO₂ concentration stabilization levels that are defined consistently with those in the AR4. The panels to the right of the scatterplots show the deployment levels of RE in each of the atmospheric CO₂ concentration categories. The thick black line corresponds to the median, the coloured box corresponds to the inter-quartile range (25th to 75th percentile) and the ends of the white surrounding bars correspond to the total range across all reviewed scenarios. The grey crossed lines show the relationship in 2007. [Figure 10.2, 10.2.2.2]

Kuvio 19. Primaarienergian saaminen uusiutuvilla eri skenarioiden mukaan (IPCC 2011)

Koska perinteisen biomassan käyttö vähenee useimmissa skenaarioissa, ennustetaan vastaavasti nousevan uusiutuvien tuotantotason (lukuun ottamatta perinteistä biomassaa) kasvua noin kolminkertaisesta yli kymmenkertaiseksi. Uusiutuvien primäärienergian maailmanlaajuinen osuus eroaa huomattavasti skenaarioiden välillä. Yli puolet skenaarioista osoittaa, että niiden osuus on yli 17% primäärienergian toimituksesta vuonna 2030 ja nousee yli 27%:iin vuonna 2050. Skenaarioissa, joissa uusiutuvien osuus on korkein, saavutetaan noin 43% vuonna 2030 ja 77% vuonna 2050. Eisiis vain uusiutuvista yksinkertaisesti riittää vastamaan maailmaan kysyntään. Kuten kuvasta 19 myös näkyy, emme pysty kaikissa jopa optimistisellä skenaariolla vähentämään hiilidioksidipäästöjä riittävästi ja riittävän nopeasti.

Lisäksi uusiutuvien laajamittaiseen rakentamiseen liittyy tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon vaihtelevuus ja riippuvuus sääolosuhteista, ja ne alkavat kärjistyä, kun aurinko- ja tuulivoimaa on huomattava osuus sähköntuotannosta. Saksassa, Espanjassa kuin Japanissakin on viimeisen vuoden aikana jouduttu hillitsemään aurinkosähkön määrän kasvua, koska sähköverkko ei kykene käyttämään sitä tehokkaasti enempää eikä valtiontalous kestä tukien määrän kasvua.

Jotta vaihtelevuuden ongelma voitaisiin ratkaista, polttamiseen perustuvia voimaloita on pidettävä käytössä. Vaihtoehtoiset tekniikat energian varastointi ja älyverkkojen mahdollistama parempi kysyntäjousto, vaativat vielä paljon kehitystyötä ja aikaa yleistyäkseen. VTT:n Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa selvityksessä on todettu ”hyvin voimakas tukeutuminen vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian käytön lisäämiseen edellyttää tulosten valossa erittäin nopeaa teknistä kehitystä ja energian varastoinnin läpimurtoa, sekä sisältää merkittäviä teknisiä ja taloudellisia epävarmuuksia” (Lehtilä, Koljonen, Airaksinen, Tuominen, Järvi, Laurikko, Similä & Grandell 2014).

Lisäongelmia aiheutuu siitä, että tuuli- ja aurinkovoimalat vanhenevat ja ne on ennen pitkää korvattava uusilla. Tämä tarkoittaa asennusnopeuksien pysyvyyttä tietyllä tasolla, kun halutaan pitää nykyinen sähkötuotannon

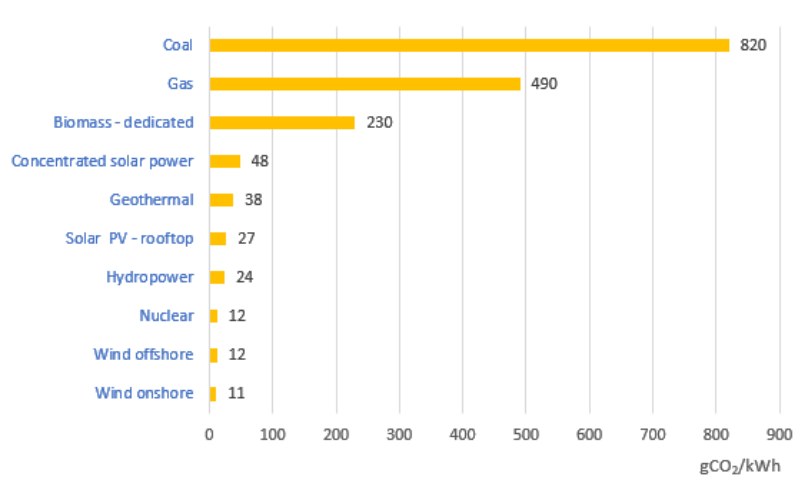
taso ja tuottaa energiaa vain uusiutuvilla, rakennusnopeus on vauhditettava monen kymmenkertaiseksi.

Aurinko ja tuulienergiaa useasti mainostetaan päästöttömänä ja riippumattomana energialähteenä, mutta näiden energialähteiden rakentaminen kumminkin vaatii materiaaleja, joiden tuotanto aiheuttaa ympäristöhaittoja ja joista vain osa voidaan kierrättää.

Tuuli- ja aurinkovoiman hyödyntäminen vaatii suuria rakennelmia suhteessa tuotetun energian määrään. Suuret rakennelmat vaativat paljon sekä perinteisiä materiaaleja (betoni, teräs, lasi), että harvinaisempia metalleja ja mineraaleja. Eräissä tutkimuksissa on todettu, että jos vuonna 2050 tuottaisi puolet sähköstä uusiutuvilla, se vaatisi esimerkiksi lähes kaiken maapallon tunnetun hyödyntämiskelpoisen hopean käyttämistä aurinkopaneeleihin. Lisäksi paneelit sitoisivat reilusti enemmän sekä telluriumia, että indiumia, kuin mitä esiintymissä tiedetään olevan. Teräksen, alumiinin, kuparin sekä betonin tuotantoa olisi lisättävä merkittävästi. Samalla vaurastuvassa maailmassa kaikkien näiden materiaalien kysyntä kasvaa entisestään. Entistä huonolaatuisempien luonnonvarojen esiintymien hyödyntäminen myös kasvattaa merkittävästi metallien tuotantoon tarvittavia energiamääriä. Tässä tutkimuksissa ei huomioitu kyseisten metallien kilpailevia käyttökohteita eikä energian varastointiin ja sen siirtoon tarvittavia materiaaleja. (Korhonen & Partanen 2016, 33-35.)

Hyvin suuri osa "uudesta" uusiutuvasta energiasta on perinteistä energiaa kasvien polttamista ja tarvittavat määrät ovat isoja. WWF:n raportista ilmenee, että vuonna 2050 biovoimoihin ja biodieseljalostamoihin tarvitaan joka vuosi paitsi noin 30 prosenttia enemmän puuta kuin nykyisin maailmassa käytetään kaikkiin tarkoituksiin yhteensä, myös noin 250 miljoonan hehtaarin peltoaloilla viljellyt energiakasvit, jota ei tarvita mihinkään muuhun maailmassa, jossa ihmisten lukumäärä kasvaa ja maanviljely vaikeutuu ilmastomuutoksen myötä. Oletus bioenergian päästöneutraaliudesta on enimmäkseen poliittinen. Tuoreiden tutkimusten mukaan biomassan todellinen päästötase riippuu monista vaikeasti laskettavista tekijöistä. Hyvissä olosuhteissa esi-

merkiksi hake on verraten ilmastoystävällistä, mutta huonommissa olosuhteissa esimerkiksi runkopuun polttaminen on kivihiilen polttoa likaisempaa. IPCC:n nykyinen arviointi bioenergian päästötaseesta on puolet fossiiliset maakaasun taseesta. (Ks. kuvio 20.) Teoriassa biomassaa voidaan polttaa maltillisesti, valikoiden ja ympäristöä säästären, mutta jos biomassan kysyntä kasvaa, käytäntö saattaa osoittautua toiseksi.



Kuvio 20. Eri sähköntoimitustekniikoiden elinkaaren päästötase (IPCC 2014, 1353, muokattu)

Energiansäästö ja energiatehokkuuden parantaminen on tärkeä keino energiajärjestelmän murroksen toteuttamiseen, mutta useasti tutkimuksessa unohdetaan, että energiatehokkuuden parantaminen ei näy täysimääräisesti energian käytön vähenemisenä. Tämä rebound-ilmiö liittyy ihmisten käyttäytymisen muuttamiseen. Kun ihminen tietää, että laite kuluttaa vähemmän energiaa, hän alkaa käyttämään sitä enemmän ja pitempään. Toinen vaihtoehto, joka ilmaantuu, kun säästöllä vapautuneita varoja kuluttaja käyttää muihin energiaa kuluttaviin laitteisiin lisäämällä edelleen energiakäyttöä. Kolmantena esimerkkinä voi mainita, vaikka astianpesukoneiden leviäminen Euroopassa. Ensimmäiset pesukoneet säästivät aikaa, mutta kuluttivat paljon vettä ja sähköenergiaa. Teknologian parantuessa astianpesukoneiden resurssien, etenkin veden kulutus laski niin paljon, että johti tällaisten laitteiden valtavaan kysyntään. Seurauksena on, että astianpesukoneiden veden ja sähkön kokonaiskulutus on lisääntynyt huomattavasti. Rebound-ilmiö näkyy myös, kun valtiot

tarjoavat ohjelmat energiatehokkaiden laitteiden käytön tukemiseksi ja edistämiseksi. Esimerkiksi jossain maissa vanhojen jääkaappien korvaaminen johti siihen, että osa väestöstä osti uusia energiatehokkaita jääkaappeja, joiden tilavuus oli suurempi kuin niiden päivittäiset tarpeet. Rebound- ilmiön suuruutta arvioidaan eri tavalla. Euroopan komission mukaan vaikutusta on 10–80 prosenttia toteutettaessa yleisimpiä energiansäästötoimenpiteitä. Isommat prosentit liittyvät liikenteen alaan (ensisijaisesti autojen korvaamiseen). Ilmiö on tarpeen ottaa huomioon energiansäästöä koskevassa ohjelmassa, kun kehitetään kannustustoimenpiteitä ja valtion tukea, analysoidaan todellisia energiankulutuksen indikaattoreita ja niiden muutoksen dynamiikkaa. (Korhonen & Partanen 2016, 61-65.)

CCUS on ehdotettu maailmalle vaihtoehtona hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Tähän mennessä hiilen talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi on todistamaton ja epävarma pitkäaikaisena ratkaisuna. CCUS:lla periaatteessa voi vain pidentää fossiilisten polttoaineiden ja niihin liittyvien kasvihuonekaasupäästöjen aikakautta. Hiilidioksidin erottamisen voimalaitoksen savukaasuista tekee ongelmalliseksi käsiteltävien kaasujen suuri määrä ja hiilidioksidin pieni pitoisuus savukaasuissa. Erottaminen vaatii nykytekniikoilla paljon energiaa ja pienentää siten saatavaa hyötyenergiaa. Erottamisen lisäksi ratkaistavana on myös loppuvarastoinnin menetelmiin liittyviä teknisiä ja pitkäaikaisvarastoinnin turvallisuuteen liittyviä haasteita. Keskeinen kysymys hiilidioksidin talteenotossa ja varastoinnissa on varastoidun hiilidioksidin vuoto-mahdollisuus, vuodon suuruus ja seuraukset.

Kaikilla näillä ehdotetuilla keinoilla on omat plus- ja miinuspuolensa, ne toki auttavat pääsemään tavoitteisiin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, mutta eivät ole todennäköisesti riittäviä. Kun yli 80 % maailman energiasta toteutetaan fossiilisilla, niitä pystytään korvamaan vain, jos kaikki olemassa olevat hiilettömät ja vähäpäästöiset menetelmät hyödynnetään. Ydinvoima voisi olla yksi niistä. Sen mahdollisuudet ja haasteet nykyisessä energianmurroksessa kuvataan seuraavassa osassa.

6 Ydinvoiman rooli energiatuotannossa

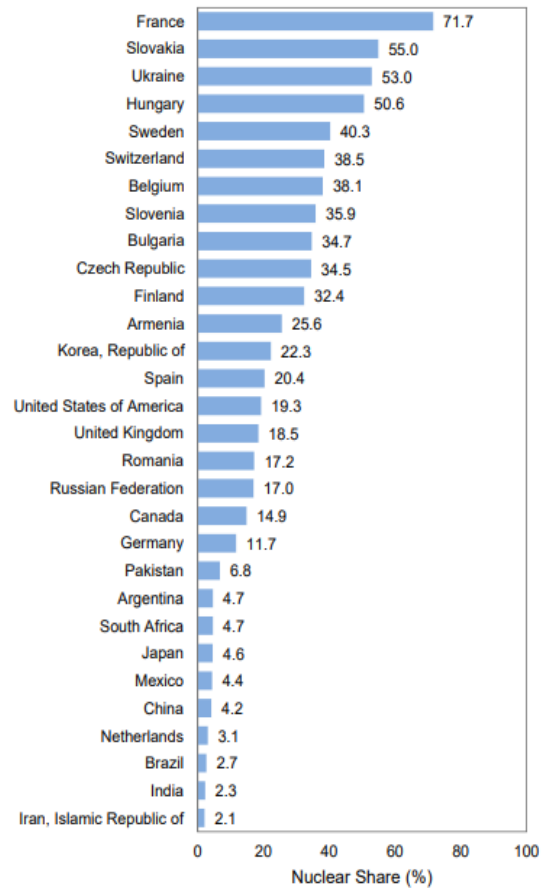
450 toiminnallista ydinvoimareaktoria kokonaisnettokapasiteettina 396 GW (electrical) oli vuoden 2018 lopussa. Lisäksi oltiin rakentamassa 55 lisäyksikköä, joiden kokonaiskapasiteetti oli 57 GW (e). Vuoden aikana verkkoon liitettiin yhdeksän uutta ydinvoimareaktoria, joiden kokonaiskapasiteetti oli 10 358 MW (e), (7 Kiinassa ja 2 Venäjällä) ja seitsemän reaktoria, joiden kokonaiskapasiteetti oli 5424 MW (e), poistettiin käytöstä (1 Kiinassa, 4 Japanissa, 1 Venäjällä, 1 Yhdysvalloissa).

Toimivista reaktoreista 82,2% on kevytvesireaktoreita, 10,9% raskasvesireaktoreita, 3,1% kevytvesijäähdytteisiä ja grafiittimoderoituja, 3,1% kaasujäähdytteisiä reaktoreita ja kolme on nestemäisellä metallilla jäähdytettyjä nopeita reaktoreita. Lähes 89% ydinvoimalla tuotetusta sähköstä tuotettiin 376 kevytvesireaktorilla.

Vuonna 2018 aloitettiin rakentamaan viisi uutta yksikköä, joiden odotetaan lisäävän kokonaiskapasiteettia 6339 MW (e). Ydinvoiman osuus sähkön kokonaistuotannosta vuonna 2018 oli noin 10%.



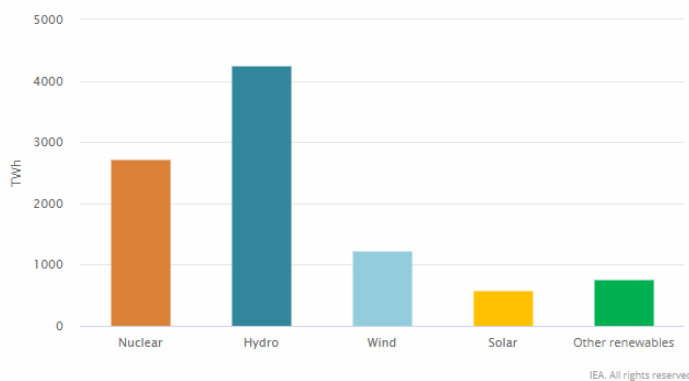
Note: The nuclear electricity production in Taiwan, China, was 26.7 TW·h.



Note: The share of nuclear in the total electricity production of Taiwan, China, was 10.2%.

Kuvio 21. Maailman sähköntuotanto ydinvoimalla vuonna 2018 ja sen osuus glbaalissa sähkötuotannossa (IAEA 2019a)

Ydinvoima on nykyisin toiseksi suurin vähähiilisen sähkön lähde. (Ks. kuvio 22.)

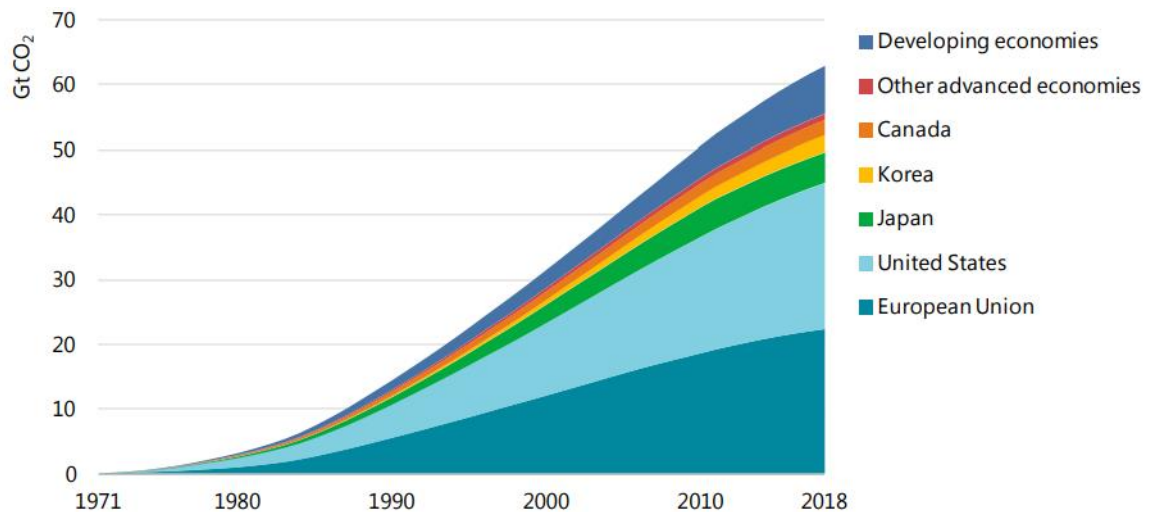


IEA. All rights reserved.

Kuvio 22. Globaali vähähiilinen sähköntuotanto lähteittäin, 2018 (IEA 2019c, 8)

Ydinvoimalla on suurempi merkitys kehittyneissä talouksissa, joissa se muodostaa 18 prosenttia kokonaistuotannosta. Vuonna 2018 yli puolet Ranskan, Slovakian ja Unkarin energiamäärästä on saatu ydinvoimalla. Euroopan unionissa 25 prosenttia sähköstä on tuotettu ydinreaktoreilla, Koreassa ja Yhdysvalloissa noin viidennes osa. Japanissa ydinvoiman osuus sähköntuotannossa on ollut noin 5% vuonna 2018. Ennen Fukushima Daiichin onnettomuutta vuonna 2011 se oli ollut tasavertaisessa asemassa hiilen ja kaasun kanssa noin 30%. Ydinvoima menettää osuutta kuitenkin nopeasti, vaikka yli 10 GW uutta ydinkapasiteettia kytkettiin maailmanlaajuisesti sähköverkkoihin vuonna 2018 ja se oli isoin kasvu vuodesta 1990 (lisäykset Kiinassa ja Venäjällä).

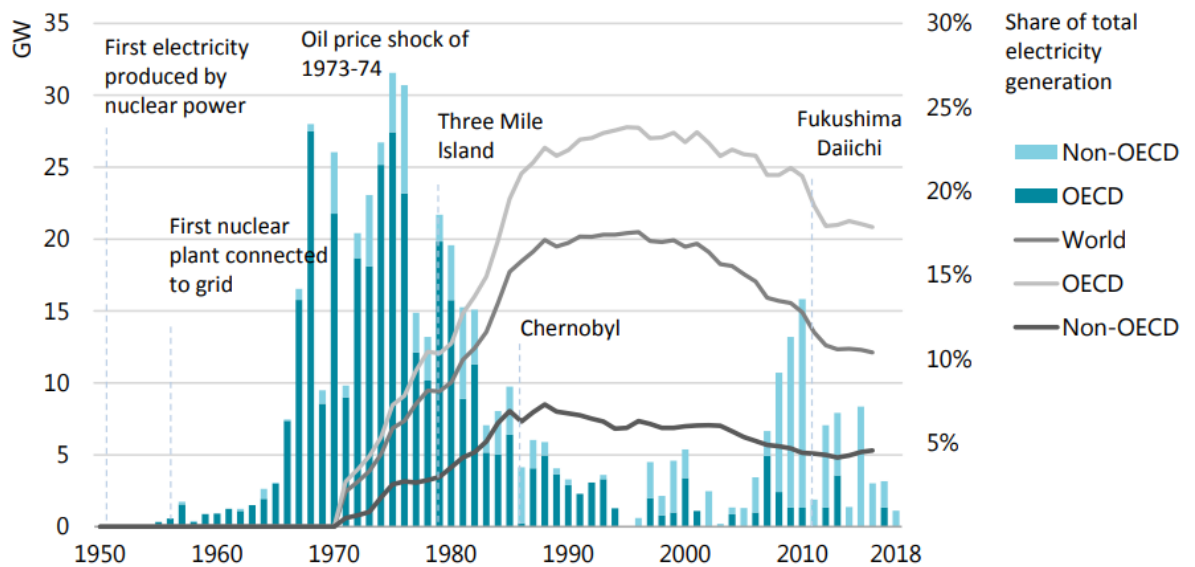
Ydinvoima on auttanut hidastamaan hiilidioksidipäästöjen pitkäaikaista kasvua viimeisen puolen vuosisadan aikana, etenkin kehittyneissä talouksissa. Maailmanlaajuisesti ydinvoiman tuotannolla vältettiin 63 gigatonnia hiilidioksidia (GtCO₂) vuosina 1971-2018. (Ks. kuvio 23). Ilman ydinvoimaa sähköntuotannon päästöt olisivat olleet lähes 20 % suurempia ja energiaan liittyvät kokonaispäästöt 6 prosenttia suurempia kyseisenä ajanjaksona.



IEA (2019). All rights reserved.

Kuvio 23. Kumulatiiviset hiilidioksidipäästöt, joita ydinvoiman käyttö auttanut välttämään tähän mennessä (IEA 2019c, 9)

Uusien ydinreaktorien käyttöönotto on hidastunut kehittyneissä talouksissa viime vuosina, näin olleen maailman ydinreaktorikannan keski-ikä on noussut, huolimatta kapasiteetin lisääntymisestä kehitysmaissa. Suurin osa kehittyneissä talouksissa toimivista ydinvoimaloista rakennettiin 1970- ja 1980-luvuilla. Ennen siitä lähes 80% sähköstä tuotettiin hiilestä, öljystä, kaasusta ja vesivoimalla. Huippuvuosina 1974–1975 lisättiin yli 30 GW vuodessa ja se vastaa melkein 3,5 % tuolloin kokonaisvaltaisesta maailman sähkön tarpeesta. Tämä rakennusaalto johti ydinenergian osuuden nousuun sähköntuotannossa 1990-luvun puoliväliin mennessä 18 prosenttiin maailmanlaajuisesti. (Ks. kuvio 24.)

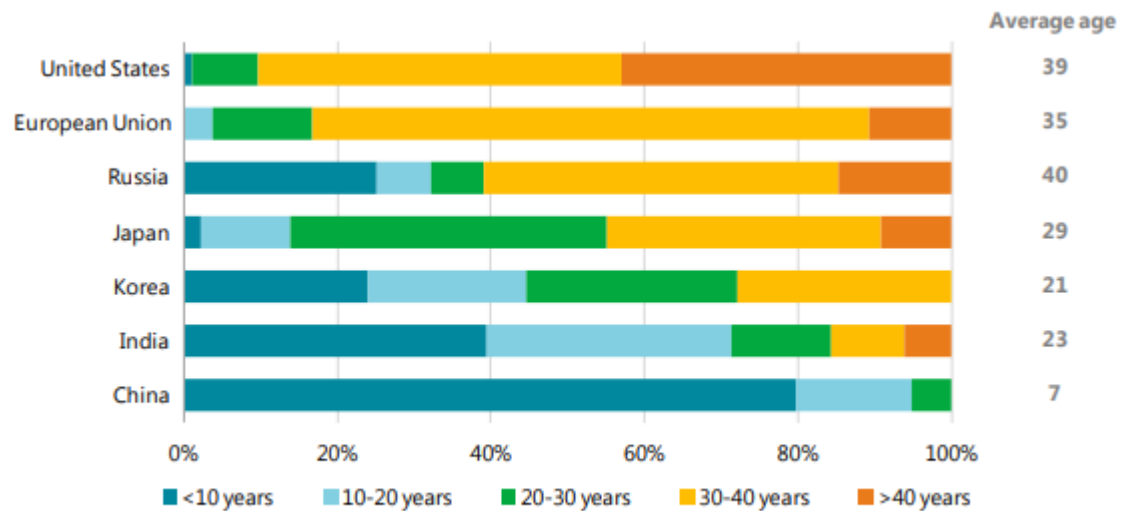


Note: OECD = Organisation for Economic Co-operation and Development.

Sources: IAEA (2019), Power Reactor Information System (PRIS) (database); IEA (2018a), Electricity Information 2018 (database).

Kuvio 24. Reaktoreiden käyttöönotto ja ydinvoiman osuus koko sähköntuotannosta (IEA 2019c, 9)

Uusien ydinvoimalaitosten rakentaminen on hidastunut 1980-luvulta lähtien. Sitten rakentaminen on piristynyt, ja suurin osa uusista hankkeista sijaitsee tällä hetkellä kehitysmaissa, joita johtavat Kiina ja Intia. Ydinvoimakapasiteetin keskimääräinen ikä on maailmanlaajuisesti 32 vuotta. (Ks. kuvio 25.)



Source: IAEA (2019), Power Reactor Information System (PRIS) (database).

Kuvio 25. Ydinvoimakapasiteetin ikäprofiili alueiltaan (IEA 2019c, 11)

Maailman ydinlaivasto ikääntyy myös 1970- ja 1980-luvun suuren rakennusaallon jälkeen. Jos ei jatketa elinikää eikä ryhdytä uusiin hankkeisiin, aiheuttaa se 4 miljardia tonnia hiilidioksidipäästöjä lisää, mikä korostaa ydinlaivaston merkitystä energiamurroksessa vähähiilistä teknologiaa kohti. Ydinlaivasto kehittyneissä talouksissa on kuitenkin keskimäärin 35 vuotta vanha, ja monet laitokset lähestyvät käyttöikänsä loppua, 25% kehittyneiden talouksien nykyisestä ydinkapasiteetista odotetaan sulkeutuvan vuoteen 2025 mennessä.

Viime aikoina ydinvoimaloiden ylläpitäjät ovat investoineet voimaloiden toimintakyvyn parantamiseen ja käyttöiän pidentämiseen. Joissakin tapauksissa tähän on liittynyt myös kapasiteetin lisäämistä. Useiden voimaloiden elinaikaa on jo jatkettu huomattavasti pidemmälle kuin alun perin oli suunniteltu, tällaiset pidennykset (tyypillisesti 50 tai 60 vuoteen) vaativat merkittäviä investointeja avainkomponenttien korvaamiseen ja kunnostamiseen, jotta yksiköt voivat jatkaa turvallista toimintaa. Mutta monissa tapauksissa käyttöiän pidentäminen on taloudellisesti houkutteleva vaihtoehto verrattuna uuden voimalan tai muiden vähähiilisten tekniikoiden rakentamiseen. Investointien määrä vaihtelee huomattavasti reaktorityypin, iän pitenemisen ja sijainnin mukaan. Ydinvoimakapasiteetin 1 GW: n käyttöiän pidentämisen arvioidut

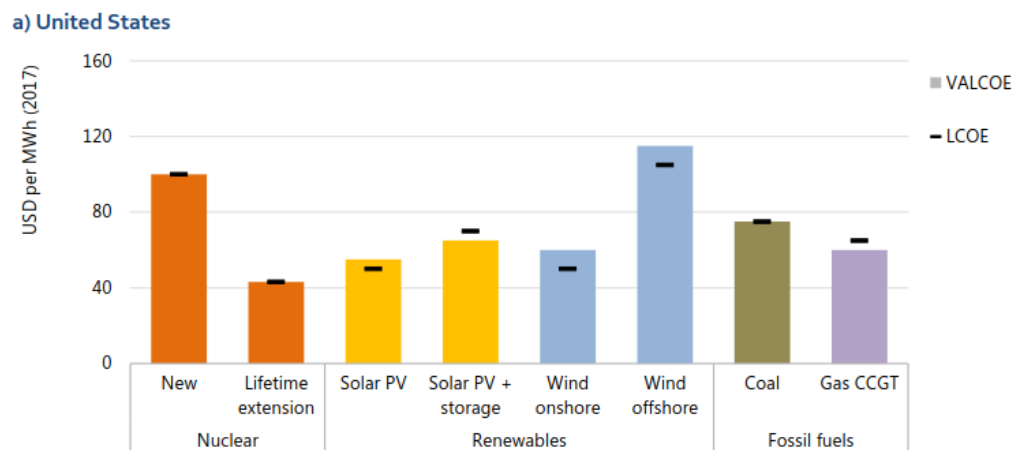
kustannukset ainakin 10 vuodeksi vaihtelevat 500 miljoonasta dollarista hieman yli miljardin dollariin riippuen kohteen nykytilasta.

Vaikeat markkinaolosuhteet ovat kuitenkin esteenä eliniän pidentämisinvestoinneille. Pitkäaikainen alhainen sähkön tukkumyyntihinta kehittyneissä talouksissa on vähentänyt tai poistanut kokonaan monien teknologioiden marginaaleja, ja lisännyt mahdollisuutta ydinvoiman enneaikaiseen sulkemiseen, kun tarvitaan lisäinvestointeja. Näin ollen eliniän pidennysten toteutettavuus riippuu suurelta osin kotimaan markkinoiden olosuhteista.

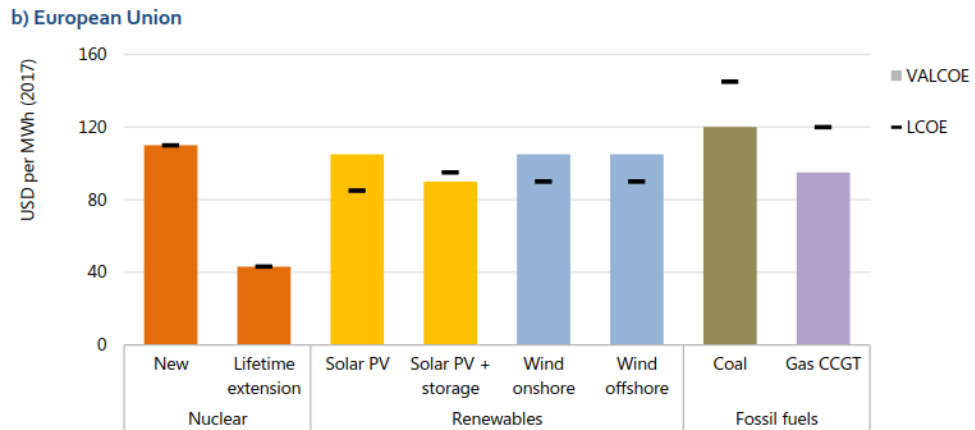
Uusien ydinvoimahankkeiden näkymät ovat edelleen erittäin epävarmat. Jotkut maat ovat päättäneet kieltää investoinnit uusiin hankkeisiin ja asteittain sulkea olemassa olevat voimalat, vaikka tehtaiden sulkemisen aikataulu on joissakin tapauksissa epäselvä. Toiset näkevät ydinvoiman niiden energijärjestelmässään pitkällä aikavälillä. Näille maille kuuluu maailmanlaajuisen sähkön kysynnän ja hiilidioksidipäästöjen suurin osa, mikä voisi viitata myönteiseen asenteeseen ydinvoimalle kyseisissä maissa. Kumminkin ydinvoimainvestointeihin liittyy suuria esteitä, jopa niissä maissa, joissa on säilytetty mahdollisuus kehittää uutta kapasiteettia. Merkittävä este on ydinenergian kyky kilpailla kustannustehokkaasti muiden tuotantoteknologioiden kanssa, etenkin maissa, jotka ovat ottaneet käyttöön kilpailukykyiset tukkumarkkinat. Tämä pahenee sellaisilla energiasektoreilla, joilla ydinvoiman vähähiilistä luonnetta ei tunnusteta eikä otetaan huomioon sen vaikutusta sähköturvallisuuteen ja käytetään mekaniismeja, jotka tukevat investointeja vähähiiliseen tekniikkaan. Jopa silloin, kun sijoittajat ovat vakuuttuneita siitä, että sähkön ja hiilen hinnat tulevat olemaan riittävän korkeat kattamaan uusien ydinprojektien kustannukset, tietyt ydinvoiman teknologiaan kuluvat riskit voivat estää investointeja. Tärkeimmät niistä ovat itse investointien mittakaava ja niihin liittyvät aikataulut, rakennusongelmien, viivästymisen ja kustannusten ylityksen riskit (projektijohtamisriski) sekä mahdolliset tulevaisuuden muutokset politiikassa (politiikan riski) tai itse sähköjärjestelmässä (häiriöiden riski).

Ydinvoimaloiden käyttöiän pidentäminen on kumminkin yksi kustannustehokkaimmista tavoista tuottaa vähähiilisiä sähkönlähteitä vuoteen 2040 saakka. Käyttöiän pidentämisellä saatu sähköhintaa (LCOE) on yleensä välillä 40–60 dollaria / MWh (sijoitus

500 miljoonaa dollaria - 1,1 miljardi dollaria, 10-20 vuoden jatko. (Ks. kuvio 26). Vertailun vuoksi uusien aurinkosähkö- tai tuuliprojektien keskimääräisen LCOE³: n ennustetaan pysyvän yli 50\$/MWh Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Ydinvoimaloiden kilpailukyky paranee, jos otetaan huomioon sen mitä ydinenergia voi tuoda sähköjärjestelmälle joustavuuden ja luotettavuuden varmistamiseksi. Tämä näkökulma on otettu viime vuonna mukaan IEA:n uudessa mittarissa VALCOE, joka antaa eri tuotantomuotojen kilpailukyvyistä täydellisemmän kuvan. (IEA 2019c, 27-28.)



³ Energian tuotantokustannus (LCOE = levelized cost of energy) on energialiiketoiminnan keskeinen tunnusluku, jolla voidaan vertailla eri tuotantomuotojen kannattavuutta. Tuotantokustannusten laskennassa huomioidaan järjestelmän elinkaaren aikaiset investointikustannukset (CAPEX) ja käyttö- ja kunnossapitokustannukset (OPEX). Näitä kustannuksia ovat esimerkiksi rakentamiseen liittyvät kustannukset, polttoaine-, käyttö ja ylläpitokustannukset, verot, vakuutukset ja tuet.



IEA (2019). All rights reserved

Notes: VALCOE = value-adjusted levelized cost of electricity; LCOE = levelized cost of electricity; PV = photovoltaics; coal = coal supercritical; CCGT = combined-cycle gas turbines. Nuclear lifetime extension LCOE is based on 1.1 billion USD investment to extend operations for 20 years. Storage paired with solar PV is scaled to 20% of the solar capacity and 4-hours duration. LCOEs are calculated based on an 8% weighted-average cost of capital for all technologies. Other cost assumptions are from the World Energy Outlook 2018 and are available at <https://www.iea.org/weo/weomodel/>.

Kuvio 26. Vertailu ydinvoiman käyttöön pidentämisen muihin teknologioihin (IEA 2019c, 28)

Uusien ydinvoimalaitosten kilpailukyky on huonompi. Ydinvoiman korkeat pääomakustannukset tekevät siitä huomattavasti kalliimman, kuin esimerkiksi tuulivoima tai kaasulaitos. Vuoteen 2040 mennessä Yhdysvalloissa uuden ydinvoiman LCOE:n ennustetaan olevan noin 100 dollaria / MWh, kaksinkertainen aurinkoenergiaan ja tuulen hintaan verrattuna. Euroopan unionissa hintaero on pienempi: ydinvoiman LCOE on keskimäärin noin 110 dollaria / MWh ja tuuli- ja aurinkoenergian 85–90 dollaria / MWh. (IEA 2019c, 29.)

Sähkösektorin markkinaolosuhteet ovat muuttuneet huomattavasti viime vuosina ja vaikuttaneet ydinvoiman kilpailukykyyn ja myyntihintoihin. Investointien lisääminen tuuli- ja aurinkosähkön tuotantoon, joiden muuttuvat toimintakustannukset ovat lähellä nollaa, ja hallitusten voimakkaat tuet ovat olleet avainasemassa uusiutuvien kasvussa. Niiden kasvu johtuu tuotannon siirtämisestä perinteisistä luonnonvaroista, joilla on korkeammat polttoainekustannukset, ja markkinahinnan alentamiseen milloin tahansa, kun uusiutuvat ovat saatavilla. Joillakin markkinoilla, kuten Pohjois-Amerikan, maakaasun hintojen laskulla viimeisen vuosikymmenen aikana on ollut myös merkittävä vaikutus sähköhintoihin.

Nämä hintoihin vaikuttavat tekijät näyttävät olevan lähitulevaisuudessakin. Lisäksi kansalaisten huolet ikääntyvien ydinreaktorien turvallisuudesta voivat johtaa poliittisiin muutoksiin ja tiukempiin säädöksiin, mikä saattaa tehdä käyttöiän pidentämisen ja uuden voimaloiden rakentamisen taloudellisesti kannattamattomaksi tai jopa mahdottomaksi. Teknologia- ja projektijohtamisriskit lisäävät ydinenergia-alan liittyvää epävarmuutta.

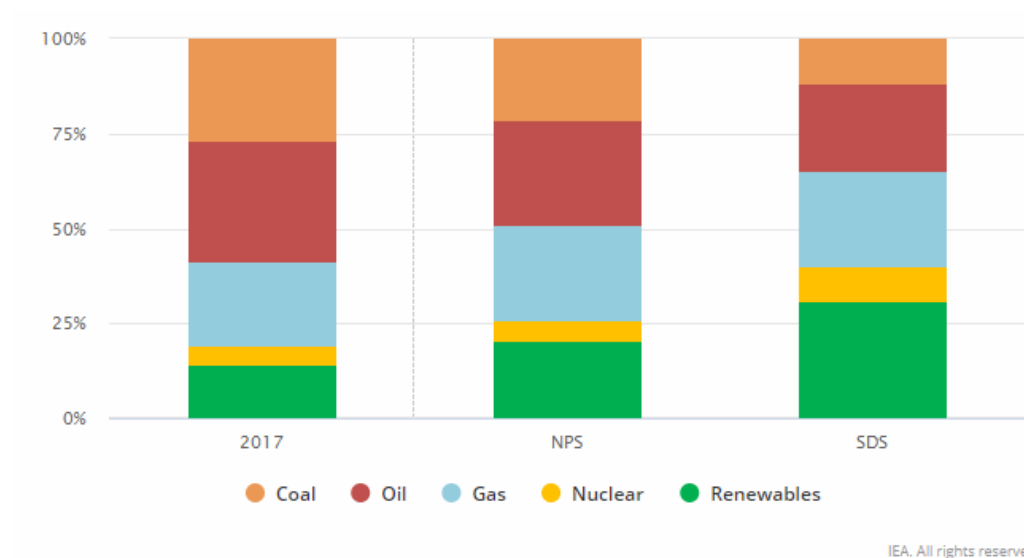
Nämä epävarmuustekijät ovat suuria, mutta vähähiilisen sähkön saatavuus ei ole koskaan ollut niin kiireellinen. Maailman energiajärjestelmän jatkuvan sähköistumisen myötä sähköntuotannon hiilenpoisto on keskeinen asia siirryttäessä puhtaaseen energiaan. Ydinvoimalla voisi olla merkittävä rooli siihen siirtyessä. Jos näin ei ole, riippuvuus muista puhtaan energian muodoista, lähinnä uusiutuvista energialähteistä, kasvaa entisestään. Tämä vaikuttaa sähköjärjestelmän toimintaan, sähkön toimituskustannuksiin ja joustavuuteen, joka tarvitaan järjestelmän toiminnan varmistamiseksi luotettavasti ja tehokkaasti.

Ydinvoimalaitokset edistävät sähkön turvallisuutta monin tavoin. Ydinvoimalat auttavat pitämään sähköverkot vakaina. Tietyssä määrin ne voivat mukauttaa toimintaansa kysynnän ja tarjonnan muutosten seuraamiseksi. Koska muuttuvien uusiutuvien energialähteiden, kuten tuulen ja auringon osuus kasvaa, tällaisten palvelujen tarve kasvaa. Ydinvoimalat voivat auttaa vähentämään uusiutuvien energialähteiden tuotannon kausivaihteluiden vaikutuksia ja lisäämään energiavarmuutta vähentämällä riippuvuutta tuontipolttoaineista.

Nykyaikainen yhteiskunta tarvitsee sähköä 24 tuntia vuorokaudessa. Kulutus vaihtelee päivän ja vuodenajan mukaan, mutta peruskuormatehoa tarvitaan aina. Ydinvoima on hyvä ratkaisu tähän tarkoitukseen. Kulutuksen muutosten hallinta on helpompaa kuin kulutuksen ja tuotannon yhteinen vaihtelun hallinta.

IEA:n The World Energy Outlook 2018 raportin NPS skenaario, joissa otetaan huomioon nykyiset ja suunnitellut politiikat, osoittaa, että ydinvoimalla on edelleen tärkeä rooli maailman energiantarpeiden täyttämiseksi (IEA 2018b). Ydinvoiman tuotanto

kasvaa 1,5% vuodessa vuosien 2018 ja 2040 välillä, vaikka sen osuus kokonaistuotannosta laskee hieman, 10 prosentista 9 prosenttiin. SDS skenaariossa, joka ottaa huomioon ilman saastumisen vaikutuksen, energian saatavuuden kaikille ja Pariisin sopimuksen tavoitteen alle 2 ° C maailman keskilämpötilan nousun, ydinvoiman merkitys on paljon tärkeämpi. Siinä skenaariossa ydinvoiman kasvu on 2,8% 2018 vuodesta vuoteen 2040 saakka, ja sen osuus kokonaistuotannossa tulee olemaan 13%. (Ks. kuvio 27.)



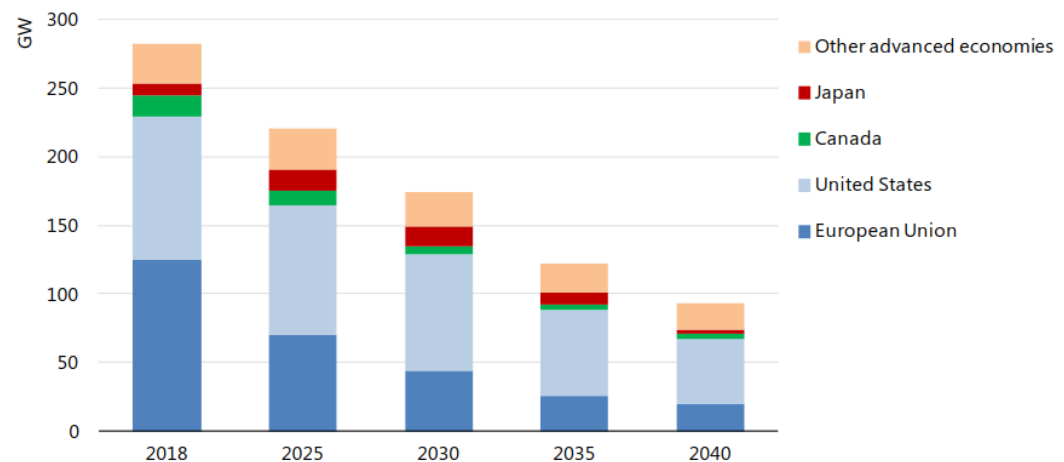
Kuvio 27. Primäärienergia vuosina 2017 ja 2040 NPS:n ja SDS: n skenaarioiden mukaan (IEA. 2018b)

Kumpikaan tulos ei ole taattu. Ei ole varmaa, että jopa jo poliittisesti sovitut seikat toteutuvat, ja näin ydinvoiman tuotanto voi jäädä ennustetun tason alle, etenkin investointiesteiden vuoksi kehittyneissä talouksissa. Vielä vähemmän varmaa on, että Kestävän kehityksen skenaariossa esitetyt tavoitteet saavutetaan, koska ne edellyttävät politiikan tuen huomattavaa lisäämistä.

IEA:n toukokuussa 2019 ilmestyneessä raportissa ”Nuclear Power in a Clean Energy System” on arvioitu energia-alan kehitystä NPS ja SDS skenaariossa tulevana vuosikymmeninä ilman lisäinvestointeja ydinenergian elinajan pidentämiseen tai uusiin hankkeisiin.

Tutkittavissa tapauksissa kehittyneissä talouksissa toimiva ydinkapasiteetti vähenisi kahdella kolmasosalla vuoteen 2040 mennessä, noin 280 GW:sta vuonna 2018, hieman yli 90 GW:iin vuonna 2040. Euroopan unionissa ydinenergian osuus laskisi 4 prosenttiin, Yhdysvalloissa – 8%, Japanissa 2 prosenttiin. (Ks. kuvio 28.) (IEA 2019c, 50.)

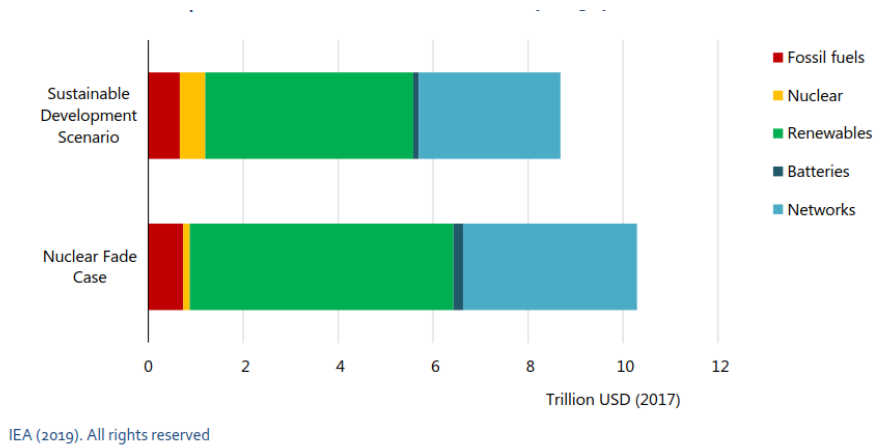
Ydinvoiman poistuminen energiamarkkinoilta toisi sähköturvallisuusongelmat, koska kaasukapasiteetilla olisi tulossa entistä keskeisempi rooli huipputarpeen tyydyttämisessä. Kumulatiiviset hiilidioksidipäästöt nousisivat 4 miljardilla tonnilla vuoteen 2040 mennessä. Tuulen ja aurinkoenergian kapasiteetti on lisääntynyt viimeisen 20 vuoden aikana kehittyneissä talouksissa noin 580 GW. Mutta seuraavan 20 vuoden aikana on rakennettava uusiutuvia lähes viisinkertainen määrä ydinvoiman vähentymisen korvaamiseksi. Tuuli- ja aurinkoenergian projektin etenemisessä lisäksi on poistettava useita markkinoiden ulkopuolisia esteitä, kuten esimerkiksi hankkeiden sosiaalinen hyväksyminen. Ydinvoima puolestaan voi auttaa lieventämään uusiutuvien energialähteiden integroinnin teknisiä vaikeuksia ja alentamaan sähköjärjestelmän muuttamisen kustannuksia.



IEA (2019). All rights reserved

Kuvio 28. Käyttöydinvoimakapasiteetti kehittyneissä talouksissa ydinvoiman häivyttämistapauksessa (IEA 2019c, 50)

Puhtaaseen energiaan siirtyminen ilman ydinvoimaa tulee vaikeammaksi ja kalliimmaksi. Vaikka viime aikoina tuuli- ja aurinkoenergian kustannukset ovat laskeneet, uusiutuvien kapasiteetin lisääminen ja sähköverkon uudistaminen vaativat huomattavasti enemmän pääomainvestointeja kuin nykyisten ydinreaktorien käyttöiän pidentäminen. (Ks. kuvio 28.) Kaasun ja mahdollisesti hiilen käyttö tulee lisääntymään. Korkeampien investointikustannusten ja fossiilisten polttoaineiden käytön yhdistelmä johtaa sähköntoimituksen kokonaiskustannusten nousuun, joka vaikuttaa kuluttajien maksamaan sähköhintaan.



Kuvio 29. Kumulatiiviset sähkösektorin investoinnit kehittyneisissä talouksissa SDS skenaariossa ja ydinvoiman käytön laskiessa v. 2019–40 (IEA 2019c, 65)

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvaan sähköntuotannon siirtymisessä kannattaa ottaa myös huomioon se, että tuuli- ja aurinkovoimalaitokset vievät suurempia pinta-aloja kuin ydinvoimalat, mikä voi aiheuttaa rajoituksia sijoittelulle. Lisäksi tuuli- ja aurinkoenergian kapasiteettikertoimet ovat paljon pienemmät kuin ydinvoiman, tämä lisää tehokkuuden ja joustavuuden tarvetta sähköjärjestelmässä tuulen ja aurinkoenergian osuuden kasvaessa. Epätasainen uusiutuvan energian tuotanto tarvitsee varastointia, joka lisää markkinoiden monimutkaisuutta.

Niiden maiden, jotka päättivät käyttää ydinvoimaa, on uudistettava politiikkaansa tasapuolisen kilpailun varmistamiseksi ja poistettava esteitä, jotka liittyvät esimerkiksi

käyttöään pidentämisen investointeihin. Investointien turvaaminen uusiin ydinvoimaloihin edellyttäisi poliittista puuttumista hankkeiden korkeiden kustannuksien takia. Investointipolitiikan pitää sisältää pitkäaikaisia sopimuksia, hintatakauksia ja suoria valtioiden investointeja.

Lisäksi valtioiden pitää edistää tutkimusta ja kehitystä alalla. Tarvittavien taitojen ja asiantuntemuksen ydinteknologian piirissä on ylläpidettävä. Vähäinen ydinvoimaloiden käyttöönotto kehittyneissä talouksissa viime vuosina tarkoittaa, että on vaara menettää inhimillinen pääoma ja tekninen tietotaito. Reaktorimallien standardisointi olisi myös hyvä ja tärkeä ratkaisu esimerkiksi pienreaktoreiden osalta.

6.1 Ydinvoima Euroopassa

Tällä hetkellä uudet ydinvoimalaitokset rakennetaan Ranskassa, Suomessa ja Slovakiassa. Iso-Britanniassa japanilaiset teknologiajätit Hitachi ja Toshiba ovat hiljattain panneet miljardien ydinvoimahankkeet jäihin taloudellisen epävarmuuden takia (Simon 2019). The Guardian lehden mukaan yksityiset sijoittajat karttavat monimutkaisia ja turvallisuusjärjestelmiltään kalliita hankkeita, vaikka Britannian hallitus on tarjonnut korkeaa takuuhintaa tuotetulle sähkölle vuosikymmenien ajaksi (Vaughan 2019). Pääomakustannukset, eli esimerkiksi rakennusaikaisten lainojen korot, ovat ydinvoimahankkeiden isoimpia menoeriä. Mitä isompi riski, sitä kalliimpaa lainaraha on.

Viime aikoina Euroopan näkemykset ydinalasta kuminkin ovat muutamassa. IPCC:n “Global Warming of 1.5 °C”⁴ raportin pohjana marraskuussa 2018 Euroopan komission pitkän aikavälin ilmastopolitiikkaa käsittelevässä tiedonannossa on arvioitu, että uusiutuvista energialähteistä ja ydinenergiasta muodostuu Euroopan hiilettömän energijärjestelmän tukipilari vuoteen 2050 mennessä (Euroopan Komissio 2018, 10).

⁴ IPCC:n “Global Warming of 1.5 °C” lokakuussa 2018 julkaisemassa erityisraportissa oli mallinnettu energijärjestelmien globaalit reitit, jotka rajoittavat ilmaston lämpenemisen lämpötilaan 1,5 ° C. Nämä reitit tyydyttävät tyypillisesti energian kysynnän alhaisemmalla energiankäytön tasolla, jos parannetaan energiatehokkuutta, ja näyttävät nopeampaa sähköistymistä verrattuna 2 ° C: sen ilmaston lämpenemiseen. 1,5 ° C: n reiteillä, uusiutuvien energialähteiden odotetaan toimittavan 70–85% sähköstä vuonna 2050. Useimmat reitit näyttävät sekä ydinpoltoaineiden käytön kasvua sähköntuotannossa että fossiilisten polttoaineiden käyttöä hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla. Kaikilla mallinnetuilla reiteillä hiilien käyttö laskee lähes nollaan. (IPCC 2018.)

Komissio nostaa siis ydinvoiman takaisin EU:n ilmasto- ja energiapolitiikan keskustelujen keskiöön. Komission vision mukaan uusiutuva tuotanto, erityisesti tuuli- ja aurinkovoima, kasvaisivat rajusti kattaen jo 80 prosenttia EU-maiden sähkön tarpeesta vuosisadan puolivälissä. Yksin uusiutuvilla ei kuitenkaan näillä näkymin pärjätä. Ydinvoiman osuus on komission visiossa 15 prosenttia nykyisen neljänneksen sijaan. Pu-dotuksesta huolimatta linjaus tarkoittaisi ydinvoiman lisärakentamista, koska EU-maiden nykyiset 126 ydinvoimalaa poistuvat pitkälti käytöstä ennen vuotta 2050. Komissio arvioi, että uusiin ydinvoimainvestointeihin tarvitaan noin 400 miljardia euroa 2050 mennessä ja nykyisten laitosten käyttöiän pidennykset vaatisivat lisäksi noin 50 miljardin euron panostukset.

Parhaillaan EU:n parlamentti ja komission tekninen asiantuntijaryhmä valmistelevat lakipaketin, joka tunnetaan nimellä kestävän rahoituksen suunnitelma. Tavoitteena on laatia pankkien ja rahoituslaitosten käyttöön eräänlainen ekomerkki. Sen avulla sijoittajat voisivat erottaa nykyistä helpommin ilmaston kannalta hyvät ja huonot investointikohteet toisistaan.

Ekomerkkiä varten EU laatii luokitusta vihreistä sijoituskohteista. Päämääränä on, että rahaa virtaa entistä enemmän fossiilisten polttoaineiden sijaan esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaan. Mutta Euroopan parlamentti sekä komission asettama tekninen asiantuntijaryhmä eivät ole hyväksyneet ydinvoimaa kestävien energiamuotojen luetteloon, mikä on ristiriidassa Euroopan komission vuonna 2018 annetun tietoaannon. Syynä on ydinvoiman korkea-aktiivinen käytetty ydinpolttoaine, eli ydinjäte. Sama kohtalo on myös jätteenpoltolla, hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla.

Valmistuessaan kestävän rahoituksen paketti on suositus. Ydinvoimaa saisi siis jatkossakin rahoittaa ja rakentaa EU-maissa. Ekoleiman ulkopuolelle jääminen tarkoittaisi kuitenkin mainehaittaa ydinvoimalle, mikä voisi säikäyttää osan sijoittajista. Lisäksi viherleima vaikuttaisi todennäköisesti julkisten rahoituslaitosten, kuten Euroopan investointipankin, lainapäätöksiin.

Kestävän rahoituksen lakipaketissa on nyt käynnissä jäsenmaiden yhteisen kannan viimeistely. Neuvottelussa Suomi on esittänyt ratkaisuehdotuksen, jossa ydinvoimaa ei suljeta pois ekomerkin piiristä. Lopullinen päätös tulee jäsenmaiden, komission ja parlamentin välisissä neuvotteluissa ja paketti voi tulla voimaan vuonna 2023. (Koistinen 2019.)

Markkinat ovat vaikeat ydinvoiman kannalta. Samaan aikaan kun ydinvoimarakentaminen on kallistunut, tuuli- ja aurinkovoiman tuotantokustannukset ovat pudonneet nopeasti teknologian kehityksen myötä. Onshore tuulivoimalat on uusien investointien kohdalla halvin tuotantomuoto, ja parhaat hankkeet pärjäävät jo ilman tukia. Uusiutuvien nousu heikentää myös ydinvoiman kannattavuutta, kun esimerkiksi Pohjoismaiden sähkömarkkinoilla lisääntyvä tuulivoima on painanut sähkön tukkuhintoja alaspäin.

Toisaalta EU:n päästökaupan vahvistaminen ja Euroopan komission Puhdas energia kaikille eurooppalaisille -paketti, jossa EU on sopinut energiapolitiittisten puitteidensa kattavasta päivityksestä helpottaakseen siirtymistä fossiilisista polttoaineista puhtaampaan energiaan, helpottavat osaltaan ydinvoiman tilannetta. Päästöoikeuden hinta on noussut selvästi aiemmasta, ja se on nostanut osaltaan sähkön hintaa. Kun sähköntuotanto ydinvoimalla ei aiheuta hiilidioksidipäästöjä, ydinvoimayhtiöiden ei tarvitse ostaa huutokaupasta päästöoikeuksia ja näin ollen ydinvoima hyötyy sähkön kallistumisesta.

Syyskuussa 2019 Saksan hallitus julkisti maan ilmastopakettin uusia keinoja kuten päästökaupan laajentaminen liikenne- ja lämmityspolttoaineisiin. Järjestelmä alkaa matalina veroina polttoaineille ja muuttuu päästökaupaksi. Laajempaa päästökauppaa Saksa ajaa nyt myös koko Eurooppaan. Näin päästökauppa ohjaa lämmityksen ja liikenteen sähköistykseen.

Ydinvoimateollisuuden itsekin on harkittava muutosta. Ensinnäkin laitoshankkeiden suunnittelun on parannettava nykyisestä. Alihankintaketjuja pitää tehostaa kustannusten säästämiseksi ja samalla turvallisuuden parantamiseksi. Laitosten standardisointia ja luvittamista täytyy edistää yhteistyössä teollisuuden, säteilyturvaviranomaisten ja jäsenvaltioiden kanssa. Ydinvoimateollisuus tyytyy nyt enimmäkseen pyörittämään olemassa olevia laitoksia, mutta todennäköisesti on muututtava kohden uusien laitosten suunnittelua ja suunnitelmien toimeenpanoa.

6.2 Ydinvoima Suomessa

Suomen sähköntuotanto lisääntyy Olkiluoto 3 -laitoksen käyttöönotolla, jonka määrä tapahtua vuoden 2020 puolella välissä (Laitostoimittaja päivittää OL3-projektin aikataulua 2019). Laitoksen nimellisteho on 1600 megawattia. Reaktorin käynnistyminen kasvattaa Suomen ydinvoimalaitosten yhteenlaskettua kapasiteettia yli puolella, mikä nostaa ydinsähkön vuosituotannon yli 30 terawattituntiin. Fennovoiman ydinvoimalan olisi suunnitelmien mukaan määrä kytkeä verkkoon vuonna 2028. Reaktorin teho on 1200 MW. Molempien uusien laitosten suunniteltu käyttöikä on 60 vuotta. Valtioneuvosto on myöntänyt Olkiluodon ykkös- ja kakkosreaktoireille käyttöluvat vuoden 2038 loppuun saakka. Loviisan reaktoreiden nykyiset luvat umpeutuvat vuosina 2027 ja 2030, mutta on mahdollista, että Fortum hakee laitostensa käytölle vielä jatkoaikaa. Ydinenergian osuus sähköntuotannosta tulee siis lähivuosina kasvamaan, ja säilymään korkeana pitkälle tulevaisuuteen.

Suomessa fossiililla katetaan hieman alle 20% sähköntuotannosta, eli sen verran on päästövähennyspotentiaalia. TVO:n ja Fennovoiman uudet laitoshankkeet tulevat aikanaan nostamaan ydinsähkön osuuden yli 50%:iin, jolloin muiden tuotantomuotojen suhteelliset osuudet vastaavasti pienenevät. Jos ilmastopoliittiseksi tavoitteeksi asetetaan absoluuttisten päästövähennysten sijaan esimerkiksi tuulivoiman osuuden nostaminen tiettyyn prosenttilukuun, vaarana on se, että tuon tavoitteen saavuttaminen edellyttää fossiilisten polttoaineiden käytön lisäksi myös jo olemassa olevan ydin- tai vesivoimakapasiteetin tai bioenergiantuotannon leikkaamista. Tällaisessa tilanteessa vähäpäästoiset energiamuodot alkavat kilpailla keskenään, jolloin nettohyöty jää nolnaan.

Suomessa ilmastotavoitteet on sidottu kasvihuonekaasupäästöihin, mutta monissa maissa kehitystä mitataan uusiutuvien energiantuotantomuotojen suhteellisella osuudella. Tähän lähestymistapaan liittyy tiettyjä ongelmia, sillä tuuli- tai aurinkoenergian osuuden kasvattaminen ei automaattisesti takaa kasvihuonekaasupäästöjen vähenemistä.

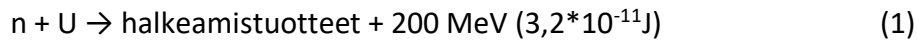
Saksa ilmastonmuutosta ajattelen, on päättänyt edistää kasvattamalla uusiutuvan energiantuotannon osuutta. Tuuli- ja aurinkoenergiaa tukeva politiikka ja ydinvoimaloiden alasajo on luonut monimutkaisen tukijärjestelmän, joka on tullut kuluttajille kalliiksi (Reed 2017) ja sekoittanut maan sähkömarkkinat (Lynch 2016). Vaikka tuuli- ja aurinkoenergiaa on rakennettu paljon, fossiilisilla polttoaineilla katetaan edelleen puolet Saksan energiantuotannosta. Myöskään kasvihuonekaasupäästöt eivät ole käytännössä laskeneet vuodesta 2010, jolloin maan hallitus julkaisi energiakäänteensä ”Energiewende” tunnetun ilmasto-ohjelmansa. Myös vuodelle 2020 asetetusta 40% päästövähennystavoitteesta Saksa on luopunut.

Saksan ilmastopolitiikan epäonnistumisen syy on pohjimmiltaan juuri se, että kasvanut tuuli- ja aurinkoenergiakapasiteetti ei ole korvannut fossiilista energiantuotantoa, vaan poliittisella päätöksellä alas ajettavaa ydinvoimaa.

Suomessa sähköntuotannon puhdistaminen ja uudet jakeluverkkoteknologiat ovat tärkeitä, mutta suurin päästövähennyspotentiaali löytyy myös kaukolämmöntuotannosta, raskaasta teollisuudesta ja liikenteestä. Lämmön muodossa käytettävän energian puhdistamista koskevat suunnitelmat ovat keskittyneet pääasiassa biopolttoaineilla tuotettavaan kaukolämpöön. Hiilen korvaaminen esimerkiksi hakkuujätteillä ei edellytä uusien lämpövoimaloiden rakentamista, tai välttämättä edes suuria muutoksia voimalaitosprosessiin. Kauko- ja teollisuuden prosessilämmön tapauksessa bioenergian rinnalla voidaan myös käyttää ydinvoimaa. Se kuulostaa epätodennäköiseltä, mutta periaatteessa tämä on olemassa oleva teknologia, jolla on maailmalla satojen reaktorivuosien käyttökokemus. (Leppänen 2018a.)

7 Ydinvoiman mahdollisuudet (kehityssuunnat)

Tutkijat saivat ensimmäistä tietoa atomin sisällä tapahtuvista reaktioista 1900-luvun alussa, 1930-luvulla he havaitsivat uraanin ytimen hajoamisen neutronien vaikutuksesta ja ymmärsivät, että vapautui valtavaa energian määrää:



Tämä on lähes 50 miljoonaa kertaa enemmän kuin poltettaessa hiiliatomia:



Vapautuneen energian määrää voidaan ilmaista Albert Einsteinin yhtälöllä:

$$E = mc^2 \quad (3)$$

Atomin halkeamisessa sen massa pienenee Δm ja energia vapautuu:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (4)$$

Tämä energia on todella iso. Esimerkiksi 1 GW ydinvoimalaitoksen yhden vuoden toimintaan, riittää "polttamalla" 1 tonnia uraania. Saman kapasiteetin hiilivoimalan toimittamiseen tarvitaan 3 miljoonaa tonnia hiiltä vuodessa eli kolme junaa päivittäin.

Fissioenergian lisäksi on olemassa myös fuusioenergiaa, joka vapautuu deuterium- ja tritiumytimien fuusion aikana:



Tämä energia on 12 kertaa vähemmän kuin halkeamisenergia (fissio), ja se vapautuu vasta kun ytimien seos lämmitetään lämpötilaan ~ 10 miljoonaa astetta.

Ydinreaktion avulla sähköä verkkoon saatiin ensimmäistä kertaa Neuvostoliiton Obninskin alueella vuonna 1954. Tästä lähtien alkoi ydinreaktorin sukupolvien kehitys.

Ydinvoiman käyttö peruskuormana, sen pieni tarvittava polttoaineen määrä ja vähähiilinen sähkötuotanto ovat toki etuna. Mutta ydinvoima syntyi toisen maailmansodan jälkeen ydinaseiden luomiseen tarkoitetun sotilasalan ohjelman sivutuotteena. Keskustelu kaupallisen ydinvoiman ja ydinaseiden yhteydestä jatkuu edelleen ja aiheuttaa mielenosoituksia ydinenergian käyttöä vastaan. Lisäksi Three Mile Island, Chernobyl ja Fukushima Daiichi voimaloiden suuret onnettomuudet paljastivat niiden turvallisuuteen liittyvät ongelmat ja herätti ihmispelkoa niitä kohti.

Jotta nämä syyt eivät tulisi vaikuttamaan ydinvoiman tulevaisuuteen, pitäisi ratkaista seuraavat ongelmat:

- Nykyaikaiset reaktorit eivät ole riittävästi turvallisia, vaikka niillä on monitasoiset turvajärjestelmät onnettomuuksien estämiseksi. Vakavia onnettomuuksia tapahtuu harvoin, mutta niiden seurausten eliminointi kestää pitkään ja on kallista. On tarpeen luoda sisäisesti turvallinen reaktori, jossa onnettomuudet eivät tapahtuisi fysiikan lakien johdosta, eikä teknisten esteiden takia. Toinen turvallisuuskysymys on riski, että polttoaine pääsee vääriin käsiin, tämä voi todennäköisimmin tapahtua ydinpolttoaineen uudelleenkäsittelyvaiheessa.
- Nykyiset reaktorit käyttävät uraania ^{235}U . Luonnollinen uraani sisältää ^{235}U vain 0,72%, kohtalaisella todennäköisyydellä tunnetut uraanimalmivarannot on tällä hetkellä arvioitu IAEA:n mukaan noin 5,9 miljoonaan tonniin, kun oletetaan uraanin hinnan olevaan alle 130 \$ per kilo. Maailman ydinreaktorit käyttävät vuodessa noin 68000 tonnia uraania, tuolla hinnalla varannot ovat riittäviä yli 80 vuoden tarpeisiin. Nouseva kilohinta kasvattaa varantojen kokoa. Korkeammalla hinnalla saadaan uraania, vaikka maa kuoren uloimmasta 1,6 km kerroksesta tai merivedestä. Eli uraanin tunnetut varat ovat enemmän taloudellinen käsite. Mutta jos nykyisten uraanin harvinaisempaa isotooppia ^{235}U käyttävien kevytvesireaktorien määrä merkittävästi kasvaa ilmastomu-

toksen hillinnän takia, tämä ei ole kestävä vaihtoehto. On tarpeen luoda reaktori, jossa on mahdollista käyttää luonnonuraania tai toriumia. Silloin voidaan sanoa, että ydinvoimavarat ovat todella rajattomat.

- Reaktorin polttoainekierron sulkeminen ratkaisisi monia ydinvoimalan ongelmia
- Ydinvoimalaitosten käytön aikana muodostuu käytetty ydinpolttoaine. Jos siitä tulee uusi polttoaine seuraavan sukupolven reaktorissa, sen status ”ydinjätettä” muuttuu. Jätteen loppusijoituksen kulutkin pienenevät, sillä uudella reaktorilla jätettä on määrällisesti vähemmän.
- Ydinreaktorin rakentaminen on kallista, ydinvoimalaprojektien kulujen alentaminen on tärkeä rooli niiden toteuttamisessa. Mutta on mahdollista, että tulevaisuudessa energiapula korjaa taloudellisten kriteerien merkityksen - jos henkilöä uhkaa tappava tauti, hän on valmis maksamaan rahaa lääkkeestä.

7.1 Neljännen sukupolven reaktoriteknikka

Tähän asti kehitetyt ydinreaktorit luokitellaan käyttötarkoituksen mukaan:

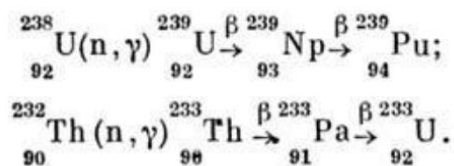
- Tehoreaktorit, joiden tarkoituksena on tuottaa energiaa: sähkö, kaukolämpö, teollisuuden prosessilämpö. Sellaisia reaktoreita käytetään lisäksi sotalaivojen, sukellusveneiden ja jäänmurtajien voimanlähteenä.
- Tutkimusreaktorit, joita käytetään muun muassa reaktorifysiikan, ydinfysiikan ja materiaalfysiikan perustutkimukseen ja soveltavaan tutkimukseen.
- Isotooppituotantoreaktorit, joilla tuotetaan alkuaineiden radioaktiivisia isotooppeja tutkimuksen, lääketieteen ja teollisuuden tarpeisiin. Useita tutkimusreaktoreita voidaan käyttää myös isotooppituotantoon.
- Plutoniumintuottoreaktorit, jotka on tarkoitettu yksinomaan fissiilin plutoniumin tuottamiseen lähinnä ydinaseteollisuuden tarpeisiin. Useimmat erityiset plutoniumintuottoreaktorit on viime aikoina suljettu.

Reaktorifysikaalisten ominaisuuksien mukaan reaktorit luokitellaan termisiin reaktoreihin ja nopeisiin reaktoreihin.

Termisissä reaktoreissa neutronit hidastetaan moderaattorin eli hidastimen avulla termiselle energia-alueelle, jolloin neutronien energia vastaa suunnilleen väliaineen atomien lämpöliikkeen energiaa. Neutronit siis absorboituvat polttoaineeseen ja aiheuttavat fissioita pääosin termisillä energioilla.

Nopeissa reaktoreissa ei ole hidastinta, ja neutronit absorboituvat polttoaineeseen ennen, kuin ne ehtivät menettää törmäyksissä merkittävästi energiaa. Nopeat reaktorit voivat toimia niin sanottuina hyötöreaktoreina, joissa syntyy absorptioreaktioiden kautta enemmän fissiilejä (halkeavia) ytimiä kuin fissioissa kuluu, eli hyötöreaktorin ajatellaan tuottavaan rajattomasti halpaa energiaa ihmiskunnan tarpeisiin. (Eurasto, Hyvärinen, Järvinen, Sandberg & Sjöblom N.d., 41-42.)

Nykyisin nopean neutronispektrin reaktoreiden kehitystä perustellaan polttoaineen hyötämisen lisäksi niiden kyvyllä fissioida tehokkaasti myös parillisen neutroniluvun aktinideja (esim. ^{238}U) (Ks. kuvio 30.). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että reaktorit voivat käyttää polttoaineenaan kevytvesireaktorikierrosta poistuvaa jätettä. Ne voivat myös kierrättää oman polttoaineensa useita kertoja, jolloin korkea-aktiiviseen ydinjätteeseen päätyy vastaavasti vähemmän plutoniumia ja pitkäikäisiä sivuaktinideja (Np, Am, Cm).



Kuvio 30. ^{238}U ja ^{232}Th reaktiot

Tehoreaktoreita luokitellaan moderaattorin ja jäähdytteen mukaan:

- Kevytvesireaktoreissa moderaattorina käytetään tavallista vettä, joka toimii myös jäähdytteenä. Kevytvesireaktoreita on kahta tyyppiä: painevesireaktoreita ja kie-

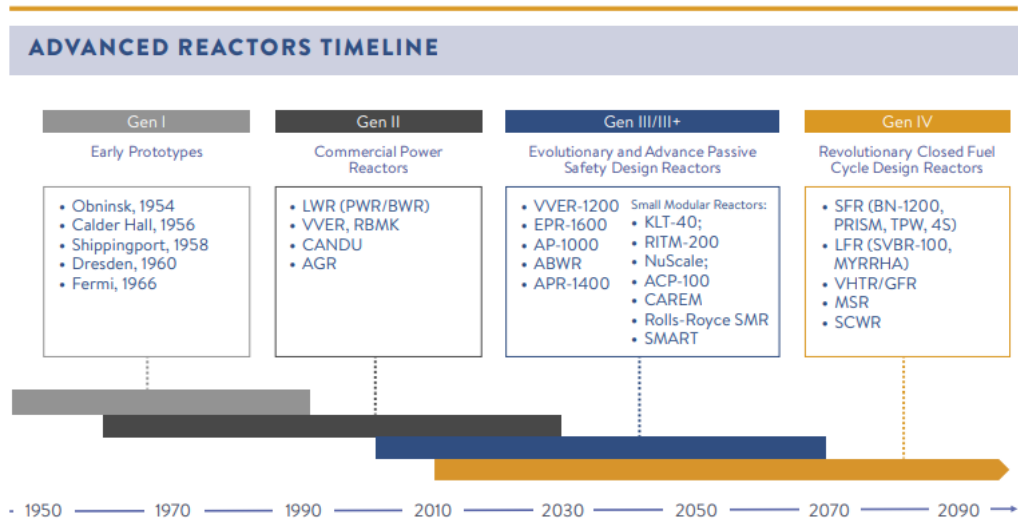
hutusvesireaktoreita. Painevesireaktorissa reaktorisydäntä jäähdyttävän primaari-piirin vesi pidetään niin suurella paineella, että se ei kiehu sydämen läpi virratessaan. Primaariapiiristä lämpö siirretään sekundaariapiiriin erityisissä höyrystimissä, joissa syntyvä höyry johdetaan turbiineille. Kiehutusvesireaktorissa osa jäähdytteenä käytettävästä vedestä höyrystyy reaktorissa ja syntyvä höyry johdetaan suoraan turbiiniin, joten erillisiä höyrystimiä ei tarvita.

- Moderaattorin mukaan voidaan puhua myös grafiittireaktoreista. Niitä ovat esimerkiksi venäläiset vesijäähdytteiset RBMK-reaktorit sekä Englannissa käytössä olevat kaasujäähdytteiset reaktorit.
- Raskasvesireaktoreissa moderaattorina ja primaarijäähdytteenä käytetään raskasta vettä. Yleisin raskasvesireaktori on kanadalainen CANDU.
- Kaasujäähdytteisissä reaktoreissa jäähdytteenä käytetään hiilidioksidia tai heliumia ja sulametallijäähdytteisissä sulaa natriumia tai lyijyvismutti-seosta.

Tehoreaktorit jaetaan lisäksi painesäiliöreaktoreihin ja kanavareaktoreihin (paineputkireaktoreihin). Painesäiliöreaktoreissa koko sydän on suljettu yhtenäiseen suureen painesäiliöön. Kanavareaktoreissa taas on suuri määrä erillisiä rinnakkaisia virtauskanavia, joista kussakin on peräkkäin muutama polttoainenuippu. Käytössä olevat kevytvesireaktoryypit ja kaasujäähdytteiset reaktorit ovat painesäiliöreaktoreita. Kanavareaktoreita ovat venäläinen RBMK ja kanadalainen CANDU. Painesäiliöreaktorit pysäytetään yleensä noin kerran vuodessa polttoaineen vaihtoa varten. Latausvaihe aikana painesäiliö avataan, osa polttoainenuipuista poistetaan ja tilalle ladataan tuoreita polttoainenuippuja. Kanavareaktoreiden polttoainetta voidaan vaihtaa käytön aikana. (Eurasto ym. N.d., 43-44.)

Suurin osa maailmalla kaupallisessa käytössä olevista ydinreaktoreista ovat toisen ja kolmannen sukupolven kevytvesireaktoreita. (Ks. kuvio 31.) Kevytvesireaktoreiden tekniikkaa kehitetään lisäämällä laitosten passiivista turvallisuutta, joka toimii ilman ulkoista käyttövoimaa, ja parannetaan tuotantoprosessien tehokkuutta ja luotettavuutta. Kevytvesireaktortekniikka on osoittanut taloudellista menestystä vuosien

varrella, mutta termiset kevytvesireaktorit kykenevät hyödyntämään uraanin energian sisällöstä vain alle prosentin. Jos polttoaineen varannot alkaa vähentymään ja sen kilohinta nousemaan, polttoaineen käytön tehottomuus tulee estämään ydinalan lisäämistä. Nykyisten reaktoreiden ongelmaksi voidaan mainita myös poistetun ydinpolttoaineen voimakkaan säteilyn kymmeniksi tuhansiksi vuosiksi. Reaktori tuottaa korkeampia aktinideja, joiden pitkäikäisyys tuo haasteita käytetyn polttoaineen loppusijoitusratkaisun suunnitteluun.



Kuvio 31. Ydinreaktoreiden aikajana (World Energy Council 2019, 22)

Nopean neutronispektrin reaktoreita on myös rakennettu ydinenergian 75-vuotisen historian aikana, osa niistä on onnistunut ja osa ei. Tämän reaktorin ketjureaktion käynnistäminen edellyttää sitä, että helposti fissioituvan uraanin tai plutoniumin osuus nostetaan vähintään kymmenen prosenttiin. Nopea reaktori ei siis voi toimia luonnonuraanilla, tai edes matalasti väkevöidyllä kevytvesireaktoripolttoaineella (väkevöinti 3-5%). Toinen reaktoreiden haaste on neutronien hidastuminen törmätesään kevyisiin atomiytimiin, eli esimerkiksi veden käyttöä jäähdyttämiseen sellaisissa reaktoreissa ei onnistu. Nopeiden reaktoreiden tutkimusten alkuvaiheessa jäähdytteeksi oli valikoitu natriumin. Vaikka natrium ei ole erityisen raskas alkuaine, sen vaikutus reaktorin neutronispektriin oli selvästi vettä vähäisempi. (Leppänen 2018b.)

Hyötöreaktorista puhuttaessa pitää mainita se, että polttoainekierto edellyttää kemiallista jälleenkäsittelyprosessia, jossa uuden polttoaineen valmistukseen käytettävä plutonium erotetaan korkea-aktiiviseksi ydinjätteeksi päätyvästä massavirrasta. Jälleenkäsittely tuo mukanaan omat tekniset, taloudelliset ja poliittiset haasteensa.

Lisäksi nopeiden reaktoreiden käyttö ja ylläpito, samaten kuin kevytvesireaktoreiden, on osoittautunut kalliiksi ja haastavaksi, ja pienetkin käyttöhäiriötilanteet ovat usein johtaneet kuukausien tai jopa vuosien mittaisiin huoltoseisokkeihin. Tämä lienee yksi syy siihen, miksi teknologia ei ole edennyt prototyyppiasteelta kaupalliseen käyttöön. Reaktoreilla on myös turvallisuusongelmia, jotka liittyvät fissiotehon hallintaan ja natriumjäähdytteen kemialliseen reaktiivisuuteen. (Leppänen 2018b.)

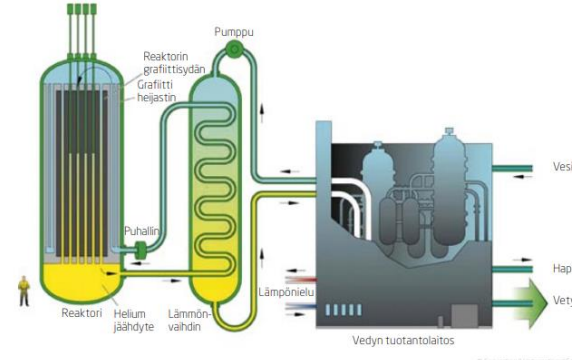
Ydinreaktoreiden seuraavan sukupolven kehittäjät ottavat huomioon edellä mainitut haasteet. Neljännen sukupolven ydinteknologia tulee kattamaan sekä reaktorin itsensä että ydinpolttoaineen käsittelyn (kierrätyksen). Tällaisilla uusilla järjestelmillä olisi parempi suorituskyky pystyäkseen savuttamaan kestävän kehityksen, kilpailukykyyn, turvallisuuden ja luotettavuuden asetetut tavoitteet sekä ydinaseiden leviämisen estämistä. Jotkut niistä tuottavat sähköä, kun taas toiset tuottavat myös lämpöä (lämpötilat 400-900 ° C) käytettäväksi erilaisissa teollisissa tarkoituksissa - petroke- mian teollisuudessa, synteettisten polttoaineiden tuotannossa, biomassan kaasuttamisessa, vedyn tuotannossa vedestä tai sementin valmistuksessa. Alempaa lämpötilaa (100-300 ° C) voidaan käyttää meriveden suolanpoistoon ja lannoitteiden tuotantoon.

Neljännen sukupolven ydinteknologian tavoitteena on kehittää reaktorityyppejä tehostaen samalla uraanin käyttöä ja vähentäen merkittävästi pitkäikäisten isotooppien määrää loppusijoitettavassa ydinjätteessä. Käytännössä tämä tarkoittaa siirtymistä avoimesta suljettuun polttoainekiertoon, missä ydinpolttoaineeseen syntyvät aktinidit erotetaan fissiotuotteista ja käytetään uudelleen energiantuotantoon reaktoreissa. Suljettu polttoainekierto vaatii toimiakseen kehittyneen reaktoritekniikan lisäksi tehokasta jälleenkäsittelyä sekä aktinidien erottelua teollisessa mittakaavassa. Teknologia on kallista ja haastavaa, ja edellyttää laajaa yhteistyötä ydinenergiaa käyttävien maiden välillä.

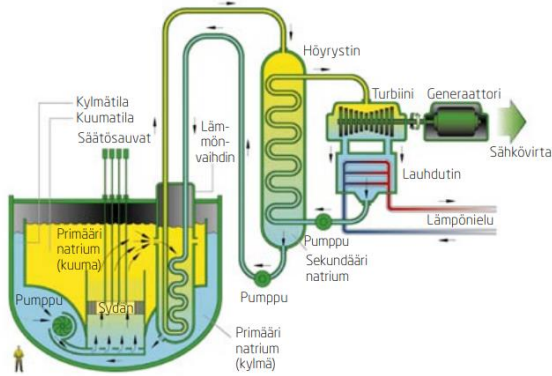
IAEA käynnisti vuonna 2000 kansainvälisen projektin innovatiivisista ydinreaktoreista ja polttoainekiertoista (INPRO). INPRO keskittyy "loppukäyttäjien" innovatiivisten järjestelmien tarpeisiin. Toinen kansainvälinen aloite on vuonna 2001 perustettu kansainvälinen Generation IV International Forum (GIF). GIF projekti on tarkoitettu kansainvälisen tutkimuksen (toimittajien ja kehittäjien) järjestämiseen.

GIF valitsi vuonna 2002 kuusi neljännen sukupolven reaktorityyppiä ehdokkaiksi tarkempaa tutkimusta varten. Kaikki reaktorityypit poikkeavat merkittävästi sekä toisistaan että nykyisistä kevytvesireaktoreista, mutta minkään reaktorityypin ei ole tarkoitus yksinään ratkaista kaikkia ydinenergian käyttöön liittyviä haasteita. Taulukossa 1 on koottu eri reaktorityyppien pääpiirteet.

Taulukko 1. Neljännen sukupolven reaktorityypit (Generation IV Systems N.d., IAEA 2019b, Leppänen N.d.)

	<p>Erittäin korkean lämpötilan reaktori VHTR</p> <ul style="list-style-type: none"> - terminen neutronispektri - polttoaine uraani, lisäksi U–Pu, Pu, MOX, U–Th - jäähdyte helium - grafiittimoderaattori - sähköntuotanto kaasuturbiinilla - soveltuu teollisuusprosessien lämmöntuotantoon, sekä termokemialliseen vedynvalmistukseen - hyötysuhde >50 % - ulostulolämpötila yli 600 - 950 °C - 600 MW - avoin polttoainekierto - passiivinen turvallisuus <p>VHTR:n reaktoritekniikka lähellä nykyisiä HTR-reaktoreita</p> <p>Haasteita:</p> <ul style="list-style-type: none"> - materiaalien kestävyys - yhdistäminen vetytehtaaseen - grafiittimoderaattorin paloturvallisuus
--	---

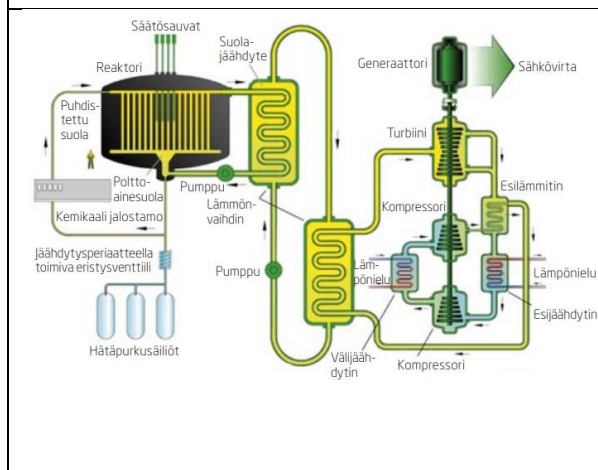
<p>© Generation IV International Forum (GIF)</p>	<p>Kaasujäähdytteinen nopeareaktori GFR</p> <ul style="list-style-type: none"> - jäähdyte helium - polttoaine karbidiyhdiste (U,Pu,MA)C , nitridiyhdiste; MA -minor actinide - suoja-kuorimateriaali piikarbidi SiC - reaktorisäiliön materiaali teräs 9Cr1Mo - lämpötila in 490 °C, out 850°C, paine 90 bar - sähköntuotanto kaasuturbiinilla - hyötysuhde 45 – 48 % - 300 – 600 MW - suljettu polttoainekierto, uuden polttoaineen hyötö - aktinidien polttomahdollisuus, toriumin käyttömahdollisuus <p>Haasteita:</p> <ul style="list-style-type: none"> - materiaalien kestävyys - taloudellisesti järkevä passiivinen jälkilämmönpoistojärjestelmä <p>GFR teknologian demonstraatiolaitos - Allegro</p>
<p>© Generation IV International Forum (GIF)</p>	<p>Ylikriittisessä paineessa toimiva vesijäähdytteinen reaktori (SCWR)</p> <ul style="list-style-type: none"> - nykyisen kevytvesireaktoritekniikan laajennus - terminen ja nopein neutronispektri - polttoaine U - vesijäähdytetty reaktori, jossa paine on nostettu yli kriittisen pisteen (374°C/22,1 MPa) - konsepti on tutkittu kevytvesijäähdytyksenä ja raskasvesijäähdytteisenä - ulostulolämpötila 510 °C, sisääntulolämpötila 280°C, paine 25 MPa - avoin polttoainekierto - ei ole tarvetta lämmönvaihtimelle, kuin painevesilaitoksessa tai vesi- ja höyryfaasien erotusta paineastian sisällä, kuin kiehutusvesireaktorissa - hyötysuhde 44%

	<ul style="list-style-type: none"> - 1700 MW (referenssilaitos) - hyvä taloudellisuus hyötysuhteen ja yksinkertaisen rakenteen ansiosta - Päätehtävä sähköntuotanto <p>Haasteita:</p> <ul style="list-style-type: none"> - rakennemateriaalien kestävyys - korkean toimintalämpötilan ja ylikriittisen veden aiheuttama korroosio - riittämätön moderointi (ylikriittisen veden tiheys on pieni, jäähdytyskierto ei riitä hidastamaan neutroneita)
 <p style="text-align: center; font-size: small;">© Generation IV International Forum (GIF)</p>	<p>Natriumjäähdytteinen nopea reaktori (SFR)</p> <ul style="list-style-type: none"> - nopea neutronispektri - jäähdytteenä sula natrium - polttoaine U- Pu oksidikarbidiseos, MOX - suljettu polttoainekierto, uuden polttoaineen hyötö - teknologiasta käytännön kokemusta (Venäjän BN-300, BN-600, BN-800); tutkimusreaktorit MVIR (Venäjä), FBTR (India); kehitysvaiheessa Ranskan ASTRID - kaksi luokkaa: a) 150-500 MW b) 500-1500 MW - ulostulolämpötila 530 - 550 °C, matala paine ~ 1 atm reaktoriastiassa - päätehtävä sähköntuotanto - aktinidien polttomahdollisuus <p>Haasteita:</p> <ul style="list-style-type: none"> - natriumvuotojen hallinta, -natriumin reaktiivisuus (vesi ja ilman happi) - negatiivisen lämpötilatakasinkytkennän varmistus



Lyijyjäähdytteinen nopea reaktori (LFR)

- nopea neutronispektri
 - suljettu polttoainekierto
 - polttoaine U-Pu oksidi
 - jäähdyte sula lyijy (tai lyijyn ja vismutin seos)
 - lyijy on natriumia raskaampaa, ja sen lämmönsiirto-ominaisuudet mahdollistavat reaktorin jäähdytyksen luonnonkierrolla
 - polttoaineen hyötäminen ja pitkäikäisten aktinidien hävittäminen
 - ulostulolämpötila 550 °C
 - 50-1500 MWe
 - sähköntuotanto ja termokemiallinen vedyn valmistus
 - ei ole käytännön kokemusta, joskin sulaa lyijyä on käytetty termisten sukellusvenereaktoreiden jäähdytteenä.
 - demonstraatiolaitos BREST (Venäjä), ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator) ja MYRRHA Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications (Belgia)
- Haasteita:
- lyijyn korkea sulamispiste (327 °C) -> jäähdytysnesteen pitäminen sulassa tilassa; vismutin lisääminen alentaa tarvittavan lämpötilan sadalla astella
 - reaktorimateriaalien kestävyys korrosiolle
 - pumppujen kestävyys



Sulasuolareaktori (MSR)

- a) - Terminen neutronispektri
- grafiittimoderaattori
 - polttoaine U- Pu/ U-Th fluoridi + Be/ Na fluoridi, nestemäinen polttoaine
 - polttoaine toimii itse omana jäähdytteenä, ja kiertoon voidaan kytkeä kemiallinen jälleenkäsittelyprosessi, joka poistaa suolasta fissiotuotteita
 - suljettu polttoainekierto

	<ul style="list-style-type: none"> - sähkön-, lämmön- ja vedyntuotanto, jossain määrin polttoaineen hyötäminen ja aktinidien poltto - hyötysuhde 44 -50 % -Sisääntulolämpötila 565^oC, ulostulolämpötila yli 700 ^oC (850 ^oC vedyn tuotannolle) - 1000 MW - Matala paine reaktoriastiassa b) - Nopein neutronispektri - polttoaine U, TRU–Th fluoridi, neste-mäinen polttoaine (*TRU – transuraani) - jäähdytteena sula fluoridit - suljettu polttoainekierto - sähkön-, lämmön- ja vedyntuotanto, jossain määrin polttoaineen hyötäminen ja aktinidien poltto - hyötysuhde 44 – 50 % - sisääntulolämpötila 730^oC, ulostulolämpötila yli 800 ^oC - 1300 MW - konsepti MOSART ja MSFR Haasteita: - polttoaine ja fissiotuotteet reaktorin ulkopuolella - kemialliset erotusprosessit - ylläpito - eksoottisin kaikista GEN4-reaktorikonsepteista, erityispiirteinä polttoaineen homogeenisuus ja jatkuva virtaus - täysin erilaiset onnettomuuskenaa-riot.
--	---

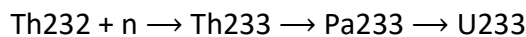
7.2 Torium polttoaineena

Toriumin hyödyntäminen ydinvoimareaktorissa on tutkittu yli 50 vuotta Yhdysvalloissa, Saksassa, Venäjällä, Japanissa ja Kiinassa. Toriumpolttoaineen käyttökokemuksia on kertynyt kevytvesireaktorissa, kaasujäähdytteisissä reaktoreissa ja sulasuolareaktoreissa. Nykyisin erityisesti Intia suunnittelee toriumvarojensa käyttöä, maassa

toimii tällä hetkellä useita koereaktoreita toriumilla. Neljännen sukupolven ydinvoimalaitoksesta puhuttaessa tämä polttoaineena on jälleen kerran noussut aiheeksi.

Maailman toriumvaroja ei ole kartoitettu kovin tarkkaan, sillä toriumille ei ole teollista käyttöä. Yleisen käsityksen mukaan runsaimmat toriumvarat löytyvät Australiasta, Intiasta ja Norjasta sekä Pohjois-Amerikan lisäksi mahdollisesti mm. Turkista ja Brasiliasta. Mielenkiinto toriumia kohtaan alkoi siitä, että koska kyse on maankuorossa kolme kertaa uraania yleisemmästä alkuaineesta, teknologian käyttöönotto poistaisi ydinpolttoaineen riittävyyteen liittyviä huolia.

Toriumilla on useita eri isotooppeja, mutta käytännössä kaikki luonnon torium on isotooppia ^{232}Th ja sen fission todennäköisyys on erittäin pieni. Siksi puhdas torium ei pysty ylläpitämään ketjureaktion kulkua. Todellisuudessa torium fission perustuu uraanin isotooppiin ^{233}U , jota syntyy toriumista peräkkäisten neutronikaappaus- ja beta-hajoamisreaktioiden kautta.



Näin ollen torium voidaan ajatella lähtöaineena, josta fissiiliä polttoainetta valmistetaan. Uraanin isotoopin 233:lla neutronien keskimääräinen nettotuotto on korkeampi kuin ^{235}U :a, joten reaktorissa neutronit voidaan käyttää muuttamaan lisää ^{232}Th -ytimiä ^{233}U :ksi, eli silloin puhutaan uuden polttoaineen tuotosta nopeammin, kuin vanhaa polttoainetta kuluu ja reaktori on näin ollen tyypiltään hyötöreaktori. Toriumiin perustuvan hyötöreaktorikierron etu on se, että se voidaan toteuttaa termisen neutronispektrin reaktoreissa, kun uraanipolttoaineella hyötäminen edellyttää nopean neutronispektrin reaktoreita.

Toriumia ei tarvitse väkevöidä, kun sillä ei ole fissiiliä isotooppia, mutta kaikkiin hyötöreaktorikiertoihin kuuluu säteilytetyn polttoaineen jälleenkäsittely, jossa uuden polttoaineen valmistukseen käytettävä fissiili aines erotetaan jätteeksi menevästä massavirrasta. Jälleenkäsittely edellyttää hankalaa kemiallista prosessia, jossa käsitellään erittäin korkea-aktiivisia aineita nestemäisessä olomuodossa.

Toriumreaktoreissa polttoaineeseen ei synny pitkäikäistä plutoniumia, mutta tulee muita pitkäikäisiä aktinideja. Esimerkiksi uraanin ^{233}U -isotoopin puoliintumisaika on

noin 162000 vuotta, myös käytetyn toriumpolttoaineen radioaktiivisuus jää hyvin pitkäksi aikaa esimerkiksi luonnossa esiintyvää uraanimalmia korkeammalle tasolle.

Toriumpolttoaineella on monia hyviä ominaisuuksia: toriumoksidin lämmönjohtavuus on jonkin verran uraanioksidia parempi, sen sulamispiste on korkeampi, ja materiaali on kemiallisesti stabiilimmassa tilassa. Toriumpolttoaine myös lämpölaajenee ja turpooa fissiokaasujen vaikutuksesta perinteistä uraanipolttoainetta vähemmän. Tämä tarkoittaa sitä, että polttoaine voi kestää paremmin onnettomuustilanteita, ja sitä voidaan säteilyttää reaktorissa pidempään, jolloin myös käyttöastetta mittaava palama saadaan vastaavasti korkeammaksi.

Uraanin fissiili ^{233}U -isotooppi soveltuu todistetusti ydinpommin rakentamiseen, joten toriumreaktorin polttoainekierron kuuluva kemiallinen jälleenkäsittely voidaan pitää erityisenä riskitekijänä. Suljetulla kierrolla ^{233}Pa :sta ja ^{233}U :sta syntyy käytön aikana isotooppia ^{232}U . Osa ^{232}U :n ytimistä lähettää voimakasta gammasäteilyä ja lopputuotteen prosessointi ydinaseeksi soveltuvaan muotoon edellyttää tehokasta säteilysuojauksia ja teknologia ei ole aivan helposti toteutettavissa. Tätä useasti pidetään toriumin ydinaseisiin käyttöä rajoittavana tekijänä. Mutta käytännössä ^{233}U -isotooppiin liittyvät ydinasemateriaalikysymykset nousevat samalla lailla kuin isotoopeilla ^{235}U ja ^{239}Pu . (Leppänen 2018c.)

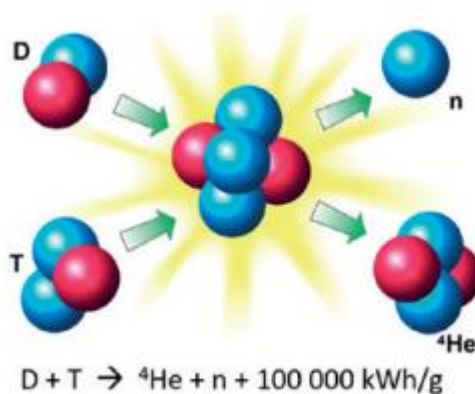
Useasti toriumin hyötöreaktoria, jossa polttoaineeseen syntynyttä fissiiliä isotooppia kierrätetään takaisin reaktoriin, vertaillaan suoraan loppusijoitukseen perustuvan uraanin kevytvesireaktoriin, silloin toriumreaktori on jo lähtökohtaisesti parempi vaihtoehto. Mutta vertailuun oikeastaan pitää ottaa kevytvesireaktorin sijaan nopea hyötöreaktori, jonka polttoainekierto perustuu vastaavasti ^{239}Pu :n kierrätykseen. Tällöin olennaisin ero ei siis tule polttoainetyypistä, vaan siitä miten polttoainekierto on toteutettu. Hyötöreaktorikierronkin poistuu jatkuvasti fissiotuotteita, joiden eristäminen ympäristöstä edellyttää käytännössä jätteen loppusijoitusta.

Kun nykyään puhutaan toriumreaktorista, kyse on ensisijaisesti hyötöreaktorista, mutta nykyisillä uraanin maailmanmarkkinahinnoilla hyötöreaktorikiertoa pidetään yksinkertaisesti liian kalliina ja poliittisesti vaikeana vaihtoehtona olemassa olevalle

teknologialle. Lisäksi tähän mennessä samanlaista kuin uraanipolttoainekiertoa varten kaupallista valmistus- tai uudelleenkäsittelyinfrastruktuuria toriumpolttoaineella ei ole. (IAEA 2012.) Tilanne voi tuki muuttua tulevaisuudessa, jos ydinenergian käyttö lähtee kasvulle, ja laajan jälleenkäsittelyinfran rakentaminen tulee taloudellisesti kannattavaksi. Teknisesti toriumreaktori tarjoaa varteenotettavan vaihtoehdon uraanipolttoainetta käyttäville nopeille hyötöreaktoreille, ja molemmat teknologiat tarjoavat ihmiskunnalle vähäpäästöisen energialähteen, jonka hyödynnettävyys ei käytännössä riipu luonnonvarojen riittävydestä. (Leppänen 2018d.)

7.3 Fuusio

Energian kulutus ja sen riittävyys ovat nykyään tärkeimmässä roolissa ihmiskunnassa. Uusia energialähteitä ja energian tuotantotapoja etsitään ja kehitetään. Yksi tällainen tulevaisuuden energialähde on fuusioenergia. Fuusioreaktio on vastakkainen tapahtuma fissioreaktiolle. Fuusiossa yhdistetään kaksi vedyn isotooppia deuterium H₂ ja tritium H₃. Reaktiotuloksena syntyy helium-ydin ja yksi neutroni sekä vapautuu valtavasti energiaa 17,6 MeV eli noin 100 000 kWh/g. (Ks. kuvio 32.) Fuusioreaktiossa syntynyt neutroni tuo plasmasta pois energiaa, joka saadaan hyötykäyttöön, kun se otetaan talteen seinien sisällä kulkevaan jäähdytteesen. Lämmönvaihtimien jälkeen tuo energia kuljetetaan höyrystimiin ja sieltä edelleen turbiiniin ja generaattoriin, jossa siitä tuotetaan sähköä. Tämä osa voimalaitosta on samanlainen kuin missä tahansa lauhdevoimalassa.

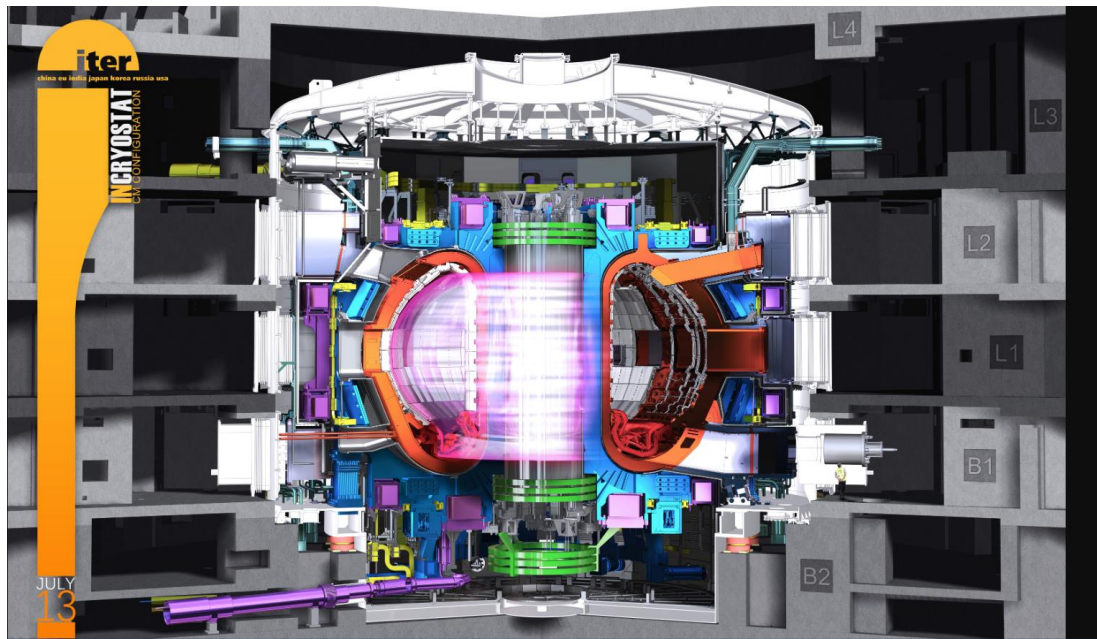


Kuvio 32. Fuusio reaktio (Hakola 2017)

Fuusioreaktorissa yritetään toistaa sama ilmiö, joka tapahtuu auringossa. Maanpinnalla maan vetovoimasta ja atomien välisistä sidosvoimista johtuen tarvitaan lämpötilaksi vähintään 150 milj. °C. Reaktorissa deuterium ja tritium ovat ionisoituneina plasman muodossa. Reaktoriastian sisällä on tyhjiö, kuuma plasma on sähköä johtavaa ja se pidetään irti reaktoriastian seinästä voimakkaiden magneettien avulla. Magneettikentät luodaan tyhjiökammion ulkopuolella olevissa käämeissä kulkevalla voimakkaalla sähkövirralla. Parhaimman koossapidon saavuttamiseksi magneettikentästä tehdään kierteinen. Riippuen siitä, miten kierteinen magneettikenttä synnytetään, laitteet jaetaan stellaraattoreihin ja tokamakeihin.

Fuusioydinvoimaa pidetään lähes saasteettomana, koska itse reaktiossa ei muodostu aktiivisia hiukkasia. Aktivoituminen tapahtuu reaktoriastian seinämän materiaaleissa neutronien törmätessä niihin. Materiaalien aktivoitumista pyritään vähentämään materiaalien valinnoilla ja kehittämällä uusia kestävämpiä materiaaleja. Fuusioreaktorin tarvitsemaa polttoainetta on saatavilla lähes rajattomasti. Deuteriumia saadaan merivedestä. Tritiumia saadaan litium malmista. Reaktorin tarvitsema tritium tuotetaan reaktorin sisällä asentamalla sen seinämiin litiumia sisältäviä elementtejä. Lit-rasta merivettä saadaan 33 mg deuteriumia ja 5g:sta litiumia saadaan 5 mg tritiumia. Tämä vastaa energiasisällöltään n. 360 l bensiiniä (EFDA).

Fuusioenergian tutkimusta ja laitteiden kehittämistä varten on rakennettu useita koereaktoreita eri puolille maailmaa. Ensimmäinen suuremman mittakaavan reaktori on kansainvälinen yhteistyöhanke International Thermonuclear Experimental Reactor ITER (500 MW), joka rakennetaan Ranskassa. ITER on rakenteeltaan tokamak. ITER:ssä on tarkoitus saada energiaa 10-kertainen määrä sisään syötettyyn energiaan verrattuna. ITER reaktori ei ole tarkoitettu tuottamaan sähköä, vaan se on koereaktori. Reaktorissa kehitetään materiaaleja, plasmanhallintaa ja teknologiaa seuraavan sukupolven tuotantoreaktoreita varten. ITERin ensimmäisen plasman on suunniteltu syttyvän vuonna 2025. ITER:n käyttöäksi on arvioitu n. 20 vuotta. Fuusioreaktorin käynnistämisen jälkeen reaktorin sisäosat muuttuvat aktiivisiksi ja sinne ei ole enää mahdollista mennä huoltamaan sisäpuolisia laitteita. Kaikki huoltotoimenpiteet joudutaan tekemään roboteilla ja manipulaattoreilla etäoperaimalla niitä reaktorin ulkopuolelta. (Järvenpää 2013.)



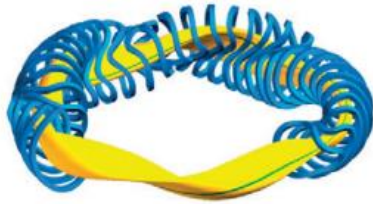
Kuvio 33. ITER (ITER N.d.)

Samalla kun ITER-reaktoria rakennetaan Etelä-Ranskassa, myös seuraavan sukupolven fuusioreaktorin, DEMOn (Demonstration Fusion Power Plant), suunnittelu on käynnistynyt. Itse asiassa DEMO-reaktoreita näyttää syntyvän useita, sillä EU:n lisäksi ainakin Kiina, Korea ja Japani ovat käynnistäneet omat vastaavat hankkeensa eri nimillä.

DEMO tulee olemaan huomattavasti lähempänä kaupallista voimalaitosta kuin ITER, joka keskittyy kokeelliseen tutkimukseen ja teknologian kehittämiseen.

ITER reaktorin teknologian tukena voidaan katsoa maailman suurimman stellaratto-
rin Wendelstein 7-X Saksassa (Ks. kuvio 34.) ja eurooppalais-japanilainen suprajoh-
tava tokamakkin JT60SA (Japan Torus Super Advanced).

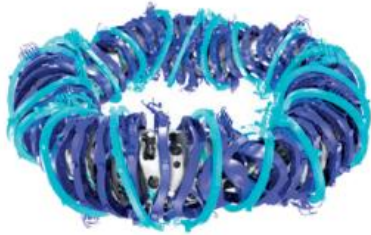
Uusien fuusiolaitteiden tavoitteena on tutkia fuusioplasman hallintaa. Niiden avulla saadaan varmistumaan ITERin onnistunut käyttöönotto ja välttämään suunnitteluvirheitä DEMO-reaktorin valmistelussa.



Wendelstein 7-X:n viisinkertainen symmetria ja kiertäinen plasman muoto. Futuristisen muotoiset magneettikenttäketjat ovat huolellisen tietokoneoptimoinnin tulosta ja lopulta todellinen insinööritaidon näyte (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).



Wendelstein 7-X:n sisäistä kauneutta: kammioiden muoto vaihtelee toroidaalisessa suunnassa. Der Spiegel kuvaili kammiota "muotoilun Mona Lisaksi" (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).



Wendelstein 7-X:n suprajohtavat magneetit. Kaksikymmentä tasomaista magneettia on esitetty vaalealla värillä, loput 50 ovat vahvasti kolmiulotteiseen muotoon väännettyjä oikean plasmageometrian luomiseksi (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).

Kuvio 34. Stellaraattori Wendelstein 7-X (Kurki-Suonio 2017, 12-13)

Viimeisen kymmenen vuoden aikana kansallisten ja kansainvälisten fuusio-ohjelmien rinnalle on syntynyt useita yksityisellä rahoituksella toimivia yrityksiä, jotka pyrkivät tutkimaan kompakteja ja näin ollen edullisempia fuusiokoelaitteita. Lähes kaikki fuusioyritykset kehittävät omia, toinen toistaan mielenkiintoisempia konsepteja, joilla ei ole juurikaan yhtymäkohtia kansallisten ja kansainvälisten ohjelmien tokamakeihin, stellaraattoreihin ja inertiakoossapitolaitteisiin⁵. Yksityisrahoitteisten yritysten ek-

⁵ Fuusio- ja plasmafysiikassa puhutaan yleensä atomiytimien riittävästä tiheydestä, energian koossapidosta ja koossapitoajasta. Näiden parametrien käsittelemisessä on kehitetty magneettinen koossapito ja inertiakoossapito eli laserfuusio. Näistä magneettinen koossapito on pidemmälle kehittynyt ja siihen keskitytään myös Euroopan fuusiotutkimusohjelmassa.

soottisimpien laitteiden periaatteellinen toimivuus on useissa tapauksissa vielä osoittamatta, mistä johtuen niihin liittyy enemmän fysiikan tutkimusta ja suurempi riski epäonnistua.

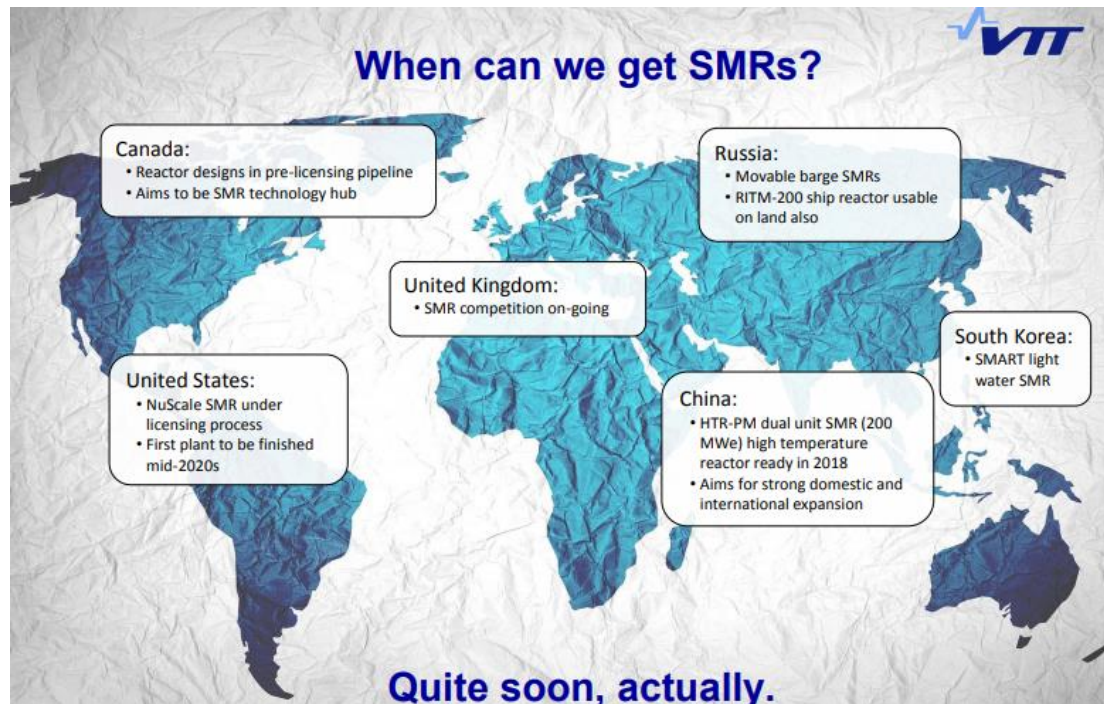
Yksityiset fuusioyritykset voivat tuoda alalle kumminkin hyötyjä ja uusia ratkaisuja. Nettoenergian tuotto fuusion avulla on erittäin vaikea ongelma, joka vaatii perinteisen tiedemaailman ja kaupallisten yritysten yhteistyötä. Fuusioenergian kehityksessä näyttää nyt tapahtuvat enemmän kuin vuosikymmeniin ja kaikki osapuolet tuntuvat olevan samaa mieltä siitä, että mikäli ihmiskunta todella panostaisi fuusioenergiaan, tämä saasteeton ja loputun energia voisi olla saavutettavissa nopeastikin. (Asunta & Lindén 2017.)

7.4 Pienet modulaariset reaktorit

Pienet modulaariset reaktorit (Small Modular Reactor) eli SMR:t ovat saaneet paljon huomiota niin mediassa kuin muuallakin viimeisien vuosien aikana. Ylensä SMR:t ovat korkeintaan 300 MW sähkötehon ydinreaktoreita ja niiden ominaispiirteenä mainitaan mahdollisimman suuri sarjatuotanto ja tehdasvalmistuksen osuus.

Pienreaktorien ryhmitysperusteeksi voidaan asettaa niiden koko, käyttötarkoitus ja käytetty teknologia. Sähköverkon ulkopuolisen asutuksen ja kaivosten vaatiman energian tuottamiseen voidaan käyttää muutamien megawattien pienemmät reaktorit diesalien sijaan. Sellaisia minireaktoria kehitetään nyt erityisesti Kanadassa. Alueella, joissa ei ole vielä luotu infrastruktuuria, energian saamiselle voidaan käyttää lautalle asennettuja kevytvesireaktoreita, jotka ovat hieman suurempia. On olemassa konseptit, jossa monta reaktoria laitetaan rinnan ja ne tuottavat sähköä verkkoon käyttämällä yhteisiä järjestelmiä, näin saadaan laitoskokonaisuus perinteisen voimalan kokoluokkaan. Kaasujäähdytteiset reaktorit mahdollistavat esimerkiksi korkean lämpötilan prosessilämmön tuottamiseen, korkean lämpötilan SMR-konseptien tuottamaa höyryä voisi käyttää mm. vedyn valmistuksessa. (Tulkki 2018a, 10-13.)

Pienreaktoriprojekteja on käynnissä monessa maassa, osa on jo lisensoinnin tai rakentamisen vaiheessa. (Ks. kuvio 35.) Kiinassa ja Venäjällä projektit monen pienydinvoimalan osalta ovat pitkällä ja niissä valtion ajamat hankkeet voivat luottaa rahoitukseen - ainakin niin pitkälle kuin poliittinen tuki kantaa. Lännessä taas projektit ovat vielä innovaation tasolla, ja niiden on päästävä demonstraatio- ja kaupallistamisprosessista läpi, unohtamatta riittävästä projektin tukitarpeesta.



Kuvio 35. SMR:n nykytilanne (Tulkki, Pursiheimo & Lindroos 2017)

Useimmissa SMR-konsepteissa on pohjimmiltaan kyse jo olemassa olevan ja koetellun teknologian skaalaamisesta pienempään mittakaavaan. Pienikokoisia SMR-ydinreaktoreita on ollut sotilaskäytössä jo kymmeniä vuosia laivoissa ja sukellusveneissä ja niiden käyttökokemus on hyödynnettävissä myös siviilialalla.

Pienreaktoreiden sarjatuotannon mahdollisuus voisi laskea niiden hintoja yksinkertaistamalla systeemejä. SMR:ien kustannukset perustuvat vasta valmistajien arvioihin ja tarkentuvat lähivuosina, kun valmistajat saavat ensimmäiset projektinsa valmiiksi. Yksi SMR:ien selkeistä eduista on, että standardisoituja laitoksia valmistetaan useita

kappaleita, jolloin saavutetaan säästöjä sekä rakentamisessa, operoinnissa että huollossa. SRM:n vaadittu turvallisuustaso voidaan saavuttaa myös yksinkertaisemmilla passivisilla ja luotettavimmilla tavoilla, kuin isoilla laitoksilla, johtuen reaktoreiden pienestä koosta ja lämpötehosta. SRM:n etuna lasketaan lisäksi niiden monipuoliset käyttömahdollisuudet, skaalautuvuus tarvetta vastaavaksi ja nopeampi rakennusaika. (Tulkki 2018b.)

SMR:t pitäisi pystyä luvittamaan ja hyväksymään yhteisesti, jottei laitoksiin jouduttaisi tekemään maakohtaisia teknisiä muutoksia, koska muussa tapauksessa laitosten tehdasvalmisteisuus ja taloudellisuus voisi kärsiä merkittävästi.

Suomessa VTT on koordinoimassa EU:n ELSMOR-hanketta (Towards European Licensing of Small Modular Reactors). ELSMOR pyrkii edesauttamaan pienydinreaktoreiden leviämistä Euroopassa selvittämällä ja ratkomalla niiden käyttöön oton mahdollisia esteitä ja keittämällä lisensointijärjestelmää.

Pienten ydinvoimaloiden rakentaminen asutuskeskusten lähelle on suuri poliittinen kysymys, joka esimerkiksi herättänee erimielisyyksiä Suomen puolueiden sisällä. Ydinvoimaa on pitkään vastustettu ympäristöliikkeessä ja vihreissä, mutta kun nyt tarvitaan nopeita ratkaisuja ilmastokriisin hillitsemiseksi, ympäristöliikekin on muuttamassa asenteita myös. Suomeen on jopa perustettu ydinvoimaan myönteisesti suhtautuva ympäristöliike Suomen Ekomodernistit ry, jonka perustajajäsen Rauli Partasen mukaan yhdistys näkee ydinvoiman yhtenä erinomaisena keinona hillitä ilmastomuutosta ja rakentaa puhdasta energiantuotantoa.

7.5 Lämmöntuotanto ydinenergialla

Ydinvoimalan toiminnasta yhteistuotantolaitoksena on maailmalla paljon käytännön kokemusta. Esimerkiksi Venäjällä lähes kaikki reaktorit on suunniteltu tuottamaan lämpöä vähintään laitoksen omiin ja lähialueen asukkaiden tarpeisiin. Uusi kellova ydinvoimala Akademik Lomonosov on suunniteltu tuottamaan sähkön lisäksi kaukolämpöä Venäjän arktisen alueen kaupungeille. Aluksessa on kaksi alun perin jäänmurtajakäyttöön kehitettyä ydinreaktoria.

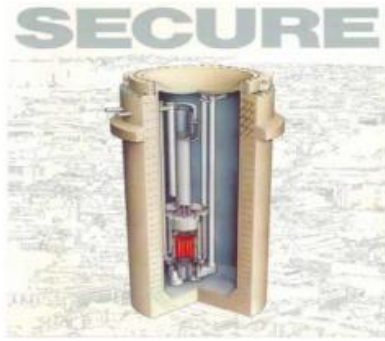
Yhteistuotannon sijaan ydinreaktori voidaan kuitenkin suunnitella tuottamaan pelkkää kaukolämpöä. Tällaisen reaktorin sydän voidaan rakentaa tavanomaisesta polttoaineesta, jota jäähdytetään vedellä. Tehon säätöön käytetään liikuteltavia säätösauvoja tai jäähdytteeseen liuotettua neutroneita absorboivaa boorihappoa. Kun ei oteta mukaan sähköntuotantoa, ei ole tarvetta turbiinikierrolle, energiaa ei tarvitse muuttaa muodosta toiseen, vaan reaktorin tuotanto on suoraan syötettävissä verkkoon. Joten vältetään primäärijäähdytteen mukana kulkeutuvien radioaktiivisten aineiden päätyminen verkkoon, reaktori kytketään kaukolämpöverkkoon lämmönvaihtimien ja välipiirin kautta. Ydinkaukolämpölaitokset voivat kooltaan olla pienempiä, kuin sähköä tuottavat. Suurelle kaupungille sopiva yksikkökoko voisi olla 100-400 MW, ja pienemmälle 25-50 megawatin kokoluokkaan.

Kaukolämpöverkon menoveden yli sata-asteisen lämpötila vaatii reaktorilta 140-160°C asteen toimintalämpötilaa, silloin kaukolämpöreaktorissa tarvitaan myös matala paine. Kun materiaalien ja rakenteiden ei tarvitse kestää kovaa kuumuutta tai kovia paineita, on laitoksen rakentaminen halvempaa, eikä kestä kauan.

Lämpöä ei pystytä siirtämään kustannustehokkaasti pitkiä matkoja kuten sähköä, joten tuotanto on saatava lähelle kulutusta ja sen turvallisuustaso on oltava korkealla. Turvallisuussuunnitteluun toki vaikuttaa pieni yksikkökoko ja matala käyttöpaine. Onnettomuustilanteessa reaktoriturvallisuutta uhkaa polttoaineen jälkilämpö. Jälkilämmöntuotto on suoraan verrannollinen reaktorin fissiotehoon, joten esimerkiksi 200 megawatin kaukolämpöreaktori tuottaisi sammuttamisen jälkeen lämpöä alle 5% Olkiluodon EPR-reaktorin jälkilämpötehosta. Reaktorin jälkilämmönpoisto ja paineenhallinta voitaisiin tällöin toteuttaa luonnonkiertoon perustuvilla passiivisilla järjestelmillä. Korkea turvallisuustaso on tällöin saavutettavissa ilman kalliita ja moninkertaisesti varmennettuja aktiivisia hätäjäähdytysjärjestelmiä. Jos laitoksen sähköjärjestelmät menetetään, reaktori siirtyy itsestään turvalliseen tilaan, jossa jälkilämpö siirtyy luonnonkierrolla lämmönvaihtimien kautta reaktorirakennuksen ulkopuolelle. (Lepänen 2018e.)

Passiiviseen turvallisuussuunnitteluun perustuvaa kaukolämpöreaktoria tutkittiin pohjoismaissa jo neljä vuosikymmentä sitten. SECURE (Safe Environmentally Clean

Urban REactor) reaktorikonsepti kehitettiin ruotsalais-suomalaisena yhteistyönä, mutta projekti ei päässyt lopputuloksen, sillä 1980-luvulla kaukolämpölaitoksen polttoaineeksi valikoitui halpa kivihiihi. (Ks. kuvio 36.) Kaukolämpöreaktoreita kohtaan kiinnostus pieneni lisää, kun alalla alettiin puhumaan ydinjätteen transmutaatiotutkimuksesta ja neljännen sukupolven reaktoriteknologiasta.

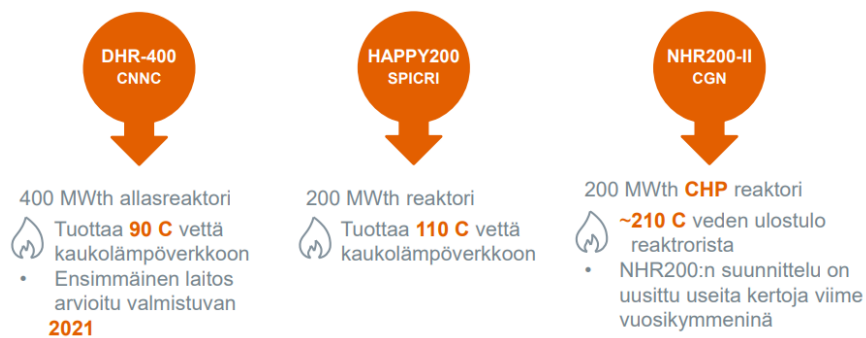


Kuvio 36. SECURE – reaktorikonsepti (Lemmetty 2012, 12)

Viime vuosina kiristyvät CO₂-päästövaatimukset ja tarve päästä eroon saastuttavasta kivihielestä ovat kuitenkin tuoneet kaukolämpöreaktorit jälleen esiin. Uutisia teknologian kehityksestä on viime aikoina kuultu erityisesti Kiinasta, missä kyse ei ole ainoastaan ilmastomuutoksen torjunnasta, vaan myös kaupunkien ilmanlaatua pilaavien pienhiukkaspäästöjen leikkaamisesta. (Ks. kuvio 37.)

Kiina: Kaukolämpöreaktorien kilpailu

Nykyinen energian nelivuotissuunnitelma sisältää "demonstration of concept"

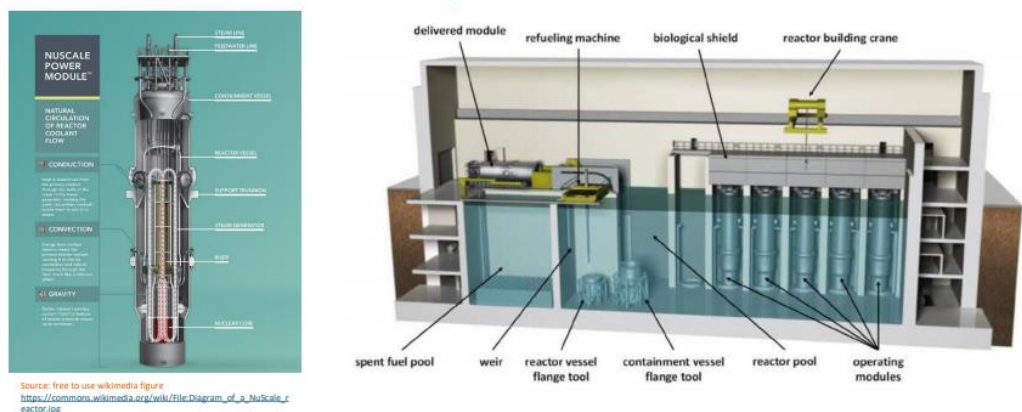


Kuvio 37. Kiinan kaukolämpöreaktorit (Sahlberg 2019a)

Kaukolämpöreaktoriteknologian kaupallistaminen on kannattavaa myös Suomessa, sillä hallitus on esittänyt kivihiilen käytölle täyskieltoa vuodesta 2029 alkaen. Ydin-
kaukolämmön mahdollisuuksien selvittämisestä on jo tehty kunnallisella tasolla valtuustoaloitteita ainakin Helsingissä, Espoossa, Kirkkonummella, Nurmijärvellä ja Turussa. (Leppänen 2018e.)

SMR:t soveltuvat isoja laitosyksiköitä paremmin kaupunkiympäristöön ja pystyvät myös paremmin vastaamaan kysynnän vaihteluun ja toimimaan hyvin kuormanseurannassa, konseptista riippuen. Fortum on erityisesti suunnannut katseensa yhdysvaltalaisen NuScale-konseptiin, joka sai lisensointiprosessin ensimmäisen vaiheen valmiiksi ja tähtää lisenssiin vuoden 2020 lopussa. NuScalen reaktorimoduuli on 50 MWe / 165 MWth integraalinen painevesireaktori, jossa on sekä paineastia että suorarakennus sisäkkäisinä teräsrakenteina. (Ks. kuvio 38.) Voimalaitoksessa on enimmillään 12 moduulia rinnan vesialtaassa, muodostaen 600 MWe:n voimalan. Jokaisella moduuleista on oma turbiininsa, ja voimalan pitäisikin olla erittäin nopea vastamaan muuttuvaan tehon tarpeeseen. Ensimmäinen voimalaitos on suunniteltu valmistuvan Idahossa vuonna 2026, ja sen tarkoitus on tasoittaa läheisen suuren tuuli-
voimakeskittymän vaihtelevaa tuotantoa. (Tulkki 2018a, 12.)

NuScale Modulaarinen iPWR lisensointiprosessissa



Kuvio 38. NuScale reaktorimoduuli (Sahlberg 2019b)

VTT on selvittänyt pienten modulaaristen ydinreaktorien soveltuvuutta kaukolämpötuotantoon ja teollisuuden prosesseihin. SMR:a mallinnettiin osana oletettua suomalaisen esimerkkikaupungin 2030-luvun kaukolämpöverkkoa. Mallinnettu reaktortyyppi olisi tulosten mukaan mahdollista ottaa osaksi kaukolämpöverkon tuotantopalettia. Investoinnin takaisinmaksuajaksi arvioitiin 10-20 vuotta riippuen toteutuvista kustannuksista. (VTT 2017.)

Lappeenrannan–Lahden teknillisessä yliopistossa parhaillaan kehitetään omaa pienydinvoimalaa. Sillä kaukolämpöreaktorilla voitaisiin tuottaa suomalaisen keski-suuren kaupungin koko kaukolämmön tarve.

Parhaillaan Suomessa työ- ja elinkeino- ministeriö (TEM) on käynnistämässä ydinenergiain kokonaisuudistukseen liittyvää valmistelua. TEMin hallitusneuvos Anja Liukon mukaan nykyinen lupajärjestelmä ei sovellu pienlaitoksille kovinkaan hyvin, toisenlainen malli voisi toimia paremmin. Uudistettava lainsäädäntö voi edesauttaa sitä, että yritykset uskaltavat lähteä tulevaisuudessa investoimaan pienreaktoreihin. Ydinenergiain uudistuksen piiriin mahdollisesti tulee myös käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen liittyvän säätelyn kehittämistä. Jätehuollon osalta lakimuutokset tulevat koskemaan kaikkia nykyisiäkin ydinlaitoksia ja muuta kuin energiantuotantoa käsittävää ydintekniikkaa. (Jurvelin 2019.)

7.6 Ydinjäte

Kun puhutaan ydinenergiasta, keskustelun eturiviin nousee aina voimaloiden turvallisuus. Ydinvoimalaitoksen turvallisuuden perustaa on polttoaineen jäähdytys kaikissa tilanteissa. Fissioreaktori tuottaa toimiessaan radionuklideja, raskaan ytimen halkeaminen jättää ylimääräisiä neutroneita, joista fissiotuotteet pyrkivät eroon radioaktiivisella hajoamisella. Reaktorin polttoaineeseen syntyy radioaktiivisuutta myös neutronikaappausreaktioissa, jotka muuttavat uraanin ytimiä raskaammiksi alkuaineiksi. Polttoaineen lisäksi neutronisäteilytys aktivoi myös muita sydämen rakenteita, sekä polttoainesauvojen välissä virtaavaa jäähdytettä. Ylivoimaisesti suurin osa radioaktiivisuudesta syntyy kuitenkin kiinteisiin uraanidioksiditabletteihin. Ydinvoimalaitok-

sessä kaikki radioaktiivisiin aineisiin liittyvät prosessit on eristetty ympäristöstä. Polttoainetta jäähdyttävä vesi muodostaa oman suljetun kiertonsa laitoksen sisällä, ja energia siirtyy kierrosta toiseen lämmönvaihtimien välityksellä. Eristys ei kuitenkaan koskaan ole täydellinen, ja jokainen ydinvoimalaitos tuottaa käydessään jonkin verran radioaktiivisia päästöjä ilmaan ja vesistöihin. Näille päästöille on asetettu rajat, joita valvotaan jatkuvilla mittauksilla. Tämä koskee laitoksen normaalikäyttöä, tilanne muuttuu onnettomuuden sattuessa, kun lämpöä ei pystytä kuljettamaan pois reaktorin sydäntä jäähdyttämällä, jälkilämpö riittäisi sulattamaan polttoaineen kaasutiiviit suojakuoret ja itse polttoaineen. Radioaktiiviset aineet tällöin voivat vapautua reaktorista suojarakennukseen, jonka tiiviys tietyissä olosuhteissa voidaan myös menettää. (Leppänen 2018f.)

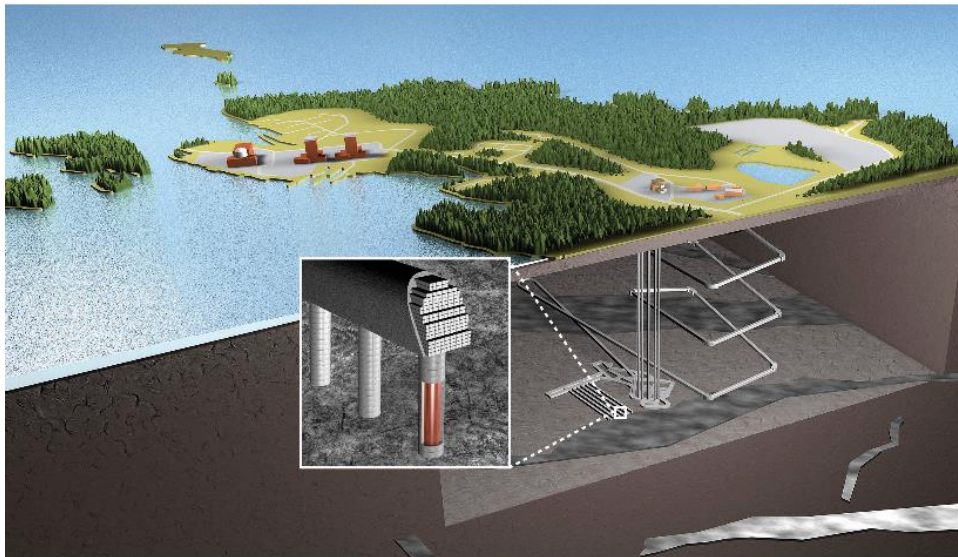
Ydinvoimalaitosten turvallisuussuunnittelulla pyritään välttämään nämä tapahtumat. Kaikki laitteet ja toiminnot suunnitellaan turvallisuustarkastelujen pohjalta soveltaen korkeita laatuvaatimuksia ja riittäviä turvallisuusmarginaaleja. Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät tehdään huomioiden sekä laitevikojen, että inhimillisten virheiden mahdollisuus. Kaikki turvallisuudelle merkitykselliset toiminnot varmistetaan useilla rinnakkaisilla järjestelmillä ja laitteilla, jotta saavutetaan korkea luotettavuus-taso. Erityisillä suojauslaitteilla ja -rakenteilla lievennetään mahdollisen onnettomuuden vaikutuksia.

Ydinenergian turvallisuus ei kumminkaan rajoitu voimalan käyttöön. Reaktori tuottaa ympäristölle vaarallista radioaktiivista jätettä, joka on pitkäikäisten radionuklidein takia eristettävä ympäristöstä tuhansiksi vuosiksi. Ydinjätteen loppusijoitusratkaisusta käsitellään paljon sosiaalisessa mediassa ja internetin keskustelupalstoilla. Ydinjäte-ongelma tulee esiin, kun keskustellaan ydinvoiman lisärakentamisesta, vaikka jätteen määrä ei ole erityisen suuri.

Suomessa Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten rakentamisvaiheessa 1970-luvulla ensisijainen vaihtoehto jätteille oli vienti takaisin ulkomaille ja jälleenkäsittelyn teknologian kehittämistä ei pidetty tarpeellisena. Vuonna 1994 eduskunta muutti ydinenergialakia kuitenkin siten, että käytetyn ydinpolttoaineen vienti maasta kiellettiin samoin kuin ydinjätteiden tuontikin. Ydinvoimayhtiöiden piti alkaa miettimään,

miten ne järjestävät ydinjätteen loppusijoituksen kotimaassa. Ehdotetuksi tuli käytetyn polttoaineen suora loppusijoitus suomalaiseen kallioperään ja hankkeesta huolehtimiseksi perustettiin Posiva Oy.

Suoran loppusijoituksen etu on sen tekninen toteutettavuus ja se, että käytettyä polttoainetta ei tarvitse käsitellä paljon. Posivan käyttämässä loppusijoituskonseptissa polttoaineput suljetaan raudalla vahvistettujen kuparikapselien sisään. Kapselit asetetaan graniittiin porattuihin pystysuoriin reikiin luolastossa, joka on louhittu peruskallioon 400-450 metrin syvyyteen. Ympäröivä tila täytetään bentoniittisavella, joka paisuu imiessään itseensä vettä. Paisunut savi muodostaa tiiviin tulpan loppusijoituskapselin ympärille. Kun luolasto on täynnä, myös ajotunnelit suljetaan bentoniitilla ja muilla täyteaineilla. Loppusijoitusta koskevat turvallisuusanalyysit arvioivat säteilyannosta, jonka kallioperään haudattu polttoaine aiheuttaa loppusijoitustilan vaikutusalueella asuvalle väestölle. Syväälle kallioperään haudattu ydinjäte ei aiheuta suoraa säteilyvaaraa maan pinnalla, vaan loppusijoituksen riskit liittyvät siihen, että radioaktiivisia aineita kulkeutuu vesistöihin, ja sieltä juomaveden ja ravintoketjun kautta ihmiseen. (Leppänen 2018g.)



Kuvio 39. Havainnekuva loppusijoituslaitos vuonna noin 2020 (Posiva Oy N.d.)

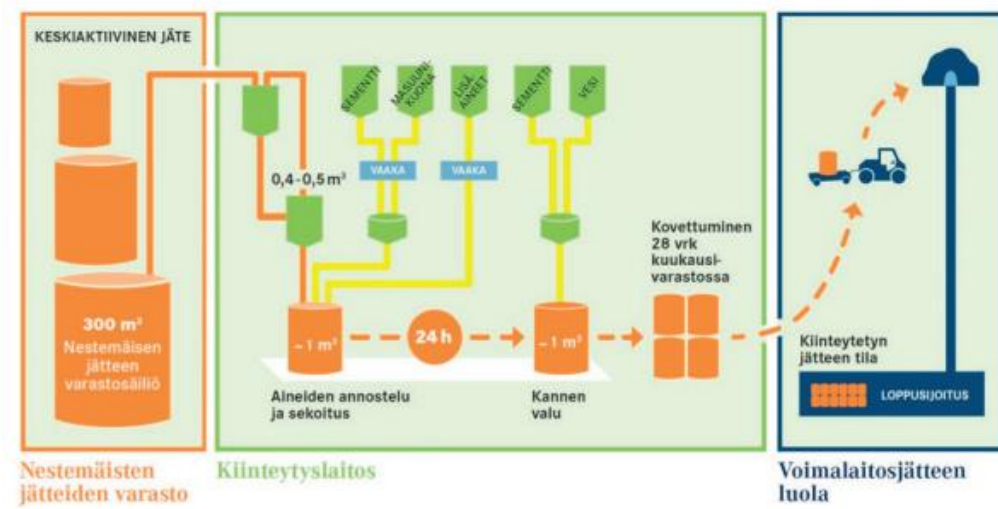
Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten käytetyn polttoaineen loppusijoituksen aikataulun mukaan pitäisi alkaa laitoksen valmistuttua 2020-luvulla, ja jatkua siihen

saakka, että nykyiset laitokset sekä Olkiluoto-3 käyttävät ikänsä loppuun ja Olkiluoto-3 polttoaineen saadaan jäähdytettyä (noin 40 vuotta), eli seuraavan vuosisadan puolella. Jätteen kokonaismäärän arvioidaan noin 5500 uraanitonniin. Jos loppusijoitusluolastoon ei enää tämän jälkeen loppusijoiteta uusien ydinvoimalaitosten jätteitä, polttoaineriippujen käsittelyyn ja kapselointiin tarkoitetun maanpäällinen loppusijoituslaitos puretaan. Syväälle kallioperään haudattu ydinjäte ei enää tämän jälkeen edellytä vartiointia tai aktiivista tarkkailua.

Suomi on kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n mukaan edelleen ainoa maa, jossa ydinjätteen loppusijoituspaikka on päätetty ja rakenteilla. Myös Ruotsissa ydinjätteen loppusijoitus on lähellä ratkaisua. Siellä ydinjätehuollosta vastaava yhtiö Svensk Kärnbränslehantering AB on vuonna 2011 jättänyt lupahakemuksen sijoituslaitoksen rakentamiseksi noin 150 kilometriä Tukholman pohjoispuolella sijaitsevaan Forsmarkin kuntaan. Ranskassa radioaktiivisen jätteen käsittelyviranomaisen Andra on parhaillaan valmistelemassa omaa lupahakemustaan. Kanadassa ja Sveitsissä kansalliset jätehuoltoviranomaiset selvittävät mahdollisia kohteita paikkatutkimuksen avulla. (Hakala 2019.)

Toinen Suomessa toteutuva ydinjätepilottiprojekti on Loviisan voimalaitoksen netemäisten radioaktiivisten jätteiden kiinteytyslaitos, joka on saanut käyttölupansa vuonna 2016. (Ks. kuvio 40.) Sen on tarkoitus toimia, voimalaitoksen nykyisen käyttöönsä puitteissa, Hästholmenin saarella 2060-luvulle saakka. Kiinteytyslaitos on suunniteltu käsittelemään kaikki voimalaitoksen tuotannollisessa käytössä ja käytöstäpoiston yhteydessä syntyvät radioaktiiviset nestemäiset jätteet, jotka voidaan jätellä kolmeen ryhmään: viemäri-vesijärjestelmien pohjalietteet, evaporoinnin jälkituotteena syntyvät haihdutusjätteet ja käytetyt radioaktiiviset ioninvaihtohartsit. Kiinteytyslaitos pystyy käsittelemään kerralla noin 4 m³ :n jäte-eriä, jotka annostellaan noin 400 litran erissä suoraan kuution vetoisiin betonisiin loppusijoitusastioihin, joissa jätteen sekaan annostellaan sementtiä, vettä, masuunikuonaa ja lisäainetta. (Ks. kuvio 41.) Lopputuloksena saadaan 1500 kilogrammaa painava homogeeninen, tiivis ja luja betonimatriisi eli kiinteytystuote. Sen jälkeen valmis jätepakkaus siirretään kiinteytyslaitoksella sijaitsevaan väliavarastoon, josta se kuljetetaan loppusijoitustilaan aikaisintaan 28 vrk:n kuluttua. Kiinteytysprosessi on pitkälti automatisoitu.

Työtä ohjataan omasta valvomosta. Voimalaitoksen käytön päätyttyä kiinteytyslaitoksella käsitellään myös järjestelmien tyhjennyksessä ja purkutöissä syntyvät neste-mäiset jätteet. (Fortum 2016)



Kuvio 40. Kiinteytyslaitoksen periaatteellinen toimintaperiaate (Ropponen 2017, 20)



Kuvio 41. Betoninen käyttämätön loppusijoitusastia (Ropponen 2017, 21)

Suoraan loppusijoitukselle on olemassa myös vaihtoehtoja. Käytetty ydinpolttoaine myös jälleenkäsitellään, jolloin siitä voidaan erotella voimakkaasti radioaktiiviset fission tuotteet ja kierrätettäväksi ydinpolttoaineeksi kelpaava plutonium. Tätä jälleenkäsittelyä tehdään esimerkiksi Ranskassa, Venäjällä, Britanniassa ja Japanissa. Se laskee korkea-aktiivisen jätteen määrän murto-osaan alkuperäisestä, mikä helpottaa loppusijoittamista.

Talteen saatavasta uraanista voidaan sekoittaa väkevöidyn uraanin kanssa kierrätyspolttoainetta nykyisenkaltaisiin kevytvesireaktoreihin. Esimerkiksi Fennovoiman Hanhikivi 1 -reaktorin tuleva polttoaine on tällaista kierrätyspolttoainetta (Partanen 2016).

Ydinteknologian neljännen sukupolven reaktorikonseptit mahdollistavat suljetun polttoainekierron, jossa uraanipolttoaineeseen syntynyttä plutoniumia kierrätetään takaisin nopean neutronispektrin reaktoreiden polttoaineeksi. Nämä hyötöreaktoireina toimivat reaktorityypit kykenevät hävittämään tehokkaasti myös sellaisia aktinideja, joiden fissionuminen vaatii neutroneilta ylimääräistä liike-energiaa (esim. ^{240}Pu). Hyötöreaktorit voivat toimia myös toriumpolttoaineella, jolloin ydinjätteeseen syntyy jo lähtökohtaisesti vähemmän uraania raskaampia alkuaineita. Mutta nämä teknologiat eivät kumminkaan tee loppusijoitusta tarpeettomaksi.

Ydinjätteen ongelmiin liittyviä tutkimuksia tehdään jatkuvasti ja maailmanlaajuisesti. Teknologian kehitystä ja uusia mahdollisia/potentiaalisia ratkaisuja uutisoidaan aika ajoin. Esimerkiksi Nobelin palkinnon saaja fyysikko Gerard Mourou kaavailee laserkiihdytintä, joka muuttaisi satojatuhansia vuosia säteilevän ydinjätteen vaarattomaksi joissakin minuuteissa. Hänen ajatuksena on muuntaa ydinjäte uudelleenlaisiksi atomeiksi, jotka eivät ole enää radioaktiivisia, täytyy vain vaihtaa atomien ytimien kokoonpanoa. Ideana on intensiivisen laserpulssin lähettäminen kohtioon, silloin paikallinen energiatiheys on niin suuri, että siinä syntyy energettisiä protoneja, neutroneja ja gammoja, jotka hajottavat ytimen. Transmutaatiota ovat muutkin tutkineet. Hankalien isotooppien erottamista ja tuhoamista on ehdotettu esimerkiksi laserilla tai hiukkaskiihdyttimellä.

Ydinjätteet syntyvät myös ydinvoimaloiden käytöstäpoiston yhteydessä. 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. Ydinvoimaloiden sulkeminen ja purkaminen on kallista ja kestää vuosikymmeniä. Suurin osa kustannuksista sijoittuu radioaktiivisen materiaalin ja purkujätteen turvalliseen poistoon ja käsittelyyn. Tämän ongelman tehokkaita ratkaisuja etsitään parhaillaan myös.

Esimerkiksi tuoreessa Tampereen yliopistossa tehdyssä väitöstutkimuksessa on kehitetty menetelmä, joka lupaa tehdä radioaktiivisten materiaalien käsittelystä nopeampaa, tehokkaampaa ja edullisempaa. Väitöstutkimuksen tehnyt Thomas Kerstin mukaan menetelmä tunnistaa säteilevät materiaalit hyödyntämällä radioluminesenssia eli voimakkaasti ionisoivan alfasäteilyn synnyttämää värillistä hehkua. Erikoiskameroita käyttämällä alfasäteily voidaan havaita pidemmän matkan päästä kuin nykyisillä menetelmillä, mikä tekee vaarallisten materiaalien paikantamisesta nopeampaa ja turvallisempaa. (Rautiainen 2019.)

8 Pohdinta

Juuri ennen opinnäytetyöni valmistumista YK:n ympäristöohjelman uusi raportti ilmestyi julkisuuteen. Raportti jälleen kerran osoitti, että valtioiden pitää kiihdyttää ilmastotoimia olennaisesti, jos halutaan päästä Pariisin sopimuksen tavoitteisiin, päästöjen pitäisi laskea ensi vuosikymmenellä 7,6 prosenttia joka vuosi. Raportissa kerrotaan, että kuluneen vuoden 2019 metsäpalot, ennätyselliset lämpöaallot ja tuhoisat hurrikaanit ovat antaneet esikuvan siitä, miltä planeettamme ilmasto-olot tulevat tulevaisuudessa näyttämään, jos lämpötilannousua ei onnistuta pysäyttämään.

Brysselissä mietitään parhaillaan, mitkä energiamuodot lasketaan kestäväen rahoituksen piiriin. EU-komissio ja Euroopan neuvosto ovat sitä mieltä, että ydinvoima olisi mukana, mutta parlamentissa osa maista haraa vastaan.

Nämä uutiset todentavat työssäni tehtyjä päätelmiä. Maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt eivät hidastu ja nykyiset sitoumukset ja keinot ovat osoittautuneet täysin riittämättömiksi Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseen. Kasvihuonekaasupäästöille asetettuihin rajoihin ei tulla globaalissa mittakaavassa pääsemään ainoastaan korvaamalla saastuttavaa sähköntuotantoa uusiutuvalla energialla. Tämä fakta varmistettiin tutkimuksessa analysoimalla eri energialähteitä, niiden osuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Lisäksi tutkimus osoitti, että isot päästövähennyshaasteet ovat niillä energiasektorin osa-alueilla, jossa fossiililla polttoaineilla tuotettu energia kulutetaan lämpönä. Kaupunkien lämmitys, teollisuuden energiankäyttö ja muut päästöt, sekä liikenteen päästöt pitää onnistua myös puhdistamaan.

Ilmastonmuutoksen torjunnan yksi mahdollinen ratkaisu on ydinenergia. Ydinenergialla on vähäpäästöisenä ja energiatiheänä energiantuotantomuotona omat kiistatottomat hyötynsä. Säädettyinä sekä säästä riippumattomana energialähteenä ydinvoima kelpaa nykyiseen infrastruktuuriin lisättäväksi ilman sen muuttamista.

Ydinvoimaloiden alasajo ja niiden korvaaminen uusiutuvalla energialähteillä ei tuo toivottavaa tulosta lyhyellä aikavälillä. Sen sijaan järkevä ratkaisu on kompensoida fossiiliset uusiutuvilla ja ydinvoimalla yhdessä.

Ydinvoimalla on jo pitkä kehityshistoriansa. Lähes kaikkien reaktorityyppien toimintaperiaatteet on demonstroitu käytännössä jo vuosikymmeniä sitten, mutta suurin osa niistä on jäänyt prototyyppitasoille teollisuuden keskittäessä kevytvesireaktoritekologiaan. Tällä hetkellä tutkittavilla reaktoreilla kehitys jatkuu todennäköisesti vielä pitkälle tulevaisuuteen, ne voivat törmätä moniin poliittisiin ja taloudellisiin esteisiin ennen kuin teknologian läpimurto tapahtuu. Reaktorien suljettu polttoainekierto ja uraanin tehokkaampi hyödyntäminen edesauttavat ydinjätteen ongelman ratkaisua, mutta ei ne suoranaisesti vaikuta ilmastonmuutosongelmaan. Hyötöreaktorit ja fuusioenergia tulevat ihmiskunnalle tarpeen vain, jos saadaan ratkaistua meidän hyvinvointia, ruokahuoltoa, yhteiskuntarauhaa ja luonnon monimuotoisuutta uhkaavat ongelmat.

Tämän päivän akuuttinen haaste on kasvihuonekaasupäästöjen jyrkkä leikkaus jo tulevien vuosikymmenien aikana. Ja tämän voisi toteuttaa nykyisen vähäpäästöisen ydinvoiman avulla korvaamalla sillä fossiilisia polttoaineita sähköntuotannossa. Toiset alueet, joilla ydinvoimalla on hyvä potentiaali, ovat lämmitys ja teollisuusprosessit.

SMR-kokoluokan reaktorit, voivat vähentää raskaan teollisuuden kasvihuonekaasupäästöjä, joita on muilla teknologioilla vaikea saada alas. Sama pätee myös kauko-

lämmöntuotantoon räätälöityihin reaktoreihin, jotka voisivat erityisesti Suomen olosuhteissa olla hyvinkin sopiva vähäpäästöinen vaihtoehto suurten asumisalueiden lämmittämiseen.

Esimerkiksi pienikokoiset kevytvesireaktorit tai korkean lämpötilan kaasujäähdytteiset reaktorit ovat teknisesti toteutettavissa. Mutta, kuten opinnäytetyössäni oli todettu, ydinvoiman lisärakentaminen on haasteellinen monessa maassa pitkän ja raskaan poliittisen prosessin takia, erityisesti silloin kun puhutaan uudesta teknologiasta. Viime vuosikymmeninä uusien reaktorien rakentaminen on törmännyt myös rahoitusongelmiin, sillä paljon pääomaa vuosikymmeniksi sitovat projektit eivät kiinnosta sijoittajia. Ydinenergian käyttöä ohjaava lainsäädäntö ja viranomaisohjeet on esimerkiksi Suomessa muotoiltu pitkälti nykyisen reaktoriteknologian tarpeisiin (blogi) ja niihin tarvitaan muutoksia. Pienten ydinvoimalaitosten pitäisi saada päättäjien ja kansalaisten hyväksyttävyyttä ja tämän jälkeen olisi myös kartoitettava laitosvalmistajien kyky valmistaa erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuvia pienreaktoreita.

Ydinvoima-alan toimijoiden pitää tällä hetkellä lisätä ihmisten tietoisuutta ydinvoiman suhteen, sekä kertoa paremmin ydinvoiman hyödyistä ja haitoista, sekä vastata julkisuudessa kiertäviin ydinvoimavastaisiin keskusteluihin. Ydinvoimateollisuuden painottaminen julkisessa viestinnässä pelkästään turvallisuuteen voi antaa kuvan, että alalla olisi jotain epäkunnossa sen suhteen. Ydinvoimaloiden käytön ja turvallisuuden parantamiseksi tehdään jatkuvaa ja pitkäjänteistä työtä, joka on jo nostanut turvallisuustasoa korkealle. Ihmisten ydinvoimapelot johtuvat paitsi onnettomuuksista, myös huolesta atomipommeja ja säteilyn haittavaikutuksia kohtaan, tämä on ymmärrettävää, mutta osaa niistä voidaan lieventää, kun ihminen tuntee tosiasiat. Siksi ydinjätteen ja sen käsittelytekniikoiden on oltava myös aktiivisen kampanjaviestinnän osana. Kun ihmisille on luotu laaja ja luotettava kuva käytettävissä olevista teknologioista päästöjen vähentämiseksi, vasta silloin ihmiset voivat arvioida ja mahdollisesti sietää ydinvoimaan liittyviä riskejä.

Ydinvoimasta on keskusteltu viime aikoina myönteisempään sävyyn ja sen kannatus on nousussa maailmanlaajuisesti. Mutta ydinvoima ei yksin ratkaise mitään, se on vain osa laajaa pakettia, jolla ilmastonmuutosta torjutaan.

Lähteet

Asunta, O. & Lindén, T. 2017. Yksityisrahoitteinen fuusiotutkimus. ATS Ydintekniikka, 46, 4, 20-24. Viitattu 20.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2017_4.pdf.

Bioenergy. N.d. Artikkelel IEA sivustolla. Viitattu 25.10.2019. <https://www.iea.org/topics/renewables/bioenergy/>.

Brown, L.R. 2017. Suuri energiamurros. Helsinki: Into kustannus.

Child, M. 2018. Transition towards long-term sustainability of the Finnish energy system. Dissertation. Lappeenranta University of Technology. School of Energy Systems. Viitattu 29.10.2019. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158664/Michael%20Child%20A4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen, M-L., Sandberg, J. & Sjöblom, K-L. N.d. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. STUK. Viitattu 16.10.2019. https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf/.

European Komissio. 2018. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, Eurooppa-neuvostolle, neuvostolle, Euroopan keskuspankille, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle, alueiden komitealle ja Euroopan investointipankille. Puhdas maapallo kaikille. Eurooppalainen visio kukoistavasta, nykyaikaisesta, kilpailukykyisestä ja ilmastoneutraalista taloudesta. Bryssel. COM (2018) 773 final. Viitattu 27.10.2019. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN_.

Fortum. 2016. Fortumin Loviisan voimalaitoksen nestemäisten radioaktiivisten jätteidn kiinteytyslaitos otetaan käyttöön. Uutinen Fortumin sivustolla. Viitattu 29.10.2019. <https://www.fortum.fi/media/2016/02/fortumin-loviisan-voimalaitoksen-nestemäisten-radioaktiivisten-jätteiden-kiinteytyslaitos-otetaan-kayttoon>.

Generation IV Systems. N.d. Artikkelit The Generation IV International Forum (GIF) sivustolla. Viitattu 18.10.2019. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40465/generation-iv-systems.

Geothermal power generation. N.d. Artikkelit IEA sivustolla. Viitattu 25.10.2019. (<https://www.iea.org/topics/renewables/geothermal/>).

Government of Alberta Canada. 2018 – 2019. Energy Annual Report 2018–2019. Viitattu 13.10.2019. <https://open.alberta.ca/publications/1703-4582>.

Hakala, H. 2019. Ydinjätteen loppusijoitus ratkaistu yhä vain Suomessa. Uutinen Verkko uutiset.fi – sivustolla. Viitattu 29.10.2019. <https://www.verkkouutiset.fi/ydinjatteen-loppusijoitus-ratkaistu-yha-vain-suomessa/>.

Hakola, A., 2017. Fuusiosähköä joka kotiin 50 vuoden päästä – miten Euroopassa edistetään tätä tavoitetta? ATS Ydintekniikka, 46, 4, 8 -10. Viitattu 20.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2017_4.pdf.

IAEA. 2019a. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. Report. Vienna. Viitattu 6.11.2019. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/19-00521_web.pdf.

IAEA. 2019b. Waste from innovative types of reactors and fuel cycles. A Preliminary Study. Vienna. Viitattu 18.10.2019. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1822_web.pdf.

IAEA. 2012. Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems. Vienna. Viitattu 20.10.2019. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1540_web.pdf.

IEA. 2019a. Global Energy & CO2 Status Report 2018. Viitattu 20.10.2019. https://webstore.iea.org/download/direct/2461?fileName=Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf.

IEA. 2019b. Renewables information: overview 2019. Viitattu 22.10.2019. https://webstore.iea.org/download/direct/2665?fileName=Renewables_Information_2019_Overview.pdf.

IEA. 2019c. Nuclear Power in a Clean Energy System. Viitattu 11.11.2019.
<https://www.iea.org/publications/nuclear/>.

IEA. 2018a. Renewables 2018. Analysis and forecasts to 2023. Viitattu 22.10.2019.
<https://webstore.iea.org/download/direct/2322>.

IEA. 2018b. World Energy Outlook 2018. Viitattu 2.11.2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.

IPCC. 2019a. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In press. Viitattu 4.9.2019.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>.

IPCC. 2019b. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In press. Viitattu 7.9.2019. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf.

IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In Press. Viitattu 27.10.2019. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Viitattu 5.11.2019. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf.

IPCC. 2011. Summary for Policymakers. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Viitattu 4.11.2019.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Summary-for-Policymakers-1.pdf>.

ITER. N.d. What is a Tokamak? Artikkelin ITER:n sivustolla. Viitattu 19.10.2019. <https://www.iter.org/mach/Tokamak>.

Järvenpää, J., 2013. Fuusio tulevaisuuden energialähde. ATS Ydintekniikka, 42, 1, 17-20. Viitattu 20.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2013_1.pdf.

Jurvelin, K. 2019. Ydinenergiälaki lähtee -täysremonttiin – Suomessa raivataan elintilaa pienydinvoimaloille. Uutinen Kauppalehti- sivustolla. Viitattu 28.10.2019. <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/ydinenergiälaki-lahtee-taysremonttiin-suomessa-raivataan-elintilaa-pienydinvoimaloille/d2d22f37-6ea6-43d9-8e37-0c60657539e0>.

Koistinen, A. 2019. Ydinvoiman rahoitus voi kohta vaikeutua – Valtaosa EU-maista pitää Suomen johdolla ydinvoimaa "vihreänä", mutta parlamentti on aivan toista mieltä. Uutinen YLE sivustolla. Viitattu 30.10.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-10961855>.

Korhonen, J. & Partanen, R. 2016. Musta hevonen – ydinvoima ja ilmastonmuutos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Kosmos.

Kurki-Suonio, T. 2017. Uudet fuusiolaitteet rakentavat siltaa kohti ITERiä. ATS Ydintekniikka, 46, 4, 11-13. Viitattu 20.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2017_4.pdf.

Laitostoimittaja päivittää OL3-projektin aikataulua. 2019. Uutinen TVO sivustolla. Viitattu 30.10.2019. <https://www.tvo.fi/news/2156>.

Lehtilä, A., Koljonen, T., Airaksinen, M., Tuominen, P., Järvi, T., Laurikko, J., Similä, L. & Grandell, L. 2014. Low Carbon Finland 2050 -platform. Energiajärjestelmien kehityspolut kohti vähähiilistä yhteiskuntaa. VTT Technical Research Centre of Finland. Viitattu 4.11.2019. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T165.pdf>.

Lemmetty, M. 2012. SECURE. Mikä se oli? ATS Ydintekniikka, 41, 2, 12-14. Viitattu 22.10.2019 https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2012_2.pdf.

Leppänen, J. 2018a. Ilmastonmuutos ja ydinvoima. Blogikirjoitus. Viitattu 15.10.2019. https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/10/05/ilmastonmuutos-ja-ydinvoima/#link_ii.

Leppänen, J. 2018b. Missä viipyy nopea hyötöreaktori. Blogikirjoitus. Viitattu 12.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/07/08/missa-viipyy-nopea-hyotoreaktori/>.

Leppänen, J. 2018c. Missä viipyy toriumreaktori. Blogikirjoitus. Viitattu 16.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/03/23/missa-viipyy-toriumreaktori/>.

Leppänen, J. 2018d. Missä viipyy toriumreaktori? ATS Ydintekniikka, 47, 3-4, 10-14. Viitattu 19.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2018_3-4.pdf.

Leppänen, J. 2018e. Ydinenergia ja kaukolämpö. Blogikirjoitus. Viitattu 23.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/12/17/ydinenergia-ja-kaukolampo/>.

Leppänen, J. 2018f. Mistä reaktoriturvallisudessa on kyse? Blogikirjoitus. Viitattu 28.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/02/16/mista-reaktoriturvallisudessa-on-kyse/>.

Leppänen, J. 2018g. Onko ydinjätteen loppusijoitus ratkaistu? Blogikirjoitus. Viitattu 28.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2019/02/09/onko-ydinjatteen-loppusijoitus-ratkaistu/>.

Leppänen, J. N.d. Ydinvoima ja Innovaatiot. Neljännen sukupolven reaktoritekniikan tavoitteet. Energiateollisuus ry. Viitattu 17.10.2019. https://energia.fi/files/276/ydinvoima_ja_innovaatiot.pdf.

Lynch, M. 2016. Negative electricity prices are not a sign of renewable success. Uutinen Forbes sivustolla. Viitattu 30.10.2019. <https://www.forbes.com/sites/michael-lynch/2016/02/19/negative-electricity-prices-are-not-a-sign-of-renewable-success/#69960c3e3806>.

Olivier J.G.J. & Peters J.A.H.W. 2018. Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2018 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The

Hague. Viitattu 15.10.2019. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2018-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report_3125_0.pdf.

Partanen, R. 2016. Ydinjätteen tulevaisuus. Artikkelit Fennovoiman Fennonen-verkko-lehdessä. Viitattu 29.10.2019. <https://www.fennonen.fi/artikkelisivu/ydinjätteen-tulevaisuus>.

Posiva Oy. N.d. Posivan kuvat. Viitattu 28.10.2019. http://www.posiva.fi/media/kuvat/vapankki?gfid_1359=81#gallery_1359.

Rautiainen, M. 2019. Tuore tamperelaistutkimus ratkaisee ydinvoimaloiden sulkemiseen liittyvää isoa ongelmaa – Näin radioaktiivisten materiaalien käsittelystä tulee nopeampaa, tehokkaampaa ja edullisempaa. Uutinen Tekniikka ja talous sivustolla. Viitattu 29.10.2019. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tuore-tamperelaistutkimus-ratkaisee-ydinvoimaloiden-sulkemiseen-liittyvaa-isoa-ongelmaa-nain-radioaktiivisten-materiaalien-kasittelysta-tulee-nopeampaa-tehokkaampaa-ja-edullisempaa/b441acff-37b8-4f26-926f-19579df1200a>.

Reed, S. 2017. Germany's Shift to Green Power Stalls, Despite Huge Investments. Uutinen The New York Times sivustolla. Viitattu 30.10.2019. <https://www.nytimes.com/2017/10/07/business/energy-environment/german-renewable-energy.html>.

Ropponen, I. 2017. Loviisan voimalaitoksen nestemäisten radioaktiivisten jätteiden kiinteytyslaitos. ATS Ydintekniikka, 46, 2, 20 -22. Viitattu 28.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2017_2.pdf.

Sahlberg, V. 2019a. Modernit pienreaktorit ja kaukolämpö. ATS jäsenkokous. Helsinki. Viitattu 22.10.2019. <https://www.ats-fns.fi/images/pictures/front-page/2019/sahlberg.pdf>.

Sahlberg, V. 2019b. Pienreaktorit. Mitä ne ovat? VTT. Viitattu 22.10.2019. file:///C:/Users/demo/Downloads/11_SMR_Sahlberg_2019.pdf.

Simon, J. 2019. Nuclear plant in Anglesey suspended by Hitachi. Uutinen BBC News sivustolla. Viitattu 25.10.2019. <https://www.bbc.com/news/business-46900918>.

Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. 2019. Tilasto Earth System Research Laboratory sivustolla. Viitattu 10.10.2019. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.

Trends in Atmospheric Methane. 2019. Tilasto Earth System Research Laboratory sivustolla. Viitattu 10.10.2019. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/.

Trends in Atmospheric Nitrous Oxide. 2019. Tilasto Earth System Research Laboratory sivustolla. Viitattu 10.10.2019. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_n2o/.

Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride. 2019. Tilasto Earth System Research Laboratory sivustolla. Viitattu 10.10.2019. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_sf6/.

Tulkki, V., Pursiheimo, E. & Lindroos, T. 2017. District heat with Small Modular Reactors (SMR). VTT. Viitattu 22.10.2019. <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2017/OA-District-heat-with-Small.pdf>.

Tulkki, V. 2018a. Paljon puhetta pienreaktoreista – miksi? ATS Ydintekniikka, 47, 1, 10-13. Viitattu 22.10.2019. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2018_1.pdf.

Tulkki, V. 2018b. Ydinvoimaviestinnän vaikeudesta – kolikon kääntöpuoli. Blogikirjoitus. Viitattu 23.10.2019. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/02/12/ydinvoimaviestinnan-vaikeudesta-hype/>.

Vaughan, A. 2019. Hitachi scraps £16bn nuclear power station in Wales. Uutinen The Guardian sivustolla. Viitattu 25.10.2019. <https://www.theguardian.com/business/2019/jan/17/hitachi-set-to-scrap-16bn-nuclear-project-anglesey-wales>.

Vesisärötys. N.d. Artikkelit Wikipedian sivustolla. Viitattu 13.10.2019. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Vesis%C3%A4r%C3%B6tys>.

VTT. 2017. Pienet SMR-reaktorit soveltuvat kaukolämmöntuotantoon. Artikkelit VTT sivustolla. Viitattu 23.10.2019. <https://www.vtt.fi/medialle/uutiset/pienet-srm-reaktorit-soveltuvat-kaukol%C3%A4mm%C3%B6ntuotantoon>.

Wind. N.d. Artikkelit IEA sivustolla. Viitattu 25.10.2019. <https://www.iea.org/topics/renewables/wind/>.

World Energy Council. 2019. World Energy Scenarios 2019. The future of nuclear: diverse harmonies in the energy transition. Viitattu 15.10.2019. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Nuclear_Scenarios_Report_FINAL.pdf.

