




Tutkimuksen/projektin nimi

# Ydinpolttoainekiertojen analysointiohjelmat

Kirjoittaja: Markku Anttila

Luottamuksellisuus julkinen

:

<b>Raportin nimi</b> Ydinpolttoainekiertojen analysointiohjelmat	
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b> Teollisuus- ja elinkeinoministeriö, Jaana Avolahti	<b>Asiakkaan viite</b> ad 13/2004KYT
<b>Projektin nimi</b> Suomalainen erotus- ja transmutaatiotekniikan tutkimus	<b>Projektin numero/lyhytnimi</b> 32750, TRANSMU 2009/KYT2010
<b>Raportin laatija(t)</b> Markku Anttila	<b>Sivujen lukumäärä</b> 11
<b>Avainsanat</b> kehittyneet ydinpolttoainekierrat	<b>Raportin numero</b> VTT-R-01073-10
<b>Tiivistelmä</b> <p>Kehittyneiden reaktorien ja polttoainekiertojen kansainvälisissä ja kansallisissa tutkimus- ja kehitysohjelmissa on viime vuosina kirjoitettu uusia ja päivitetty vanhoja tietokoneohjelmia, joilla voidaan arvioida ja suunnitella ydinenergian rauhanomaisen käytön tulevaisuutta. Viime vuosina näillä polttoainekiertojen analysointiohjelmissa on haluttu erityisesti tutkia, miten voitaisiin siirtyä mahdollisimman joustavasti termisten reaktorien käytöstä uraanivaroja tehokkaasti hyödyntävien nopeiden reaktorien aikakauteen. Ohjelmien perustehtävä on laskea materiaalitaseet tutkittujen polttoainekiertojen kaikissa vaiheissa ajan funktiona, jotta voidaan esimerkiksi arvioida, onko ydinpolttoainetta aina riittävästi ja paljonko loppusijoitettavaa ydinjätettä syntyy. Tuloksien perusteella voidaan päätellä muun muassa, millä aikataululla voidaan nopeita reaktoreita ottaa käyttöön ja, milloin uusia polttoainekiertopalveluja pitää rakentaa. Joillakin ohjelmilla voidaan hakea käyttäjän määrittelemien teknisten, taloudellisten ja toisinaan myös yhteiskunnallisten reunaehtojen näkökulmasta optimaalista ratkaisua. Tutkittava yksikkö voi olla voimayhtiö, yksittäinen valtio, valtior ryhmä tai koko maailma. Useimmissa analysointiohjelmissa käytetään ennalta laskettuja tietokantoja, mutta joissakin ohjelmissa on moduuleja, joilla käyttäjä voi itse laskea ydinpolttoaineen koostumustiedot sekä reaktorissa oloaikana että sen jälkeen. Ohjelmien uskottava käyttö edellyttää joka tapauksessa kykyä laskea itsenäisesti vastaavat suureet. Osa ohjelmista on vapaasti saatavissa, mutta kehittyneimmät ohjelmat ovat kaupallisia.</p>	
<b>Luottamuksellisuus</b>	julkinen
<b>Espoo 4.2.2010</b> <b>Allekirjoitukset</b>  Markku Anttila kirjoittaja	
 Petri Kotiluoto tiimipäällikkö	
 Timo Vanttola teknologiapäällikkö	
<b>VTT:n yhteystiedot</b> VTT, PL 1000, 02044 VTT	
<b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b> TEM: Jaana Avolahti. Carrum: Heikki Leinonen	
<b>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</b>	

## 1 JOHDANTO

Ydinpolttoainekiertojen analysointi perustuu tietoihin, olettamuksiin ja ennusteisiin yksittäisten reaktorien polttoainehuollosta ja ydinenergian hyödyntämisen laajuudesta.. Jokaisen ydinreaktorin polttoaineen käyttö suunnitellaan niin, että polttoaineesta saadaan mahdollisimman paljon energiaa asetettujen turvamarginaalien asettamissa rajoissa. Suunnittelulaskujen tuloksena saadaan sekä tulevilla käyttöjaksoilla tarvittavan että reaktorista poistettavan polttoaineen määrä ja ominaisuudet. Tiedoista on laskettavissa, paljonko kyseinen reaktori tarvitsee erilaisia polttoainekiertopalveluja. Niistä on myös pääteltävissä kohtuullisella tarkkuudella palvelujen tuleva käyttötarve, koska ydinreaktoreissa polttoaineratkaisut kehittyvät melko hitaasti. Vielä sitäkin vakaampia ovat yleensä kansalliseen päätöksentekoon perustuvat ydinpolttoainekierron perusratkaisut, kuten valinta avoimen ja suljetun polttoainekierron välillä.

Yksittäisten reaktorien tarpeista voidaan laskea ydinpolttoainekiertopalvelujen kokonaistarve erilaisissa yksiköissä (yhtiö, valtio, joukko valtioita, koko maailma). Vaikka yhtiöt eivät tavallisesti julkista ydinpolttoaineensa hankinnan ja käytön yksityiskohtia, niin ulkopuolinen arvioija kykenee tekemään omat laskunsa tiettyjen, usein kuitenkin melko tarkkojen oletusten pohjalta. Kun ennustetaan polttoainekiertopalvelujen kysyntää pitkällä aikavälillä, riittää hyvin, että tunnetaan eri reaktorityypeille lasketut keskimääräiset, materiaalitaseet. Ydinpolttoainekiertojen analysointi on siis yksinkertaisimmillaan yksittäisten reaktorien materiaalmäärien ja palvelutarpeiden yhteenlaskua. Ennusteiden tekijän pitää vain olettaa, miten ydinenergian tuotanto kehittyy tulevaisuudessa ja miten tuotanto jakaantuu eri reaktorityyppien kesken. Haasteellisin tehtävä on siirtymävaiheiden analysointi, mihin on syynä reaktorien ja muidenkin ydinlaitosten pitkät käyttöiät ja suuret investointikustannukset.

Ydinpolttoainekiertojen analysointi monimutkaistuu, jos siihen kytketään mukaan taloudelliset tekijät. Ydinpolttoainekierron eri osatekijöille voidaan tietysti olettaa joku perushintahinta ja sille joku todennäköinen vaihteluväli. Erilaisia vaihtoehtoja voidaan silloin vertailla keskenään varsinkin, jos oletetaan, että tarkasteltavassa järjestelmässä saavutetaan joku tasapainotilanne. Myös optimaalisen ratkaisun etsiminen annettujen reunaehtojen vallitessa on mahdollista.

Kansallisella päätöksenteolla on nykyisin useimmissa maissa ratkaiseva osuus, kun tehdään ratkaisuja ydinenergian tulevasta käytöstä. Useissa tapauksissa myös paikallisen väestön suhtautuminen voi vaikuttaa merkittävästi ydinpolttoainekiertolaitosten, uraanikaivosten rakentamisaikatauluihin. Viime vuosina etenkin Yhdysvalloissa ydinpolttoainekiertojen analysointiohjelmiin on alettu liittää malleja, joilla yritetään ottaa huomioon myös yhteiskunnallisen päätöksenteon vaikutus.

Tässä raportissa esitellään lyhyesti joitakin ydinpolttoainekiertojen analysointiohjelmiä. Tarkastelun kohteina ovat mallit, joita on käytetty Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ja OECD:n ydinenergiajärjestön (NEA) organisoimissa kansainvälisissä sekä johtavien ydinenergiamaiden Yhdysvaltain kehittyneiden ydinpolttoainekiertojen tutkimusohjelmissä.

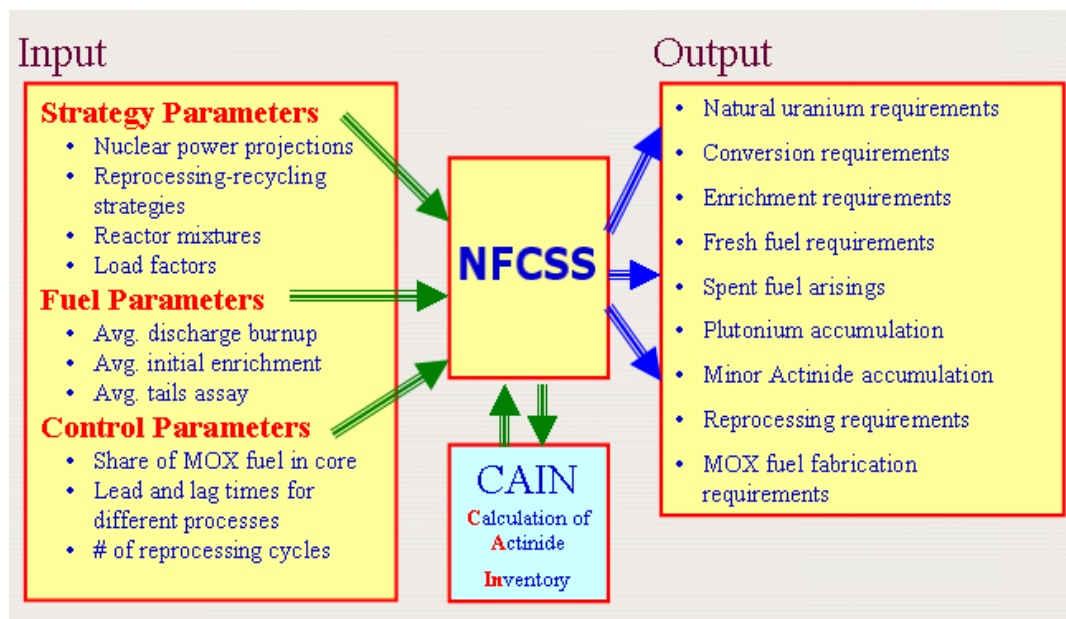
## 2 IAEA:N TUTKIMUSOHJELMISSA KEHITETYT OHJELMAT

### 2.1 Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS)

Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ydinenergiaosaston (Nuclear Energy Department) ydinpolttoainekierto- ja ydinjätehuoltoon liittyvistä toiminnoista vastaavassa toimistossa on kehitetty useiden vuosien ajan Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS) – ohjelmaa. Se tunnettiin aiemmin nimellä VISTA (IAEA 2007). IAEA:n jäsenvaltioiden tutkijat voivat käyttää ohjelmaa vapaasti, mutta pääsy ohjelman kotisivuille (<http://www-nfcis.iaea.org/NFCSS/NFCSSMain.asp?RightP=Background>) edellyttää rekisteröitymistä.

NFCSS arvioi käyttäjän määrittelemän polttoainekierron materiaalitaseen ja sen toteuttamiseen tarvittavien tuotanto- ja huoltopalvelujen määrän. Ohjelman syöttötiedot ja perustulokset on esitetty kuvassa 1. Syöttötiedot on jaettu kolmeen osaan. Käyttäjän pitää määrittellä tutkimansa järjestelmän osatekijät, joita ovat:

- reaktorien tyypit, nimellistehot ja käyttökerroimet
- reaktorien polttoaineen peruspiirteet
- jälleenkäsittelyn osuus ja toteutus käytetyn ydinpolttoaineen huollossa.



Kuva 1. NFCSS-ohjelman syöttö- ja tulostussuureet (<http://www-nfcis.iaea.org/NFCSS/NFCSSMain.asp?RightP=Description&EPAGE=1>).

CAIN-ohjelman avulla käyttäjä voi laskea materiaalitaseita (aktinidikoostumuksia) ajan funktiona, jos hän haluaa tarkastella joidenkin oletusten, esimerkiksi varastointiaikojen, vaikutuksia (IAEA 2007).

NFCSS-ohjelmasta on nykyisin käytettävissä myös ns. täydennetty versio (full version), jonka reaktorilistalla on perusversiota enemmän reaktoriyypejä, Mukaan on otettu nopeita reaktoreita, korkealämpötilareaktoreita ja myös kiihdytinavusteinen laitos (ADS). Myös polttoainevaihtoehtoja on täydennetyssä versiossa aiempaa enemmän (Fesenko & Ceyhan 2009).



## 2.2 Dynamic of Energy System – Atomic Energy (DESAE)

Dynamic of Energy System – Atomic Energy (DESAE) –ohjelmisto on kehitetty Venäjällä Kurtshatov-instituutissa osana IAEA:n organisoimaa International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) –tutkimusohjelmaa (Andrianova, Davidenko & Tsibulskiy. 2008, 2009).

DESAE:n avulla voidaan tutkia, miten ydinenergian hyväksikäytön pitkän aikavälin kasvu on parhaiten toteutettavissa. Ohjelmistossa on nykyisin tietokannat 20 reaktoriyyppille, joten sillä sanotaan voitavan analysoida melkein kaikkia ajateltavissa olevia ydinpolttoainekierto- vaihtoehtoja. Käytettävissä olevan aineiston perusteella DESAE on joiltakin peruslähtökohdiltaan hyvin samanlainen kuin NFCSS. Kumpikin ohjelma käyttää hyväkseen edeltä käsin tehtyjä tietokantoja. DESAE on suunniteltu interaktiiviseksi siten, että sen käyttäjä voi helposti testata eri oletusten ja lähtötietojen vaikutusta lopputuloksiin..

INPRO-jäsenmaiden tutkijat voivat halutessaan saada DESAE-ohjelmiston käyttöönsä. Muiden osalta käyttöoikeus ratkaistaan tapauskohtaisesti (IAEA 2009).

## 3 YHDYSVALLOISSA KEHITETTYJÄ YDINPOLTTOAINE- KIERTOJEN ANALYSOINTIOHJELMIA

Yhdysvalloissa aloitettiin uudelleen 1990-luvun lopulla kehittyneiden reaktorien ja polttoainekiertojen tutkimus- ja kehitystyö (mm. Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) ja Global Nuclear Energy Initiative (GNEP)). Yhtenä tavoitteena oli siirtyä avoimesta polttoainekierrosta mahdollisimman pitkälle suljettuun kiertoon, jotta geologista loppusijoitusta vaativan ydinjätteen määrää voitaisiin pienentää. Suunnitellun siirtymävaiheen analysointiin kehitettiin Yhdysvalloissa useita tietokoneohjelmia, joista osaa parannetaan ja täydennetään jatkuvasti.

### 3.1 NUCSim

NUCSim on Los Alamosin kansallisessa laboratoriossa 2000-luvun alussa kehitteillä ollut ydinpolttoainekiertojen analysointiohjelma (Schneider, Bathke & James, 2004). Ohjelman lähtökohtana oli seurata periaatteessa jokaisen polttoaine-erän kulkua koko polttoainekierron läpi. Niin saatavista tiedoista oli tarkoitus arvioida esimerkiksi, millaisia polttoainekierto- palveluja jokin Yhdysvaltain ydinenergian tulevaa käyttöä koskeva skenaario vaatisi ja miten palvelujen tarve voitaisiin tyydyttää. Yksi ajateltu sovellutuskohde oli tutkia vähittäistä siirtymistä avoimesta suljettuun polttoainekiertoon. Ohjelmalla piti kyetä tekemään myös kustannuslaskelmia.

NUCSim:n tarvitsemat tietokannat laskettiin LACE-ohjelmalla, jota voi käyttää kiinteänä osana NUCSim:ä tai itsenäisesti. Edellinen vaihtoehto oli kaiketi suositeltu vaihtoehto. LACE:n tehtävänä oli tuottaa tietyn reaktorin materiaalitase käyttäjän antamien ehtojen mukaisesti. Tavoitteen saavuttamiseen käytettiin ns. lineaarista reaktiivisuusmallia, joka kytkee yhteen polttoaineen alkuperäisen väkevöintiasteen, halutun poistopalaman ja polttoaineen reaktiivisuuden. Kriittisessä reaktorissa reaktiivisuus on nolla, kun poistopalama on saavutettu. Lineaarista reaktiivisuusmallia on sovellettu yleensä uraanipolttoainetta käyttävien kevytvesireaktorien laskentaan, mutta LACE:n piti kyetä simuloimaan myös muita reaktoreita ja polttoaineita. Materiaalitaseen kehitystä säteilytyksen jälkeen seurattiin ORIGEN2-ohjelman avulla.

NUCSim-ohjelman kehitystyö näyttäisi päättyneen kesken eikä sitä liene vapautettu yleiseen käyttöön, kuten oli suunniteltu (Bathke, et al. 2004).

### 3.2 VISION

VISION (Verifiable Fuel Cycle Initiative) on Idahon kansallisessa laboratoriossa (INL) kehitetty dynaaminen simulointimalli, jolla voidaan tarkastella erilaisia ydinenergian hyväksikäytön kasvuskenaarioita ja niihin vaikuttavien teknisten ja myös yhteiskunnallisten tekijöiden vuorovaikutuksia (Jacobson, et al., 2009a ja 2009b, Piet, et al., 2009). Sillä voidaan tehdä myös kustannusvertailuja (Taylor, Shropshire & Jacobson 2008). Kuvassa 2 on kaaviokuva VISION-ohjelman malleista, jotka kuvaavat ydinpolttoainekierron mahdollisia prosesseja ja laitoksia.

VISION käyttää hyväksi kaupallista ns. systeemidynamiikan (system dynamics) PowerSim Studio -työkalua. Syöttötietojen ja tulosten käsittely perustuu Microsoftin Excel- taulukkolaskentaohjelmistoon.

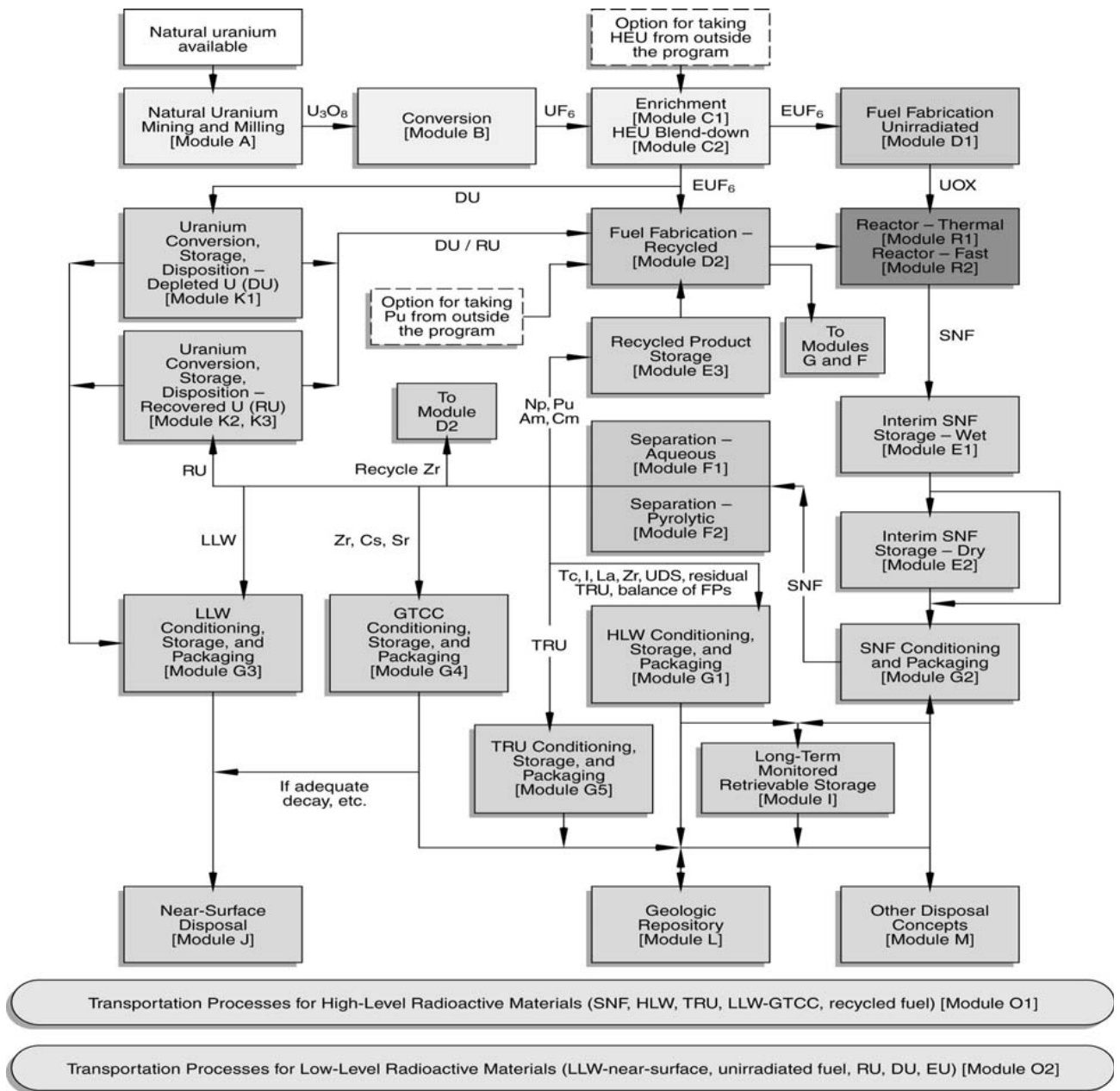
VISION-ohjelmalla ei voi tehdä mitään neutroniikkalaskuja, vaan reaktorien ja muiden laitosten materiaalitaseet pitää laskea erikseen. Ohjelma interpoloi taulukoiduista arvoista tarkasteltavaan tilanteeseen sopivat arvot. Siinä on mallinnettu vain sellaisia vaihtoehtoja, joiden on arvioitu olevan teknisesti käyttökelpoisia vuoteen 2025. Tavoitteena on laajentaa mahdollisten polttoainekiertojen valikoimaa.

### 3.3 DANESS

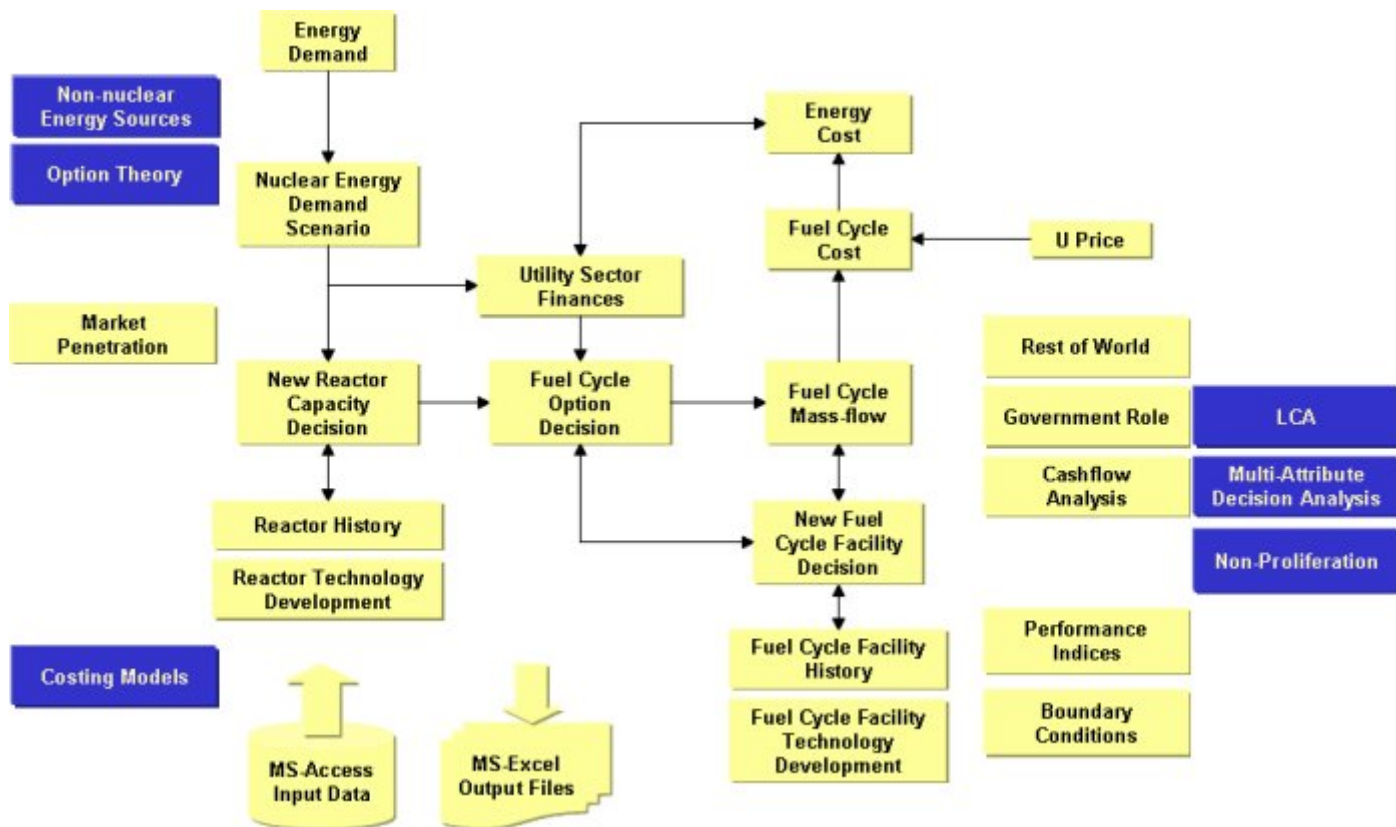
DANESS (Dynamic Analysis of Nuclear Energy System Strategies) on puolestaan Argonnen kansallisen laboratorion jo noin vuosikymmenen ajan kehittämä ohjelmisto ydinenergian hyödyntämisen teknis-taloudelliseen arviointiin (Van Den Durpel, et al., 2003, 2006). Sillä on omat kotisivunsa (<http://www.daness.anl.gov/>), jotka jakaantuvat kaikille avoimeen ja vain lisensoiduille käyttäjille tarkoitettuun osaan. DANESS –ohjelmiston viitisen vuotta vanha versio 1.0 on saatavissa yhdysvaltalaisesta tietokoneohjelmistokeskuksesta. RSICC:stä (RSICC Code Package PSR-555). Ohjelmiston uusin versio lienee v4.2, joka otettiin käyttöön vuonna 2008 (Van Den Durpel, et al., 2009a, 2009b). DANESS:n rakennetta selvittää kuva 3.

DANESS perustuu VISION:n tavoin. systeemidynaamiseen malliin ja käyttää hyväkseen iThink-ohjelmistoa, jonka versio 9.1.2 teki mahdolliseksi poistaa joitakin rajoituksia DANESS:n nykyisestä versiosta. Samalla voitiin parantaa mallinnuksen tasoa (hierarkkinen mallinnus).

DANESS-simuloinnin lähtökohtana on vallitseva tilanne, mikä tarkoittaa tietyn ydinjärjestelmän yksiköiden (reaktorit ja muut ydinlaitokset mukaan lukien materiaalivarannot) muodostamaa kokonaisuutta. Sen jälkeen ohjelma valitsee käyttäjän määrittelemien ehtojen mukaisesti sopivimman tavan rakentaa reaktoreita ja muita polttoainekiertoalaitoksia. DANESS käyttää hyväkseen ennalta laskettuja tietokantoja, mutta ohjelmassa on myös moduuli, jolla voidaan laskea nopeiden reaktorien tuoreen ja käytetyn polttoaineen koostumuksia



Kuva 2. VISION-ohjelman toimintakaavio (Jacobson, et al., 2009)



Kuva 3. DANESS-ohjelman rakenne (<http://www.daness.anl.gov/flowsheet.htm>)

### 3.4 GENIUS

GENIUS (Global Evaluation of Nuclear Infrastructure Utilization Scenarios) –ohjelman ensimmäinen versio tehtiin Idahon kansallisessa laboratoriossa (Dunzik-Gougar, et al. 2007). mutta vuodesta 2007 alkaen sitä on kehitetty lähinnä Wisconsin-Madisonin yliopistossa (Oliver, et al. 2009). Perustavoitteena on saada aikaan työkalu, jolla voidaan tutkia erityisesti kansainvälisten ydinpolttoainekiertoilaitosten keskinäisiä riippuvuuksia. Taustalla on presidentti George W. Bushin vuonna 2006 käynnistämä Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) –hanke, jolla pyrittiin muun muassa luomaan proliferaatoriskiä vähentäviä kansainvälisiä polttoainekierto ratkaisuja.

Oliopohjaiseen ohjelmointiin perustuvan GENIUS-ohjelman nykyisessä versiossa (v2), polttoainekiertoilaitokset määritellään hierarkkisesti (alue – omistava instituutio – laitos). Siten kuhunkin perusyksikköön voidaan liittää sitä koskevat reunaehdot, kuten kustannustekijät ja säännöt, joita tulee noudattaa muiden yksiköiden kanssa tehtävässä yhteistyössä.

GENIUS käyttää hyväkseen ennalta laskettuja tietokantoja, mutta periaatteessa siihen voidaan kytkeä materiaalitaseita laskevia moduuleja. Ohjelmaa on tähän mennessä testattu VISION-tuloksien avulla eikä suuria eroja ole havaittu (Oliver, et al., 2009).

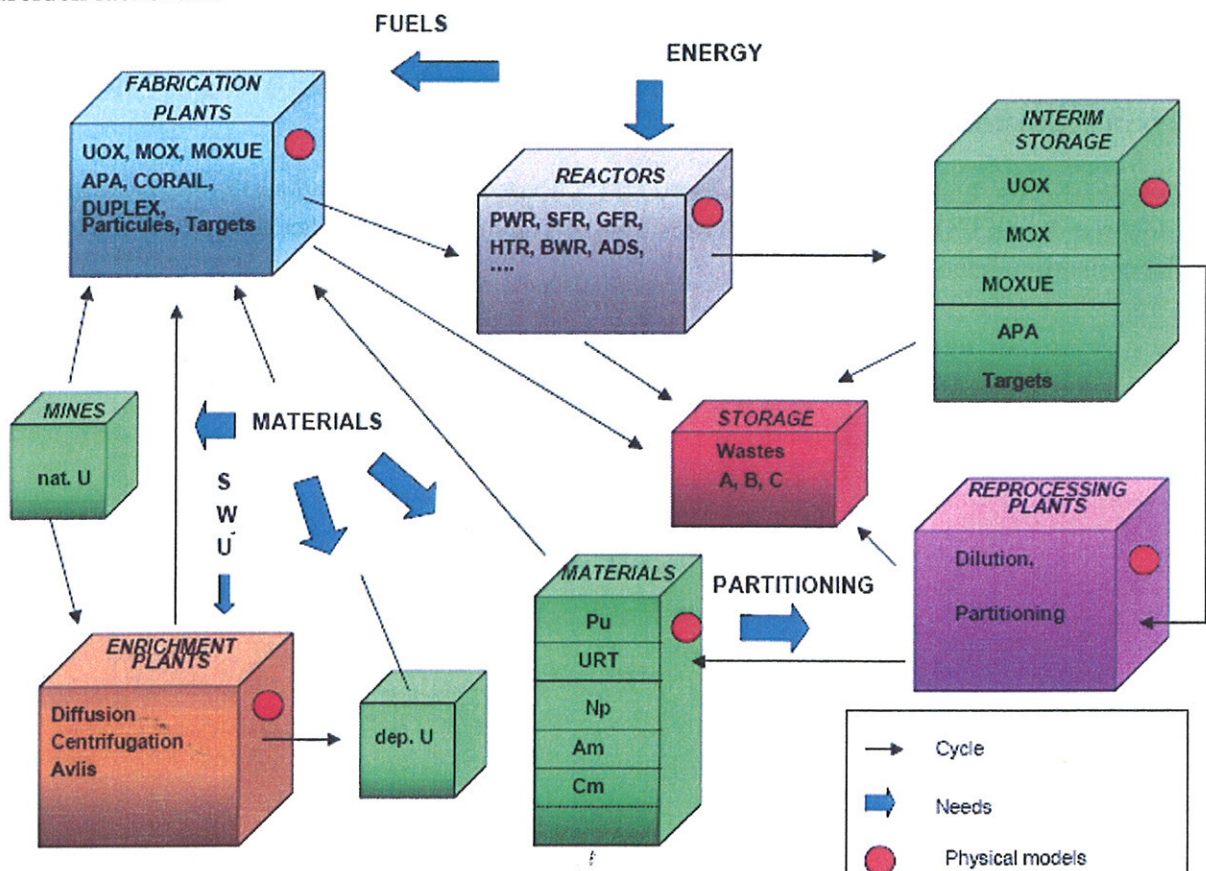


## 4 RANSKASSA KEHITETTY YDINPOLTTOAINEKIERTOJEN ANALYSOINTIOHJELMA COSI

Ranskan ydintutkimuskeskus CEA on kehittänyt COSI-ohjelmaa noin 20 vuoden ajan. Ohjelma uudistettiin perusteellisesti vuonna 2006, jolloin sen nimeksi tuli COSI 6. Sen jälkeen ohjelmaa on päivitetty siten, että joulukuussa 2009 julkistettiin versio COSI 6 V6.0.0 (Meyer & Boucher 2009).

COSI-ohjelma simuloi käyttäjän määrittelemää joukkoa ydinreaktoreita ja niiden tarvitsemia ydinpolttoainekiertolaitoksia, kuten kuvasta 6 voi todeta. Ohjelma soveltuu hyvin kuvaamaan erilaisia muutoksia ydinenergiajärjestelmässä sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Viime vuosina sitä on sovellettu aktiivisesti, kun tutkittu mahdollista siirtymistä kevytvesi-reaktoreista nopeisiin reaktoreihin (esim. Salvatores, et al. 2009). COSI 6 on Ranskan ohella käytössä myös Italiassa ja Saksassa (Meyer & Boucher 2009).

COSI-versioissa erilaisten polttoaineratkaisujen materiaalitaseet lasketaan ohjelmaan kytketyillä palamalaskentamalleilla, joista CESAR on ollut käytössä pisimpään. CESAR:a on myös päivitetty jatkuvasti niin, että se sekä käyttää uusimpia ydinvakioita että seuraa yhä useampien aktinidien, fissiotuotteiden ja myös aktivoitumistuotteiden pitoisuuksien muutoksia. Vuoden 2009 alussa tehdyssä päivityksessä COSI 6:een lisättiin mahdollisuus käyttää ERANOS 2.1 –ohjelmistoa nopeiden reaktorien polttoaineen palamalaskentaan. Viimeisimmillä COSI 6 –päivityksillä on pyritty parantamaan ydinjätehuoltoon liittyvien suureiden laskentaa.



Kuva 4. COSI-simulointiohjelman rakenne (NEA 2006).

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kehittyneiden reaktorien ja polttoainekiertojen kansainvälisissä ja kansallisissa tutkimus- ja kehitysohjelmissa on viime vuosina kirjoitettu uusia ja päivitetty vanhoja tietokoneohjelmia, joilla voidaan arvioida ja suunnitella ydinenergian rauhanomaisen käytön tulevaisuutta. Erityisesti Yhdysvalloissa on oltu hyvin aktiivisia uusien analysointityökalujen kehittämisessä ja tavoitteet ovat olleet usein hyvin kunnianhimoisia.

Viime vuosina näillä polttoainekiertojen analysointiohjelmissä on haluttu tutkia erityisesti, miten voitaisiin siirtyä mahdollisimman joustavasti termisten reaktorien käytöstä uraanivaroja tehokkaasti hyödyntävien nopeiden reaktorien aikakauteen. Ohjelmien perustehtävä onkin laskea materiaalitaseet tutkittujen polttoainekiertojen kaikissa vaiheissa ajan funktiona, jotta voidaan esimerkiksi arvioida, onko ydinpolttoainetta aina riittävästi ja paljonko loppusijoitettavaa ydinjätettä syntyy. Tuloksien perusteella voidaan päätellä muun muassa, millä aikataululla voidaan nopeita reaktoreita ottaa käyttöön ja, milloin uusia polttoainekiertopalveluja pitää rakentaa. Ohjelmilla voidaan hakea käyttäjän määrittelemien teknisten, taloudellisten ja toisinaan myös yhteiskunnallisten reunaehtojen näkökulmasta optimaalista ratkaisua. Tutkittava yksikkö voi olla voimayhtiö, yksittäinen valtio, valtioryhmä tai koko maailma.

Useimmissa tutkituista analysointiohjelmissä käytetään ennalta laskettuja tietokantoja, mutta esimerkiksi ranskalaisessa COSI 6-ohjelmassa on varsin kehittyneitä moduuleja, joilla käyttäjä voi itse laskea määrittelemänsä ydinpolttoaineen koostumustiedot sekä reaktorissa oloaikana että sen jälkeen. Analysointiohjelmien uskottava käyttö edellyttää joka tapauksessa kykyä laskea itsenäisesti vastaavat suureet.

Osa ohjelmista, kuten IAEA:ssa kehitetty NFCSS, on vapaasti saatavissa. Kehittyneimmät ohjelmat, kuten COSI 6 ja DANESS ovat kaupallisia ja niiden käyttöoikeus edellyttää lisenssisopimuksen tekemistä.

## LÄHDEVIITTEET

Andrianova, E., et al., 2009, The interactive model for quantitative assessment of nuclear energy systems. Code DESAE and modernisation for DESAE-2.2. Workshop on IAEA Tools for Nuclear Energy System Assessment for Long-Term Planning and Development, 20-23 July 2009, Vienna, Austria, [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/INPRO/Files/2009-Jul-WS/26-Mr.Tsibulskiy-Desae2.2\\_draft.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/INPRO/Files/2009-Jul-WS/26-Mr.Tsibulskiy-Desae2.2_draft.pdf).

Andrianova, E, Davidenko, V., Tsibul'skii, V., DESAE Program for Systems Studies of Long-Term Growth of Nuclear Power. Atomic Energy, Vol. 105, No. 6, 2008.

Bathke, C., et al., 2004, Preparations for NFCSim Code Release. AFCI Winter Semi-Annual Meeting, February 23-27, 2004. Los Alamos National Laboratory (poistettu LANL:n verkkosivuilta)

Boucher, L., Grouiller, J. 2005, "COSI": A Simulation Software for a Pool of Reactors and Fuel Cycle Plants. Proc. of 13<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, Beijing, China, May 16-20, 2005, ICONE 13-50253.

Coquelet, C. et al., 2009,. Comparison of Different Options for Transmutation Scenarios Studied in the Frame of the French Law for Waste Management. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9218 (CD-ROM, SFEN).

Dunzik-Gougar, M., et al., 2007, Global Evaluation Of Nuclear Infrastructure Utilization Scenarios (GENIUS). Proc. of the Global 2007 conference, Boise, Idaho, September 9-13, 2007 (CD-ROM, ANS).

Grouiller, J.-P. et al., 2007, Application with COSI code of GEN IV Fast Reactors Introduction in the French Park. Proc. of the Global 2007 Conference, Boise, Idaho, September 9-13, 2007 (CD-ROM, ANS).

International Atomic Energy Agency (IAEA 2007), Nuclear Fuel Cycle Simulation System (VISTA). IAEA-TECDOC-1535. 95p ([http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1535\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1535_web.pdf)).

International Atomic Energy Agency (IAEA 2009), Summary Report of the Workshop on IAEA Tools for Nuclear Energy Systems Assessment for Long-Term Planning and Development, <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/INPRO/Files/2009-Jul-WS/Final-Draft-WS-Summary-Report.pdf>

Fesenko G., Ceyhan M , 2009, Overview of Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS). Workshop on IAEA Tools for Nuclear Energy System Assessment for Long-Term Planning and Development, 20-23 July 2009, Vienna, Austria,

Jacobson, J., et al., 2009a, VISION: Verifiable Fuel Cycle Simulation Model. Advances in Nuclear Fuel Management (ANFM 2009), Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2009).

Jacobson, J., et al., 2009b, VISION: Verifiable Fuel Cycle Simulation Model. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9312, (CD-ROM, SFEN).

Meyer, M., Boucher, L., 2009, New Developments on COSI 6, the Simulation Software for Fuel Cycle Analysis. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9203 (CD-ROM, SFEN).

OECD Nuclear Energy Agency, Nuclear Science (NEA 2006), Physics and Safety of Transmutation Systems. Status Report. OECD 2009, ISBN 92-64-01082-3. 120p.

Oliver, K., et al., 2009, Studying international fuel cycle robustness with the GENIUSv2 discrete facilities/materials fuel cycle systems analysis tool. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9166, (CD-ROM, SFEN).

Piet, S., et al., 2009, Lessons Learned from Dynamic Simulations of Advanced Fuel Cycles. Advances in Nuclear Fuel Management (ANFM 2009), Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2009

Radiation Safety Information Computational Center (RSICC PSR-555), DANESS V1.0: Dynamic Analysis of Nuclear Energy Systems Strategies. RSICC Code Package PSR-555.

Salvatores, M., et al., 2009, Nuclear fuel cycle synergies and regional scenarios for Europe. OECD/NEA Nuclear Science. 36p.

Schneider, E., Bathke, C., James, M., 2005, NFCSim: A Dynamic Fuel Burnup and Fuel Cycle Simulation Tool. Nuclear Technology, 151, 35-50.

Taylor, J., Shropshire, D., Jacobson, J., 2008 A VISION of Advanced Nuclear System Cost Uncertainty. Idaho National Laboratory, INL/CON-07-13312 PREPRINT (ICONE 16).

Van Den Durpel, L., et al., 2003, DANESS: Dynamic Analysis of Nuclear Systems Strategies. Proc. of Global 2003, New Orleans, Louisiana, USA, November 15 - 20, 2003, p. 1613 -1620 (CD-ROM, ANS).

Van Den Durpel, L., Wade, D., Yacout, A. 2006, DANESS: a system dynamics code for the holistic assessment of nuclear energy system strategies. Conference Proceedings of the 24th International Conference of the System Dynamics Society, July 23-27, 2006 Nijmegen, The Netherlands, <http://www.systemdynamics.org/conferences/2006/proceed/papers/-VAND499.pdf>.

Van Den Durpel, L., et al., 2009a, DANESS v4.2: Overview of Capabilities, Developments and Applications. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9501 (CD-ROM, SFEN).

Van Den Durpel, L., de Preter, P., Lalieux, P., 2009b, Comparative Assessment of long-term waste management options for high-level and/or long-lived radioactive waste in Belgium. Proc. of Global 2009, Paris, France, September 6-11, 2009, Paper 9500 (CD-ROM, SFEN).