
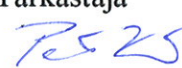



Sivuaktinidien poltto kevytvesireaktorissa

Kirjoittajat: Karin Rantamäki

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Sivuaktinidien poltto kevytvesireaktorissa		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Jaana Avolahti, TEM	Asiakkaan viite 4/2011KYT	
Projektin nimi Kehittyneet polttoainekierrat – Laskennallinen polttoainekiertoanalyysi	Projektin numero/lyhytnimi 73660/KEPLA	
Raportin laatija(t) Karin Rantamäki	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 9/	
Avainsanat kehittyneet ydinpolttoainekierrat, sivuaktinidi, MOX, CASMO-4E, SIMULATE	Raportin numero VTT-R-07384-11	
Tiivistelmä <p>Tässä työssä toistettiin aiemmassa VTT:llä tehdyssä tutkimuksessa tehdyt laskut. Edellisessä työssä tehdyt laskut tehtiin SIMULATE-versiolla, jossa ei ollut MOX-polttoaineelle sopivaa neutroniikkamallia. MOX-sydämessä termisen neutronivuon gradientit ovat niin suuria, että perusneutroniikkamallit eivät niihin sovellu. Nyt VTT:lle on kuitenkin hankittu SIMULATEsta versio, jossa on mukana tämä laajennettu neutroniikkamalli, ja jota siis käytettiin tässä työssä tehtyihin laskuihin.</p> <p>MOX-sydämellä havaitut muutokset edellisen työn tuloksiin olivat pieniä. EU1-polttoaineella lasketun sydämen tasapainolataus saavutettiin muutamaa jaksoa myöhemmin, kuin edellisessä työssä. Loppupään jaksojen pituudet olivat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan, joten kyse on varsin pienestä erosta. Kriittisen boorin määrässä ja poistopalamassa ei kovin suuria eroja nähty. Myös aktinidien massataseet olivat hyvin samanlaiset kuin edellisessä työssä. Valitettavasti täytyy todeta, ettei sivuaktinidien poltto onnistunut tälläkään kertaa.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Espoo 19.10.2011 Laatija  Karin Rantamäki, erikoistutkija	Tarkastaja  Petri Kotiluoto, johtava tutkija	Hyväksyjä  Timo Vanntola, teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) TEM: Jaana Avolahti VTT: Karin Rantamäki, Silja Häkkinen		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	3
2 Menetelmät.....	3
3 Tulokset.....	5
4 Yhteenveto	7
Lähdeviitteet	8

1 Johdanto

Sivuaktinidit (neptunium, amerikium ja curium) ovat korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen kannalta hankalia, koska niiden puoliintumisajat ovat pitkiä useimpiin fissio tuotteisiin verrattuna. Alfasäteilijöinä niiden radiotoksisuus on merkittävä. Kehittyneissä polttoainekiertoissa on mahdollista polttaa sivuaktinideja etenkin, jos käytettävissä on nopeita reaktoreita. Myös termisissä reaktoreissa voidaan ainakin rajoittaa sivuaktinidien määrän kasvua, jos polttoainekierto suunnitellaan hyvin.

VTT:llä on aiemmin tutkittu sivuaktinidien polttoa kehittyneen MOX-teknologian avulla Monte Carlo –menetelmällä [1] sekä deterministisillä menetelmillä kaksi- tai kolmedimensiöisenä probleemana [2-4]. Nämä jälkimmäiset tutkimukset on tehty joko pelkästään CASMOlla [6,7] tai CASMO-SIMULATE yhdistelmällä [8]. SIMULATE laskut on kuitenkin tehty perusversiolla, jonka tavanomaiset neutroniikkamenetelmät eivät suoriudu kovin hyvin MOX-reaktorin jyrkistä vuogradienteista. VTT:lle on kuitenkin hankittu SIMULATEsta versio, jossa on laajennettu neutroniikkamalli. Tämän mallin pitäisi suoriutua myös MOX-polttoaineen mallinnuksesta. Tässä työssä lasketaan uudelleen aiemmassa työssä [4] lasketut laskut käyttäen tätä uutta SIMULATE-versiota paremmalla neutroniikkamallilla.

Koska tässä työssä on lähinnä toistettu edellisessä työssä [4] tehdyt laskut ei esim. EPR:n parametreja ja erityispiirteitä enää tässä raportoida. Luvussa 2 esitellään kuitenkin työn kannalta oleelliset osat laskentamallia. Työssä saadut tulokset esitetään luvussa 3. Luvussa 4 annetaan lyhyt yhteenveto.

2 Menetelmät

Työ on toteutettu Studsvik Scandpowerin CMS-paketilla [5-10]. Polttoaineen lämpötilan arviointiin käytettävää INTERPIN-ohjelmaa [5] ei tässä yhteydessä käytetty. SIMULATE-3:n [8] tarvitsema lämpötilataulukko samoin kuin tarvittavat syöttötiedostot olivat jo ennestään olemassa. Polttoaineniippujen reaktorifysikaaliset vakiot laskettiin CASMO-4E:n [6,7] uudella versiolla käyttäen ENDF/B-VI-pohjaista vaikutuslakirjastoa e60201 [9] ja CMSLINKillä [10] tehtiin CASMO-tuloksista SIMULATE-3:n tarvitsemat kirjastot. Käytetyt ohjelmat ja niiden versiot on esitetty taulukossa 1. Lienee syytä huomauttaa, että MOX-laskuihin soveltuvasta versiosta puuttuu useita piirteitä, jotka voivat olla oleellisia mm. TVO:lle tehtävien töiden yhteydessä.

Taulukko 1: Studsvikin CMS-pakettiin kuuluvat ohjelmat ja niiden VTT:llä käytössä olevat versiot sekä luontipäivät.

Ohjelma	Versio	Luontipäiväys
INTERPIN	v3.03	2001/04/18
CASMO-4E	v2.10.22P_VTT	2011/01/27
CMSLINK	v1.27.00	2011/01/20
SIMULATE-3	v6.09.22_MOX_4	2010/11/04
	v6.09.10_TVO_22	2007/12/12

Studsvik Scandpowerilta saatiin tietää edellisen työn [4] aikana, että SIMULATE-3:n tavanomaiset neutroniikkamenetelmät eivät ole riittäviä mallintamaan MOX-sydäntä [11]. Tämä johtuu siitä, että MOX-sydämessä termiset vuogradientit ovat niille liian jyrkkiä. Vaikka las-

kut konvergoituvat, niin tulokset eivät silti välttämättä ole kovin hyviä. Tässä työssä on siis käytetty tämän laajennuksen sisältävää versiota, v6.09.22_MOX_4.

Edellisen työn kuluessa koottiin laskujen tekemiseksi skripti-paketti Mambo [12]. Tämä paketti helpottaa tasapainolatauksen laskemista SIMULATE-ohjelmalla. Laskentaa varten tarvitaan syöttötiedoston malli sekä nippujen siirrot sisältävä tiedosto. Mambo-paketti ja tarvittavat tiedostot siirrettiin VTT:n ahjo-klusterille (esptt3m003.ad.vtt.fi), jolla tämän työn laskut laskettiin. Tiedostojen sijainnit kyseisellä koneella on annettu taulukossa 2. Mambo-paketissa SIMULATE-ajoja toistetaan kunnes löytyy tasapainolataus, jossa kaksi peräkkäistä jaksoa ovat yhtä pitkiä. Jakson pituus on määritetty siten, että kriittisen boorin määrä on 10 ppm. Kullekin jaksolle määritetään lisäksi kriittisen boorin määrä jakson alussa sekä poistopalama jakson lopussa. Tasapainolataukselle määritetään vielä aktinidien massat jakson alussa ja lopussa.

Simulointimalli ja EPR-reaktorin nippu on kuvattu tarkasti edellisen työn raportissa [4]. Siksi tähän raporttiin on koottu vain työn kannalta tärkeimmät tiedot. Taulukossa 3 on esitetty CASMO- ja SIMULATE-laskuissa käytettyjen MOX-polttoaineiden parametreja. Taulukossa 4 on puolestaan annettu työssä käytetty plutoniumvektori.

Taulukko 2: Työssä käytettyjen tiedostojen sijainti Ahjolla (esptt3m003.ad.vtt.fi).

Tiedostot	Hakemisto	Kommentti
CASMO input	/home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/lib/casmo/ /home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/lib/reflector/	Niput Heijastimet
CMSLINK input	/home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/lib/	
SIMULATE input	/home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/UO2 /home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/EU1 /home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/EU2	
Mambo input	amat kuin edellä	
Siirtokartat ja malli-input	/home/prokmr/KYT/KEPLA/MAM-EPR/	
Mambo-paketti	/home/prokmr/bin/Mambo/ /home/prokmr/bin	Varsinainen Apu.pm

Taulukko 3: CASMO- ja SIMULATE-ohjelmissä käytettyjä MOX-polttoaineiden parametreja [13, s.149].

	EU1		EU2	
SIM-nimi	epr-eu1-428-0gd	epr-eu1-428-12gd	epr-eu2-287-0gd	epr-eu2-287-12gd
Polttoainetunnus	EU10	EU1G	EU20	EU2G
Uraanin väkevöinti [%]	3,48	3,48	5,85	5,85
Gd-sauvaajen määrä	0	12	0	12
Pu-pitoisuus [%]	10	10	6,7	6,7
Fissiilin Pu:n pitoisuus [%]	4,28	4,28	2,87	2,87

Taulukko 4: Tässä työssä käytetty plutoniumvektori [14]. EU1:llä ²⁴¹Am:n osuus on siirrettiin ²⁴²Pu:lle.

²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am
4,3	36,6	26,8	11,0	20,2	1,1

3 Tulokset

Mambo-paketin [12] avulla laskettiin EPR-reaktorin sydänsimulaatio. Aluksi sydän ladattiin pelkällä UO_2 polttoaineella. Tasapainon saavuttamiseen tarvittiin 9 jaksoa. Jaksojen pituudet on esitetty taulukossa 5. Samassa taulukossa on myös annettu kriittisen boorin määrä jakson alussa sekä poistopalamat jakson lopussa. Erot edelliseen työhön verrattuna ovat mitättömät, kuten olettaa sopiinkin. Työn tässä vaiheessa polttoaineena ei käytetty MOXia, joten perus-neutroniikkamallin pitäisi olla riittävä.

Tasapainojakson massatase on esitetty taulukossa 6. Siinä on annettu aktinidien massat jakson alussa ja lopussa. Myös näiden erotus on laskettu taulukkoon. Poikkeamat edellisiin tuloksiin ovat hyvin pieniä, kuten oli odotettavissa.

Taulukko 5: UO_2 -jaksojen pituudet, booripitoisuudet jaksojen alussa sekä poistopalamat.

Jakso	Jakson pituus [EFPD]	C_B alussa [ppm]	Poistopalama [MWd/kgU]
c1	501	1036	
c2	362	1070	24,93 +- 1,58
c3	389	1233	34,90 +- 3,33
c4	437	1448	46,80 +- 2,05
c5	449	1500	58,68 +- 2,03
c6	439	1460	59,43 +- 2,03
c7	440	1468	59,68 +- 2,09
c8	441	1470	59,75 +- 2,03
c9	441	1471	59,67 +- 2,04

Taulukko 6: Aktinidien massat UO_2 -tasapainojakson alussa (BOC) ja lopussa (EOC) sekä näiden välinen ero. Yksikkönä on metrinen tonni.

	Am-241	Cm-242	Cm-244	Np-237
BOC	3,60E-03	1,00E-03	2,60E-03	0,038
EOC	5,60E-03	2,00E-03	7,60E-03	0,064
ERO	2,10E-03	1,00E-03	5,00E-03	0,026

	U-234	U-235	U-236	U-238
BOC	0,037	3,524	0,463	118,015
EOC	0,03	2,235	0,676	116,761
ERO	-6,90E-03	-1,289	0,213	-1,255

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
BOC	0,013	0,505	0,158	0,102	0,032
EOC	0,027	0,687	0,246	0,161	0,065
ERO	0,014	0,182	0,088	0,059	0,033

Tasapainosydämeen alettiin ladata MOX-polttoainetta siten, että tuoreet niput olivat MOX-nippuja. Tämä tehtiin kahdelle MOX-tyypille, jotka on esitetty taulukossa 3. MOX-jaksojen pituudet, kriittiset boorimäärät ja poistopalamat on esitetty taulukoissa 7 ja 8. Merkittävin muutos edellisen työn tuloksiin on, että EU1 polttoaineella tasapainolataus saadaan vasta jaksolla c20. Edellisessä työssä se saatiin jo jaksolla c17. Muilta osin erot ovat melko pieniä, eivätkä tasapainojakson pituus ja kriittisen boorin määrä poikkea edellisessä työssä saaduista.

Tasapainojaksojen massataseet on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Tulokset eivät tässäkin tapauksessa poikkea juurikaan edellisessä työssä saaduista tuloksista. Valitettavasti tämäkään versio ei lisännyt sivuaktinidien polttoa. Lopputuloksena täytyy todeta, että tällä konfiguraatiolla näyttää siltä ettei sivuaktinideja pystytä polttamaan.

Taulukko 7: MOX/EU1-jaksojen pituudet, booripitoisuudet jaksojen alussa sekä poistopalamat.

Jakso	Poltto- aine	Jakson pituus [EFPD]	C _B alussa [ppm]	Poistopalama [MWd/kgU]
c10	EU1	335	1348	56,76 +- 2,68
c11	EU1	351	1350	54,86 +- 2,79
c12	EU1	414	1648	54,15 +- 3,76
c13	EU1	461	1922	55,92 +- 4,05
c14	EU1	425	1772	57,72 +- 3,96
c15	EU1	431	1814	58,75 +- 3,78
c16	EU1	434	1828	58,91 +- 3,77
c17	EU1	435	1827	58,61 +- 3,92
c18	EU1	433	1820	58,71 +- 3,87
c19	EU1	434	1822	58,73 +- 3,86
c20	EU1	434	1823	58,72 +- 3,86

Taulukko 8: MOX/EU2-jaksojen pituudet, booripitoisuudet jaksojen alussa sekä poistopalamat.

Jakso	Poltto- aine	Jakson pituus [EFPD]	C _B alussa [ppm]	Poistopalama [MWd/kgU]
c10	EU2	375	1396	57,77 +- 2,45
c11	EU2	451	1542	57,94 +- 2,70
c12	EU2	545	1877	59,84 +- 3,64
c13	EU2	583	2147	71,54 +- 4,24
c14	EU2	566	2007	75,00 +- 4,11
c15	EU2	559	1987	76,13 +- 3,87
c16	EU2	564	2008	76,58 +- 3,92
c17	EU2	566	2014	76,32 +- 4,01
c18	EU2	564	2007	76,31 +- 4,00
c19	EU2	564	2008	76,36 +- 3,99

Taulukko 9: Aktinidien massat MOX/EU1-tasapainojakson alussa (BOC) ja lopussa (EOC) sekä näiden välinen ero. Yksikkönä on metrinen tonni.

	Am-241	Cm-242	Cm-244	Np-237
BOC	0,076	9,50E-03	0,072	0,021
EOC	0,109	0,016	0,137	0,038
ERO	0,034	6,40E-03	0,065	0,017

	U-234	U-235	U-236	U-238
BOC	0,031	3,132	0,196	109,308
EOC	0,030	2,623	0,309	108,293
ERO	-5,90E-04	-0,509	0,113	-1,015

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
BOC	0,439	3,427	2,721	1,349	2,335
EOC	0,417	3,000	2,502	1,373	2,290
ERO	-0,021	-0,426	-0,219	0,024	-0,045

Taulukko 10: Aktinidien massat MOX/EU2-tasapainojakson alussa (BOC) ja lopussa (EOC) sekä näiden välinen ero. Yksikkönä on metrinen tonni.

	Am-241	Cm-242	Cm-244	Np-237
BOC	0,105	0,014	0,088	0,042
EOC	0,109	0,020	0,162	0,073
ERO	4,10E-03	6,10E-03	0,074	0,032

	U-234	U-235	U-236	U-238
BOC	0,047	5,001	0,417	109,642
EOC	0,042	3,899	0,646	108,336
ERO	-4,90E-03	-1,103	0,229	-1,306

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
BOC	0,315	2,341	1,722	0,950	1,469
EOC	0,318	2,08	1,527	0,969	1,434
ERO	2,80E-03	-0,261	-0,195	0,019	-0,035

4 Yhteenveto

Tässä työssä toistettiin aiemmassa VTT:llä tehdyssä tutkimuksessa [4] tehdyt laskut. Edellisessä työssä tehdyt laskut tehtiin SIMULATE-versiolla, jossa ei ollut MOX-polttoaineelle sopivaa neutroniikkamallia. MOX-sydämessä termisen neutronivuon gradientit ovat niin suuria, että perusneutroniikkamallit eivät niihin sovellu. Nyt VTT:lle on kuitenkin hankittu SIMULATEsta versio, jossa on mukana tämä laajennettu neutroniikkamalli. Edellisessä työssä tehdyt laskut toistettiin tässä työssä käyttäen tätä uutta laajennettua neutroniikkamallia.

UO₂ sydämen mallinnuksessa ei havaittu muutoksia, kuten olettaa sopi. Aivan pienet muutokset johtunevat siitä, että myös CASMO-4E:stä käytettiin hieman uudempaa versiota. Tällä mallinnettiin siis tarvittavat niput ja tiedostoista tehtiin uusi reaktorifysikaaliset vakiot sisältävä kirjasto SIMULATE-ajoja varten.

Myös MOX-sydämellä havaitut muutokset edellisen työn tuloksiin olivat pieniä. EU1-polttoaineella lasketun sydämen tasapainolataus saavutettiin muutamaa jaksoa myöhemmin, kuin edellisessä työssä. Loppupään jaksojen pituudet olivat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan, joten kyse on varsin pienestä erosta. Kriittisen boorin määrässä ja poistopalamassa ei kovin suuria eroja nähty. Myös aktinidien massataseet olivat hyvin samanlaiset kuin edellisessä työssä. Valitettavasti täytyy todeta, ettei sivuaktinidien poltto onnistunut tälläkään kertaa.

Jatkossa olisi hyvä laskea osittaiselle MOX-sydämelle tehdyt laskut [3] uudelleen tällä MOX-laskuihin paremmin soveltuvalla versiolla. Koska kyseiset laskut aiemmalla versiolla osoittivat, että sivuaktinidien poltto on mahdollista, voi olla mielenkiintoista tarkastella tapauksia, joissa ladattavien MOX-nippujen määrä on näiden kahden tapauksen väliltä. Myös optimimäärän arvioiminen lienee näin mahdollista. Tässä työssä ei myöskään tehty minkäänlaista lataussuunnittelun optimointia, tosin siihen ei VTT:llä välttämättä ole kovin hyviä työkaluja, minkä tähden se vaatisi varsin suuren työmäärän.

Lähdeviitteet

1. J. Leppänen, "Preliminary calculations on actinide management using advanced MOX technology", VTT:n projektiraportti PRO1/P1007/05, 2005.
2. M. Anttila, "Actinide management using advanced PWR MOX technology. Results of two-dimensional fuel assembly calculations", VTT:n projektiraportti VTT-R-01841-07, 2007.
3. A. Ranta-aho, "Actinide management using advanced PWR MOX technology. Preliminary results of three-dimensional full-core calculations", VTT:n projektiraportti VTT-R-01774-08, 2008.
4. K. Rantamäki, "Kehittyneen MOX-teknologian käyttö sivuaktinidien polttamiseen", VTT:n tutkimusraportti VTT-R-02359-10.
5. Studsvik Scandpower, Inc., "INTERPIN-CS User's Manual", Studsvik Scandpower Report SOA-95/21 Rev 2, (2000).
6. J. Rhodes and M. Edenius, "CASMO-4: A Fuel Assembly Burnup Program, User's Manual", Studsvik Scandpower Report SSP-01/400 Rev 4, 2004.
7. J. Rhodes, K. Smith and M. Edenius, "CASMO-4E: Extended Capability CASMO-4, User's Manual", Studsvik Scandpower Report SSP-01/401 Rev 2, 2004.
8. Studsvik Scandpower, Inc., "SIMULATE-3, Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code, SIMULATE-3 User's Manual", Studsvik Scandpower Report SSP-01/414 Rev 3, (2003).
9. J. Rhodes, "JEF 2.2 and ENDF/B-VI 70 Group Neutron Data Libraries" Studsvik Scandpower Report SSP-04/454 Rev 2, 2005.
10. T. Bahadır, "CMS-LINK User's Manual", Studsvik Scandpower Report SOA-9704 Rev 2, (1999).
11. D. Dean, "Re: SIMULATE-3 with MOX", Sähköposti K. Rantamäelle 25.2.2010.
12. K. Rantamäki, "MAMBO: laskentapaketti tasapainolatauksen hakemiseen ja analysointiin", VTT:n tutkimusraportti VTT-R-02358-10.
13. OECD/NEA, "Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management", Raportti NEA No. 5990, OECD, Paris 2006.
14. G. Youinou, F. Varaine and A. Vasile, "Plutonium and Americium Multirecycling in the European Pressurized Reactor (EPR) Using Slightly Over-Moderated U-235 Enriched MOX Fuel Assemblies", Global 2003, New Orleans, LA November 16-20 2003.