

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma
BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

URANIN VÄKEVÖINTIMENETELMÄT
Uranium enrichment methods

Lappeenrannassa 25.4.2010
Ari Isotalo

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO	2
SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	4
2 VÄKEVÖINNIN PERUSTEET	4
3 VÄKEVÖINTIMENETELMÄT	8
3.1 Sentrifugimenetelmä	9
3.2 Diffuusiomenetelmät	13
3.3 Lasererotus	17
3.3.1 AVLIS (<i>Atomic Vapor Laser Isotope Separation</i>)	17
3.3.2 MLIS (<i>Molecular Laser Isotope Separation</i>)	18
3.3.3 SILEX (<i>Separation of Isotopes by Laser EXcitation</i>)	19
3.4 Muut	21
3.4.1 Aerodynaamiset	21
3.4.2 Sähkömagneettinen erotus	23
3.4.3 Plasmaerotus	24
3.4.4 Kemiallinen erotus	25
4 LAITOKSET	25
5 MENETELMIEN VERTAILU	28
6 YHTEENVETO	30
LÄHDELUETTELO	31

LYHENNELUETTELO

ACP	American Centrifuge Plant
AVLIS	Atomic Vapor Laser Isotope Separation
GE	General Electric
GLE	Global Laser Enrichment
H ₂	Vety
HEU	Highly Enriched Uranium
IAEA	International Atomic Energy Agency
IPFM	International Panel on Fissile Materials
LES	Louisiana Energy Services
MLIS	Molecular Laser Isotope Separation
SILEX	Separation of Isotopes by Laser EXcitation
SSL	Silex Systems Limited
SWU	Separative Work Unit
U	Uraani
UF ₅	Uraanipentafluoridi
UF ₆	Uraaniheksafluoridi
USEC	United States Enrichment Corporation
U.S.NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
WNA	World Nuclear Association

SYMBOLILUETTELO

d	halkaisija	[m]
D	diffuusiovakio	[m ² /s]
E_k	kineettinen energia	[J]
F	syötetyn uraanin määrä (feed)	[kg]
L	pituus	[m]
m_i	aineen i massa	[kg]
M_i	aineen i moolimassa	[g/mol]
P	väkevöidyn uraanin määrä (product)	[kg]
R	kaasuvakio	[J/molK]
T	köyhtyneen uraanin määrä (tails)	[kg]
v	nopeus	[m/s]
V	arvofunktio	[-]
W_{swu}	erotustyö	[SWU]
$W_{swu/a}$	kapasiteetti/erotustehokkuus	[SWU/a]
x	massaosuus	[-]
α	erotustekijä	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
σ	murtolujuus	[N/m]

Alaindeksit:

f	syötettävä materiaali
p	väkevöity materiaali
t	köyhtynyt materiaali

1 JOHDANTO

Luonnonuraanista on vain n. 0,7 % fissioituvaa ^{235}U -isotooppia ja vastaavasti ei fissioituvaa ^{238}U -isotooppia n. 99,3 %. Useimpiin käytännön sovellutuksiin tämä fissioituvan materiaalin määrä ei riitä, joten ^{235}U -isotoopin pitoisuutta uraanissa täytyy nostaa väkevöimällä. Maailmassa noin 90 % käytössä olevista ydinvoimalaitoksista käyttää polttoaineessaan uraania, jonka ^{235}U -pitoisuus on vähintään 3 %. Vielä väkevöidympää uraania käytetään mm. sukellusveneiden reaktoreissa, muissa sotilaallisissa sovellutuksissa (mm. ydinaseet) ja pienissä koereaktoreissa.

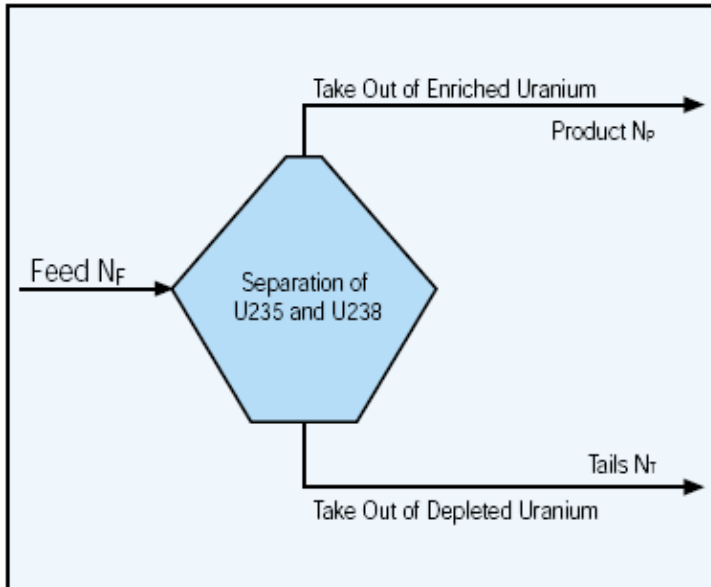
Tässä työssä käydään läpi aikojen saatossa uraanin väkevöimiseen käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteet. Työssä käsitellään myös hieman menetelmien historiaa, niihin liittyviä ongelmia sekä niissä käytettäviä materiaaleja. Pääpaino on nykyään käytössä olevilla sentrifugi- ja kaasudiffuusiomenetelmillä, mutta muitakin menetelmiä pyritään kuvaamaan pääperiaatteittain.

Lopuksi raportissa vielä vertaillaan eri menetelmien ominaisuuksia sekä luodaan katsaus nykyään toimiviin tärkeimpiin väkevöintilaitoksiin sekä tuleviin ja käynnissä oleviin väkevöintilaitosprojekteihin.

2 VÄKEVÖINNIN PERUSTEET

Tällä hetkellä maailmassa on kaupallisessa käytössä vain kaasudiffuusio- ja sentrifugimenetelmiä käytettäviä uraanin väkevöintilaitoksia. Aikojen saatossa on tutkittu ja kehitetty monia muitakin menetelmiä, kuten kemialliset, plasma- ja lasermenetelmät. Nämä ovat kuitenkin osoittautuneet vielä kelpaamattomiksi kaupalliseen tuotantoon tai huonommaksi kuin nykyiset diffuusio- ja sentrifugimenetelmät. Myöhemmin kappaleessa 3 esitellään tarkemmin eri menetelmien toimintaa.

Jokaisen väkevöintiin käytetyn menetelmän perusosa on väkevöintielementti, joka on esiteltynä kuvassa 1. Elementti jakaa syötetyn uraanin kahteen osaan: toisessa on suurempi osuus haluttua isotooppia ja toisessa taas pienempi osuus.



Kuva 1. Väkevöintielementti. (Urenco 2003: 5)

Elementin yksi tärkeä ominaisuus on sen erotustekijä, joka kertoo kuinka paljon ^{235}U -pitoisuutta voidaan nostaa yhdessä elementissä. Tämä suure vaihtelee huomattavasti eri menetelmien välillä. Pienimmillään erotustekijä on kemiallisissa menetelmissä ja suurimmillaan kehitteillä olevissa lasermenetelmissä (Krass et al. 1983: 9). Eri menetelmien erotustekijöitä tarkastellaan paremmin kappaleessa 5.

Eri väkevöintimenetelmien kesken on myös huomattavia eroja siinä, miten paljon ne pystyvät käsittelemään väkevöitävää materiaalia tietyssä ajassa. Esimerkiksi suuret kaasudifфуusioelementit pystyvät prosessoimaan tonneittain materiaalia minuutissa, kun taas lasermenetelmissä liikutaan muutamissa grammoissa minuuttia kohden. (Krass et al. 1983: 9)

Erotustyö W_{SWU} on työn määrä, joka tarvitaan tietyn uraanimäärän saamiseksi haluttuun väkevöintiasteeseen. Tämä annetaan yksiköissä SWU (Separative Work Unit) tai kg SW. Se on monimutkainen luku, joka voidaan laskea yhtälöllä

$$W_{\text{SWU}} = P \cdot V(x_p) + T \cdot V(x_t) - F \cdot V(x_f) \quad (1)$$

missä P on väkevöityneen uraanin määrä [kg]

T on köyhtyneen uraanin määrä [kg]

F on syötetyn uraanin määrä [kg]

x_p on ^{235}U -isotoopin massaosuus väkevöityneessä uraanissa [-]

x_t on ^{235}U -isotoopin massaosuus köyhtyneessä uraanissa [-]

x_f on ^{235}U -isotoopin massaosuus syötetyssä uraanissa [-]

yhtälössä 1 esiintyvä $V(x_i)$ ($i = p, t, f$) on ns. arvofunkti, joka lasketaan yhtälöllä

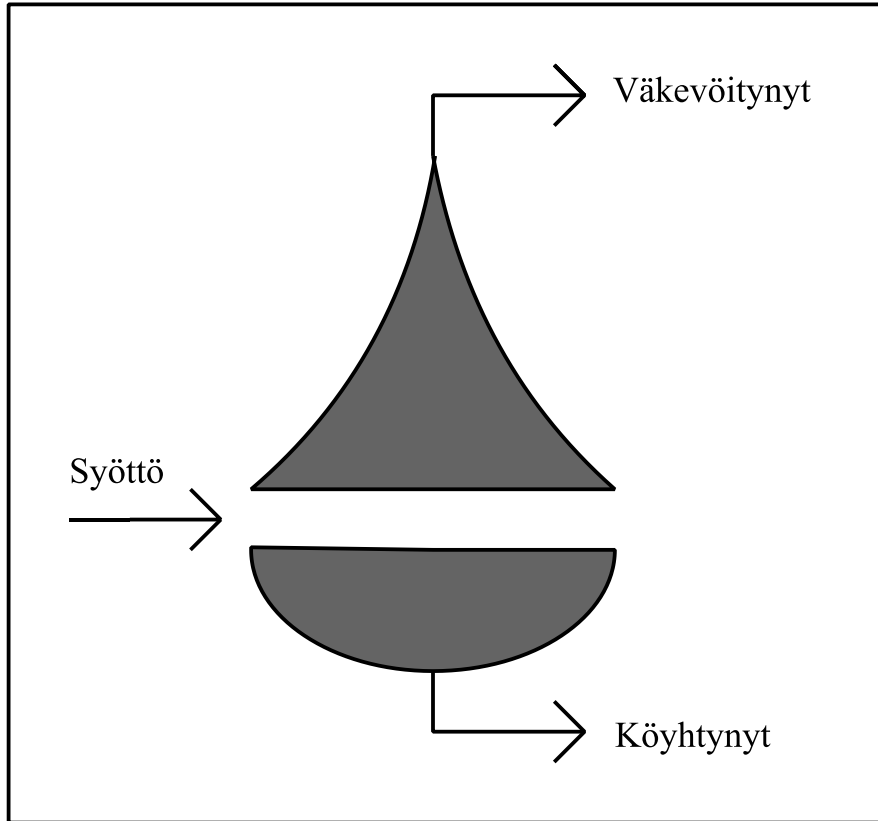
$$V(x_i) = (2x_i - 1) \cdot \ln \frac{x_i}{1-x_i} \quad (2)$$

Väkevöintilaitoksen kapasiteetti (erotustehokkuus) annetaan yleensä yksikkönä SWU per vuosi eli SWU/a. Kaupallisten laitosten kapasiteetti vaihtelee yleensä sadantuhannen ja useampien miljoonien SWU/a välillä. Yhden elementin kapasiteetti esimerkiksi sentrifugilaitoksessa liikkuu 5–100 SWU/a:n välillä, joten laitoksessa täytyy olla useita vaiheita, joissa on useita elementtejä rinnan kytkettynä. Kytkettäessä vaiheet vielä sarjaan, syntyy ns. kaskadi. (Krass et al. 1983: 10)

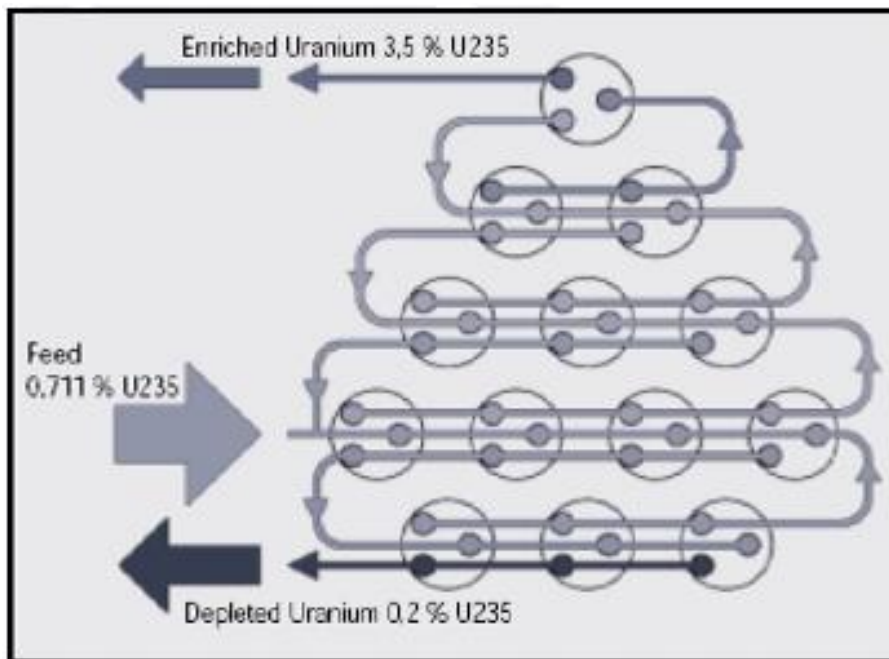
Useimmissa menetelmissä yhdestä vaiheesta saatu väkevöity osa viedään seuraavaan vaiheeseen ja köyhtynyt osa vastaavasti edelliseen vaiheeseen. Tällaista kaskadia sanotaan symmetriseksi, jossa väkevöityneen osan ja syötetyn osan massavirtojen suhde yhdessä vaiheessa on hieman alle 0,5. Joissain menetelmissä, kuten Helikon-prosessissa, vastaava suhde on niin pieni, että köyhtynyt osa joudutaan viemään monta vaihetta taaksepäin. Tätä kutsutaan silloin ei-symmetriseksi kaskadiksi. (Marshall 1983: 111)

Kaskadin pitää koostua kahdesta osasta: väkevöinti osa ja köyhdytys osa. Väkevöitävä materiaali syötetään kaskadin keskivaiheille, jolloin toisesta päästä saadaan väkevöitynyt osuus ja toisesta köyhtynyt (ks. kuva 2). Koska kaskadista saatava väkevöidyn uraanin määrä on huomattavasti pienempi kuin siihen syötetyn uraanin määrä, pitää vaiheiden koko kaskadissa pienetä sekä väkevöinti, että köyhdytys osan loppua kohden mentäessä. Tämä hoidetaan esimerkiksi kaasudiffuusiolaitoksessa erikokoisilla elementeillä ja sentrifugilaitoksessa sentrifugiin määrällä. Vaiheiden määrän kaskadissa määrittää halutut väkevöintiasteet sekä köyhdytetyssä, että väkevöidystä osassa. Mitä enemmän vaiheita, sitä väkevöidämpää/köyhdytetympää materiaalia kaskadista saadaan ulos. Vaiheiden koon puolestaan määrittää niissä kulkevat massavirrat eli miten paljon kyseistä materiaalia halutaan saada. (Krass et al. 1983: 104)

Kuvassa 2 on esitettyä ideaalisen kaskadin muoto ja kuvassa 3 on vastaavasti sentrifugilaitoksen kaskadin periaatteellinen muoto.



Kuva 2. Ideaalisen kaskadin muoto. (Marshall 1983: 112)



Kuva 3. Periaatteellinen piirros sentrifugilaitoksen kaskadista. (Urenco 2003: 12)

Laitoksen kapasiteetti on suoraan verrannollinen laitoksen kuluttaman energian määrään, joka vaihtelee eri väkevöintimenetelmien välillä huomattavasti (Makhijani et al. 2004: 6). Eri menetelmien energiankulutusta tarkastellaan paremmin kappaleessa 5.

Huomion arvoista on myös useimmissa väkevöintimenetelmissä oleva viive laitoksen valmistumisen ja sieltä saatavan valmiin tuotteen välillä. Tätä kutsutaan kaskadin tasapainoajaksi. Ensin kaskadin kaikki vaiheet täytetään saman isotooppikoostumuksen omaavalla UF_6 -kaasulla. Kaasua ei poisteta kaskadista tai lisätä siihen, vaan sen annetaan kiertää suljetussa systeemissä, kunnes tuotteena on halutussa väkevöintiasteessa olevaa kaasua. Tämän jälkeen kaskadi saatetaan vähitellen optimaaliseen toimintatilaansa, lisäämällä/poistamalla kaasua. Aikaan vaikuttaa pääasiassa se, miten suuri väkevöintiaste halutaan saavuttaa. (Krass et al. 1983: 108–109)

Tasapaino aika vaihtelee huomattavasti eri menetelmien välillä. Lasermenetelmissä tasapaino aika on lähes olematon. Muissa menetelmissä se vaihtelee yleensä muutamista tunteista (sentrifugi) muutamiin kuukausiin (mm. kaasudiffuusio). Äärimmäinen esimerkki on aseuraanin tuotanto eräänlaisessa kemiallisessa menetelmässä, jolloin tasapaino aika on noin 30–40 vuotta. (Krass et al. 1983: 10)

3 VÄKEVÖINTIMENETELMÄT

Uraanin väkevöintiin on käytetty monia eri menetelmillä, joista nykyään on käytössä lähinnä sentrifugi- ja kaasudiffuusio menetelmät. Muitakin menetelmiä on tutkittu ja kehitetty, mutta ne ovat tähän asti osoittautuneet joko teknisesti tai taloudellisesti kannattamattomiksi. Seuraavaksi esitellään yleisimpien ja laajimmin tutkittujen uraanin väkevöintimenetelmien historiaa, peruseriaatteita ja kehitykseen liittyviä ongelmia/ratkaisuja. Pääpaino on tällä hetkellä käytössä olevilla väkevöintitekniikoilla eli sentrifugi- ja kaasudiffuusio menetelmillä sekä mahdollisesti tulevaisuudessa toteutuvilla laser menetelmillä. Lisäksi esitellään muutamia muita väkevöintimenetelmiä, jotka ovat periaatteessa osoittautuneet toteutettaviksi laajamittaiseen uraanin väkevöintiin.

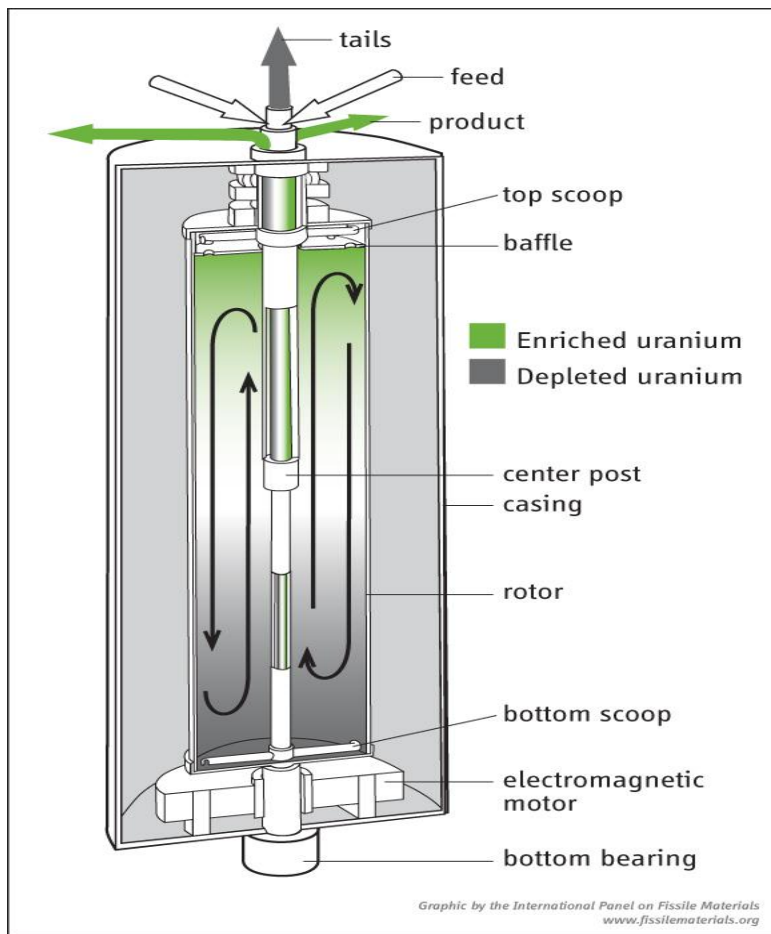
3.1 Sentrifugimenetelmä

Englantilaiset tiedemiehet F.W. Aston ja F. Lindemann saivat vuonna 1919 idean siitä, että isotooppeja voidaan erottaa keskipakovoiman avulla. Vähän myöhemmin amerikkalainen R.S. Mulliken kehitti sentrifugin, johon syötettiin pieni määrä nestettä. Sentrifugin pyöriesä neste muodosti ohuen kerroksen sylinterin ulkoreunalle, josta se poistettiin putken avulla. Amerikkalainen J.W. Beams kehitti 1930-luvun lopulla sylinterimäisen sentrifugin. Toiseen päähän sylinteriä syötettiin haluttua ainetta. Toisessa päässä raskaampi osuus kerättiin ulkoreunalta ja kevyempi sisemmältä. Tällaisessa sentrifugissa kuitenkin sisemmän kaasun kerääminen oli hankalaa siellä vallitsevan reilusti pienemmän paineen takia. Myös tällä menetelmällä saavutettava väkevöintiaste oli suhteellisen pieni. (Marshall 1983: 122–124)

Nämä ongelmat ratkaistiin pian kuitenkin kehittämällä sentrifugi, jossa molemmat osuudet voitiin kerätä talteen sylinterin ulkoreunalta suuremmasta paineesta. Tämä saatiin aikaiseksi sylinterin sisäisellä kierrolla, jossa väkevöitynyt ja köyhtynyt UF₆-kaasu saatettiin sylinterin eri päihin. Sentrifugimenetelmää tutkittiin ja kehitettiin toisen maailmansodan aikana sekä Saksassa, USA:ssa, että Venäjällä lähinnä aseuraanin tuottamiseksi. Tällöin kuitenkin oli ongelmana käytettävissä olevien sylinterimateriaalien huono kestävyys sekä laakerointien aiheuttama energiahävikki. Laakerointiongelmaan saatiin ratkaisu 1950-luvun lopulla, kun kehitettiin sentrifugi, jonka sylinterin yläpäässä oli magneettilaakerointi ja alapäässä vastaavasti neulalaakeri öljytyssä kupissa. Tämän jälkeen sentrifugimenetelmä alkoi kiinnostaa myös kaupallisessa mielessä materiaalienkin parantuessa. (Marshall 1983: 122–124)

Kuvassa 4 on esiteltyä modernin sentrifugin toimintaperiaate. Uraaniheksafluoridi (UF₆) syötetään suurella nopeudella tyhjiötilassa pyörivän roottorin keskiosaan. UF₆-kaasu kiihtyy lähes roottorin nopeuteen ja keskipakovoima saa raskaammat ²³⁸U-isotooppia sisältävät kaasumolekyylit siirtymään lähemmäksi roottorin seinämää, kun taas kevyemmät ²³⁵U-isotooppia sisältävät kaasumolekyylit jäävät hieman keskemmälle. Pyörivän kaasun ja alakauhan väliset aerodynaamiset vuorovaikutukset sekä moottorista tuleva lämpö saavat aikaan virtauksen, jossa roottorin ulkoreunalla oleva raskaampi kaasu virtaa alaspäin ja vastaavasti keskemmällä oleva kevyempi kaasu virtaa ylöspäin. Kaasu kerätään ylä- ja alalaidoissa olevilla kiinteillä kauhoilla. Tämän jälkeen enemmän ²³⁵U-isotooppia sisältävä

kaasu saatetaan seuraavaan sentrifugiin edelleen väkevöitäväksi ja vastaavasti vähemmän ^{235}U -isotooppia sisältävä kaasu viedään edelliseen vaiheeseen uudelleen väkevöitäväksi. Huomion arvoista on myös se, että roottorin ja suojakotelon välinen tila pidetään tyhjiönä. Tämä vähentää huomattavasti roottoriin vaikuttavia kitkavoimia. Suojakotelon toinen tehtävä on nimensä mukaisesti estää roottoripalasten lentäminen ympäristöön, mikäli roottori rikkoutuu. (Krauss et al. 1983: 130–131)



Kuva 4. Sentrifugin toimintaperiaate. (IPMF)

Jotta nähdään paremmin sentrifugin kehityspotentiaali, on syytä tarkastella yhden sentrifugin erotustekijän α , sekä kapasiteetin $W_{\text{swu/a}}$ lausekkeita. Erotustekijä α saadaan yhtälöstä

$$\alpha = \exp \left[\frac{(M_2 - M_1) \cdot v^2}{2RT} \cdot \frac{L}{d} \cdot \sqrt{2} \right] \quad (3)$$

missä M_2 on raskaamman isotoopin molekyyli­massa [g/mol]
 M_1 on kevyemmän isotoopin molekyyli­massa [g/mol]
 v on sylinterin kehänopeus [m/s]
 R on kaasuvakio 8,3145 J/molK
 T on kaasun lämpötila [K]
 L on sylinterin pituus [m]
 d on sylinterin halkaisija [m]

Yhden sentrifugin kapasiteetti $W_{swu/a}$ lasketaan yhtälöllä

$$W_{swu/a} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot L \cdot \left[\frac{(M_2 - M_1) \cdot v^2}{2RT} \right]^2 \quad (4)$$

missä ρ on kaasun tiheys [kg/m³]
 D on kaasun diffuusiovakio [m²/s]

Yhtälöt 3 ja 4 ovat tarkoitettu ideaaliselle virtausprofiilille sentrifugin sisällä, joten käytännössä nämä eivät aivan pidä paikkaansa. Yhtälöistä saa kuitenkin hyvän käsityksen, mihin nykyisten sentrifugien kehitys perustuu. Yhtälöstä 4 nähdään, miten erotustehokkuus on suoraan verrannollinen roottorin pituuteen sekä kehänopeuden neljänteen potenssiin. Näiden parantaminen on siis nykyään pääasiallinen kehityssuunta sentrifugimenetelmässä. (Urenco 2003: 7–9)

Sylinterin maksimaalinen kehänopeus v_{\max} on riippuvainen rakennemateriaalin murtolujuudesta σ [N/m] ja tiheydestä ρ [kg/m³] seuraavasti

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (5)$$

Hyviä sylinterimateriaaleja ovat semmoiset aineet, joilla on hyvä murtolujuuden ja tiheyden välinen suhde (Urenco 2003: 9). Taulukossa 1 on lueteltuna mahdollisia sylinterimateriaaleja sekä niillä saavutettavia maksimaalisia nopeuksia. Samoja materiaaleja käytetään myös muissa sentrifugin pyörivissä osissa. Materiaaleille asettaa rajoituksia myös UF₆-kaasun aiheuttama voimakas korroosio. Tämän vuoksi kaikki sentrifugin osat, jotka ovat

yhteydessä kaasun kanssa, pitää joko valmistaa korroosion kestäväällä materiaalilla tai päällystää sillä. Näitä aineita ovat mm. ruostumaton teräs, alumiini ja nikkeli. (U.S.NRC 2010)

Taulukko 1. Sylinterimateriaalien ominaisuuksia. (Krass et al. 1983: 132)

Materiaali	Murtolujuus [kg/cm²]	Tiheys [g/cm³]	Maksiminopeus [m/s]
alumiini (-seos)	5200	2,8	425
titaani	9200	4,6	440
suurlujuusteräs	17000	8,0	455
maraging-teräs	22500	8,0	525
lasikuitu	7000	1,9	600
hiilikuitu	8500	1,7	700

Alkuvaiheessa roottorit valmistettiin eri alumiiniseoksista, mutta nykyään Yhdysvaltojen laivaston 1960-luvulla kehittämä maraging-teräs on yleisin roottorimateriaali. Lasi- ja hiilikuitu tulevat yleistymään teknologioiden kehittyessä. (U.S.NRC 2010)

Roottorin pituutta rajoittaa ns. kriittinen taajuus, jonka se saavuttaa tietyllä kehänopeudella. Tällöin roottori alkaa värähdellä ja se on vaarassa rikkoutua. Kriittinen taajuus on riippuvainen mm. putken poikkipinta-alasta, pituudesta, materiaalin tiheydestä ja laakereiden raja-arvoista. Putkella on monia eri kriittisiä taajuuksia. Aikaisemmin roottorin pituus valittiin niin, että sen toimintataajuus oli pienempi kuin alin kriittinen taajuus. Tällainen roottori on ns. alikriittinen. Ylikriittistä roottoria käyttämällä, sen pituutta voidaan lisätä huomattavasti. Roottori on ylikriittinen silloin, kun sen toimintataajuus on alimman kriittisen taajuuden yläpuolella. (Urenco 2003: 9)

On olemassa kolme tapaa, jolla alemmat kriittiset taajuudet voidaan ylittää: kiihdyttämällä nopeasti roottori ylitse kriittisen nopeuden, optimoida laakerien vaimennuskyky tai koota ylikriittinen roottori alikriittisistä roottoreista liittämällä ne yhteen sopivilla joustavilla materiaaleilla. (Barzashka I. 2010)

Kuvasta 5 voidaan havaita miten sentrifugien kehitys on vaikuttanut niiden kokoon huomattavasti. Venäjällä pääsääntöisesti käytettävät sentrifugit ovat n. metrin pituisia ja tuottavat alle 5 SWU/a. Muualla Euroopassa yleisesti käytössä olevat sentrifugit ovat n. 3,5 m pituisia kapasiteetiltaan n. 40 SWU/a. Uudet AC100-sentrifugit ovat vastaavasti yli 12 m pitkiä ja tuottavat arviolta 350 SWU/a. (ACP)



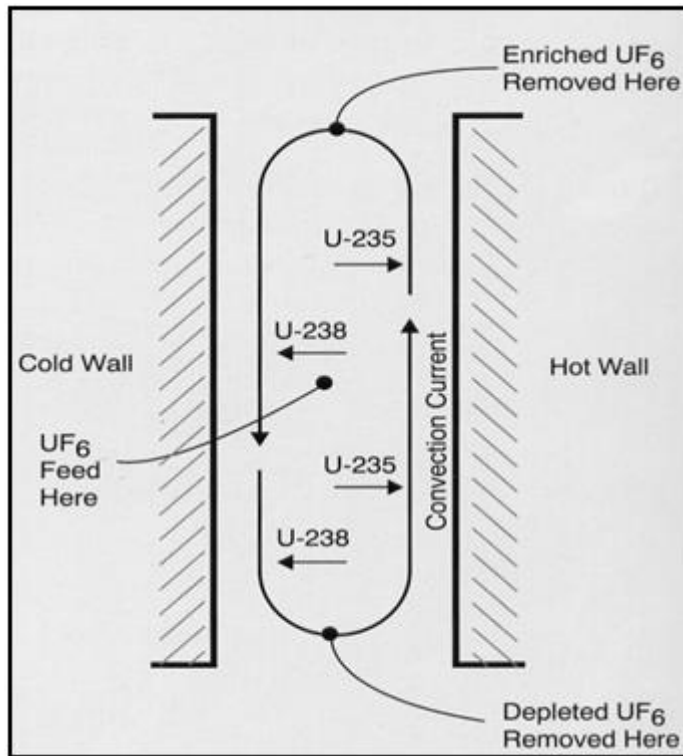
Kuva 5. Vasemmalla on sentrifugeja Iranissa Natanzin laitoksella (MSNBC 2010). Oikealla uuden sukupolven AC100-sentrifugeja American Centrifuge Plant, Piketon, Ohio (ACP 2010).

3.2 Diffuusiomenetelmä

Ensimmäinen käytössä ollut väkevöintimenetelmä oli terminen diffuusio, jota käytettiin toisen maailmansodan aikana uraanin väkevöintiasteen nostamiseksi n. 0,9 %:iin. Tätä tuotetta käytettiin sen jälkeen kaasudiffuusio- ja sähkömagneettisen menetelmän avulla aseuraanin tuotantoon.

Kuvassa 6 on esitettyä termisen diffuusion toimintaperiaate. Väkevöintiin tällä menetelmällä käytetään joko UF_6 -kaasua tai -nestettä. Pystysuoraa kaasu- tai nestekerrosta lämmitetään toiselta puolelta ja jäädytetään toiselta puolelta. Tämä tuottaa filmiin konvektiovirtauksen, jossa kevyemmät ^{235}U -isotooppia sisältävät molekyylit nousevat lämmintä seinää myöden ylöspäin ja raskaammat ^{238}U -isotooppia sisältävät molekyylit laskeutuvat kylmempää seinää myöden alaspäin. Joten kevyemmät molekyylit voitiin kerätä ylhäältä ja

raskaammat alhaalta. Termisen diffuusion vaati kuitenkin huomattavasti enemmän energiaa kuin kaasudiffuusio, vaikka se olikin kaikin puolin yksinkertainen prosessi. Tämän vuoksi kyseinen menetelmä väistyikin kaasudiffuusion tieltä vain noin vuoden käytön jälkeen. (Settle)



Kuva 6. Termisen diffuusion toimintaperiaate. (Settle)

Ensimmäisenä kaasudiffuusiomenetelmää käytti vuonna 1919 englantilainen tiedemies F.W. Aston, joka erotti sen avulla neonin eri isotooppeja toisistaan. Myöhemmin menetelmää käytettiin mm. vedyn ja hiilen väkevöimiseen. Kaasudiffuusiomenetelmää kehitettiin toisen maailmansodan aikana, osana Manhattan-projektia, uraanin väkevöimiseksi ydin-ase materiaaliksi. Ensimmäinen kaasudiffuusiolaitos valmistui Oak Ridgeen Yhdysvaltoihin vuonna 1945. (Marshall 1983: 115)

Kuvassa 7 on esitettyä kaasudiffuusorin toimintaperiaate. Menetelmä perustu siihen tosiasiaan, että kaasuseoksessa jokaisella molekyylillä on sama keskimääräinen kineettinen energia E_k , joka on muotoa

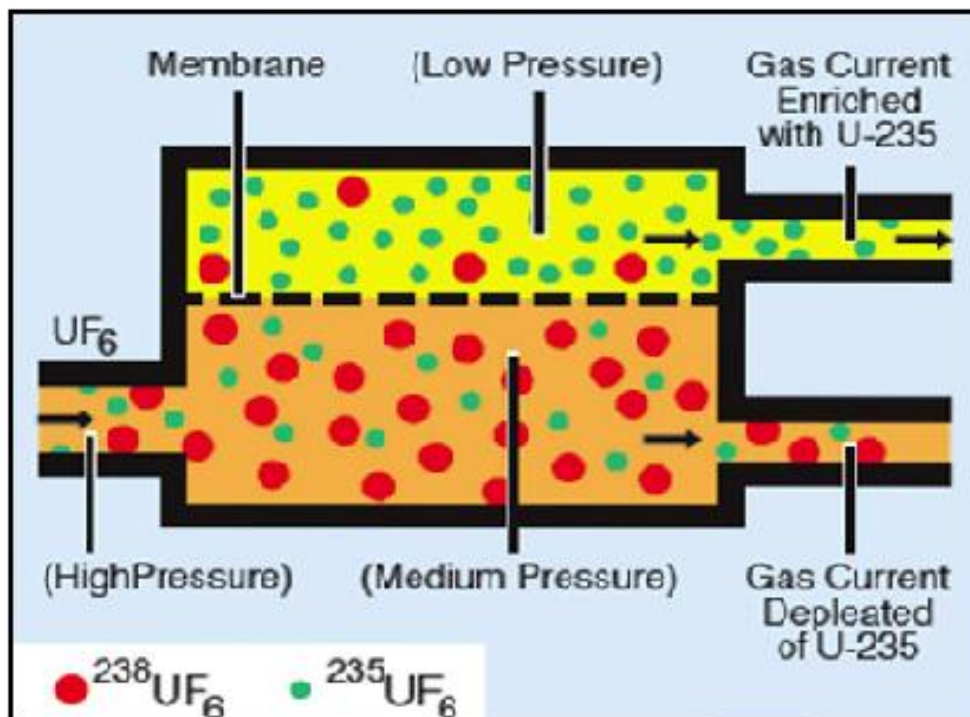
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 \quad (6)$$

missä m_1 ja m_2 ovat molekyylien massat [kg]
 v_1 ja v_2 ovat molekyylien nopeudet [m/s]

Kun yhtälö 6 järjestellään uudelleen, saadaan nopeuksien suhde, joka on samalla kaasudiffuusion erotustekijä α

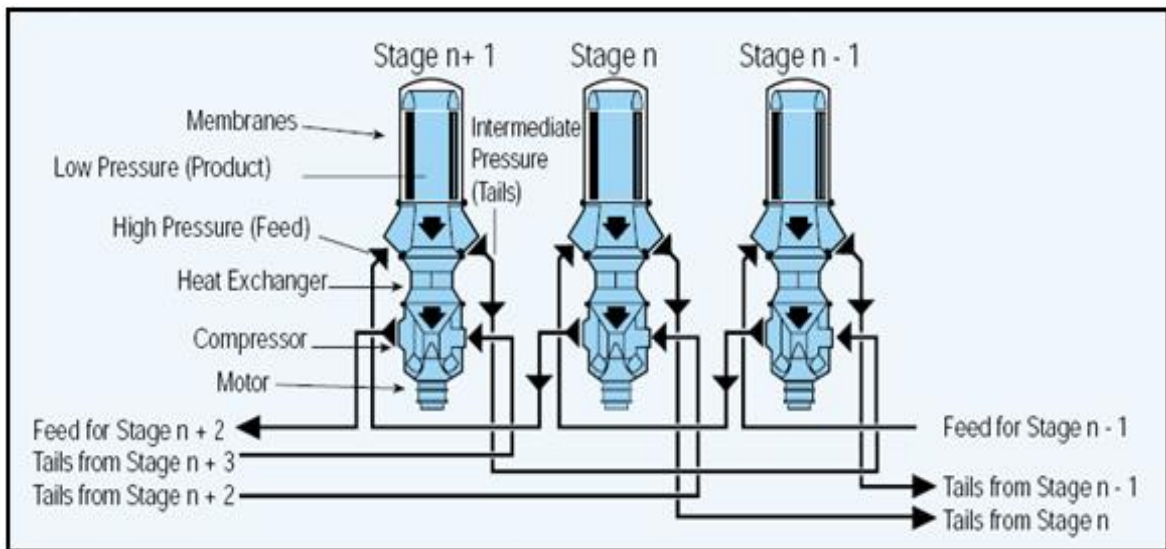
$$\alpha = v_1/v_2 = \sqrt{m_2/m_1} \quad (7)$$

Lyhyesti selitettynä kaasudiffuusori toimii seuraavasti: UF_6 -kaasu johdetaan kovalla paineella kammioon, jonka seinämät ovat täynnä erittäin pieniä reikiä. Seinämien toisella puolella on pienempi paine kuin kammiossa. Termisessä tasapainossa kevyemmällä ^{235}U -isotooppia sisältävillä molekyyyleillä on suurempi nopeus, kuin raskaammilla ^{238}U -isotooppia sisältävillä molekyyyleillä. Näin ollen $^{235}\text{UF}_6$ -molekyylit törmäävät seinissä oleviin reikiin useammin, joten niillä on suurempi mahdollisuus läpäistä kammion seinä. (Marshall 1983: 114)



Kuva 7. Kaasudiffuusion toimintaperiaate. (Settle)

Kuvassa 8 on esitetty kolme erillistä diffuusorivaihetta sarjankytkettynä. Jokainen vaihe sisältää oman lämmönvaihtimen sekä kompressorin. UF_6 -kaasun kiertokulku esimerkiksi vaiheessa n on seuraavanlainen. Edellisestä vaiheesta tuleva kaasu menee diffuusoriin, joka muodostuu useista putkimaisista kalvoista. ^{235}U -isotoopin suhteen köyhtynyt osa jatkaa vaiheeseen $n - 2$. Väkevöitynyt osa joudutaan jäädyttämään lämmönvaihtimessa ennen kompressorille tuloa. Kompressorissa kaasu sekoittuu $n + 2$ vaiheesta tulevan köyhtyneen osan kanssa ja seos nostetaan takaisin korkeaan paineeseen ennen seuraavaa vaihetta. Kaasun jäähditys ennen paineen nostoa on tarpeellista. Kaasun lämpötila nousee huomattavasti kompressorissa ja suurin osa puristusenergiasta (lämmöstä) pitää poistaa systeemistä, jotta tasainen toimintalämpötila säilyy. Tämä toimenpide on myös suurin syy kaasudiffuusiomenetelmän korkeaan energiankulutukseen. (Krass et al. 125–126)



Kuva 8. Kolme diffuusiovaihetta sarjankytkettynä. (Urenco 2003: 10)

Kaasudiffuusiolaitoksen tärkeimmät komponentit ovat diffuusiioseinämät/-kalvot ja kompressorit, joiden parantamiseen myös koko menetelmän kehitys on lähinnä perustunut. Diffuusiokalvojen valmistuksessa pitää ottaa huomioon ainakin seuraavat tekijät: kalvossa olevien reikien keskimääräinen halkaisija pitää olla pienempi kuin UF_6 -molekyylin keskimääräinen vapaamatka. Tämä on matka, jonka molekyyli kulkee törmäyksien välillä. Tällöin molekyylit läpäisevät kalvon sujuvasti ilman ylimääräisiä törmäyksiä, jotka muuten pyrkivät tasoittamaan pientä nopeuseroa kevyiden ja painavampien molekyylin välillä. (Krass et al. 1983: 122)

Käytännössä reikien halkaisija on n. 10–100 nanometriä. Kalvon täytyy olla myös tarpeeksi ohutta (< 5 mm), jotta hyvä permeabiliteetti saavutettaisiin kohtuullisilla paine-eroilla. Permeabiliteetti on yhtä kuin kaasun virtaus tiettyä alaa kohti tietyllä paine-erolla. Kalvot, niin kuin kaikki muutkin UF₆-kaasun kanssa suorassa kosketuksessa olevat osat, täytyy valmistaa UF₆-kaasun korroosion vuoksi erilaisista metallisista, keraamisista tai polymeerisistä materiaaleista. Sopivia materiaaleja ovat mm. nikkeliseokset (nikkeliä yli 60 %) ja alumiinioksidi. Koko systeemin täytyy olla myös ilmatiivis, ettei UF₆-kaasu pääse reagoimaan hapen kanssa ja muodostamaan kiinteää uraanioksidia, joka voi tukkia kalvon reiät. (U.S.NRC 2010)

3.3 Lasererotus

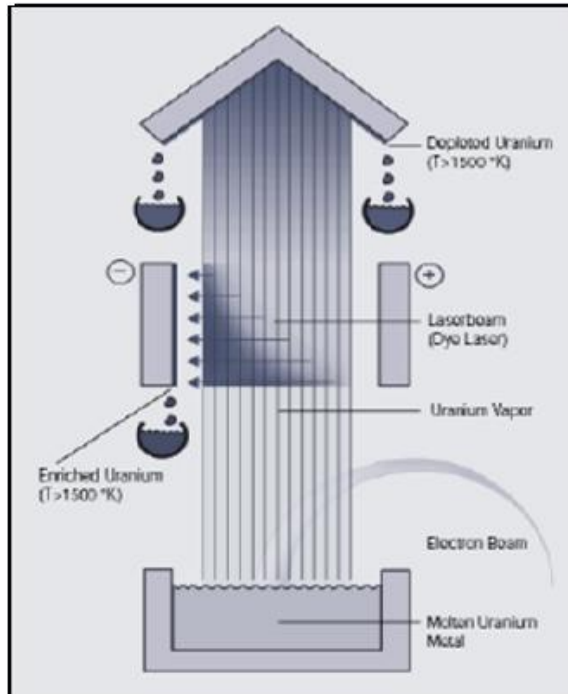
Lasererotus perustuu siihen, että kaikilla atomeilla ja molekyyileillä on tietty määrä viritystiloja tietyillä energioilla. Eri viritystilojen energiat ovat riippuvaisia atomin/molekyylin massasta, joka mahdollistaa tietyn isotoopin säteilyttämisen. Haluttua atomia/molekyyliä säteilytetään tietyn viritystilan energiaa vastaavalla resonanssiabsorptiotaajuudella, jolloin atomi absorboi energian ja virittyy.

3.3.1 AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)

Ensimmäisen kerran AVLIS-menetelmällä saatiin väkevöityä uraania vuonna 1975, mutta vain muutaman milligramman verran. Ongelmana onkin ollut siitä lähtien saada tuotettua milligrammojen sijaan tuhansia kilogrammoja väkevöityä uraania. Uutta teknologiaa tarvitaan paljon ja tärkein tekijä on tehokkaiden lasereiden kehittäminen. (Cochran 1992: 69)

Kuvassa 9 on esitettyä yksinkertaistettuna AVLIS-menetelmän toimintaperiaate. Uraanimetalli lämmitetään elektronisuihkulla n. 2300 °C:seen, jolloin uraani metalli höyrystyy. Varauksettomista ²³⁵U- ja ²³⁸U-atomeista koostuva höyry nousee ylöspäin lasereille. Sen jälkeen kaasua säteilytetään laserilla aallonpituudella 591,5 nm, mikä virittää ²³⁵U-atomit ylemmälle energiatasolle. Lopulta osa atomeista ionisoituu, kun niitä säteilytetään ultravioletivalolla, jonka aallonpituus on 310 nm. Tämän jälkeen positiivisesti varatut ²³⁵U-ionit voidaan kerätä negatiivisesti varatulla Faradayn kupilla. Faradayn kuppi on laite,

joka on erityisesti kehitetty keräämään varautuneita hiukkasia tyhjiössä. (Cochran 1992: 70)



Kuva 9. AVLIS-menetelmän toimintaperiaate. (Urenco 2003: 11)

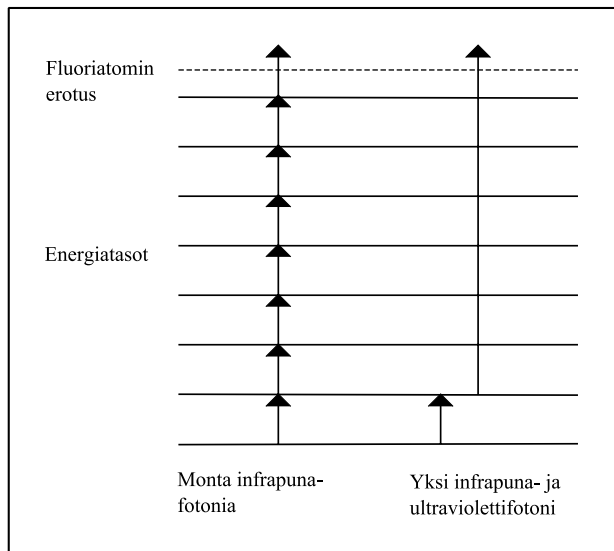
Uraanihöyry on erittäin korrosioiva aine, joten kaikki sen kanssa kosketuksissa olevat osat täytyy valmistaa korroosion kestävästä materiaaleista tai päällystää niillä. Tällaisiin materiaaleja ovat mm. yttrium-oksidilla päällystetty grafiitti ja tantaali. (U.S.NRC 2010)

3.3.2 MLIS (Molecular Laser Isotope Separation)

MLIS-menetelmän toimintaperiaate on hieman erilainen kuin AVLISin. Uraani syötetään laserille UF_6 -kaasuna, joka on sekoitettu johonkin inerttiin kaasuun kuten typpeen tai argoniin. Tämä johtuu siitä, että UF_6 -kaasu pitää jäähdyttää alhaiseen lämpötilaan, jotta uraanin isotooppien ^{235}U ja ^{238}U resonanssiipiikit saadaan paremmin erilleen. Tällaisessa lämpötilassa UF_6 -kaasu olisi kuitenkin itsessään kiinteässä olomuodossa. Tavoitteena on saada ^{235}U -isotooppia sisältävä UF_6 -molekyyli absorboimaan niin paljon energiaa, että se menettää yhden fluoriatomeistaan. Menetelmä voidaan toteuttaa kahdella tapaa. Kaasua säteilytetään infrapunalaserilla, jonka aallonpituus on 16 μm . Toinen vaihtoehto on säteilyttää kaa-

sua ensin infrapunaserillä ja sen jälkeen ultraviolettilaserilla, jonka aallonpituus on 10 μm . (Krass et al. 1983: 166–168)

Kuvassa 10 on esitettyä miten fluoriatomien poistaminen periaatteessa tapahtuu. Molekyyli absorboi yhden 16 μm fotonin, jonka jälkeen se voi absorboida monta tällaista fotonia lisää tai yhden suurempienergisemmän 10 μm fotonin. Fluoriatomien poistamisen jälkeen tuloksena on $^{235}\text{UF}_5$ -jauhetta, joka voidaan kerätä kaasun joukosta suodattamalla. Seuraavassa vaiheessa jauhe täytyy muuttua takaisin UF_6 -kaasuksi, jotta väkevöintiä voidaan jatkaa. (Krass et al. 1983: 169)



Kuva 10. Fluori-atomien erotus UF_6 -molekyylissä. (Krass et al. 1983: 169)

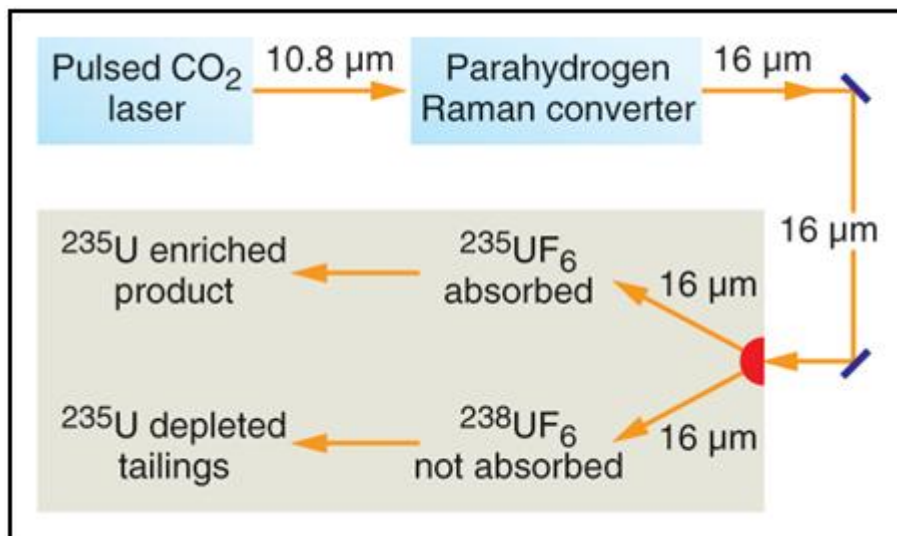
Uraaniheksafluoridin (UF_6) kanssa suoraan kosketukseen joutuvat osat pitää valmistaa sen korroosion kestävästä materiaaleista, joita ovat mm. kupari, ruostumaton teräs ja alumiini. (U.S.NRC 2010)

3.3.3 SILEX (Separation of Isotopes by Laser Excitation)

Ainoa tällä hetkellä kehitteillä oleva laserimetelmä on SILEX. Tämän tekniikan kehitystyön aloittivat Australialaiset tiedemiehet M. Goldsworthy ja H. Struve 1990-luvun taitteessa. USEC (United States Enrichment Corporation) rahoitti ja avusti menetelmän kehittämistä vuodesta 1996 vuoteen 2002. General Electric Company ja Silex Systems Limited solmivat kaupallistamis- ja lisenssisopimuksen SILEX-menetelmästä vuonna 2006. Tämän

jälkeen projekti siirrettiin Yhdysvaltoihin Wilmingtoniin ja menetelmän kaupallistamiseksi perustettiin Global Laser Enrichment (GLE), joka on General Electric-Hitachin tytäryhtiö. Vuonna 2008 myös maailman suurin uraanin tuottaja Cameco liittyi GLE:n osaomistajaksi. (SSL)

SILEX-menetelmässä uraani syötetään prosessiin samalla tavoin, kuin MLIS-menetelmässä, eli UF_6 -kaasu sekoitettuna toiseen kaasuun. Myös tässä menetelmässä kaasuseos pitää jäädyttää alhaiseen lämpötilaan resonanssihiikkien erottamisen helpottamiseksi. Kuvassa 11 on esitetty SILEX-menetelmän periaate. Siinä käytetään hiilidioksidilaserpulssia, jonka aallonpituus on $10,8 \mu\text{m}$. Jotta voitaisiin erottaa ^{235}U - ja ^{238}U -isotooppeja sisältävät UF_6 -molekyylit toisistaan, pitää laserpulssin aallonpituus muuntaa $16 \mu\text{m}$:ksi. Kun ^{235}U -isotooppia sisältävät UF_6 -molekyylit ovat absorboineet fotonin, voidaan ne kerätä talteen sähkömagneettisesti. (Lyman 2005: 2)



Kuva 11. SILEX-menetelmä. (Hecht 2007: 29)

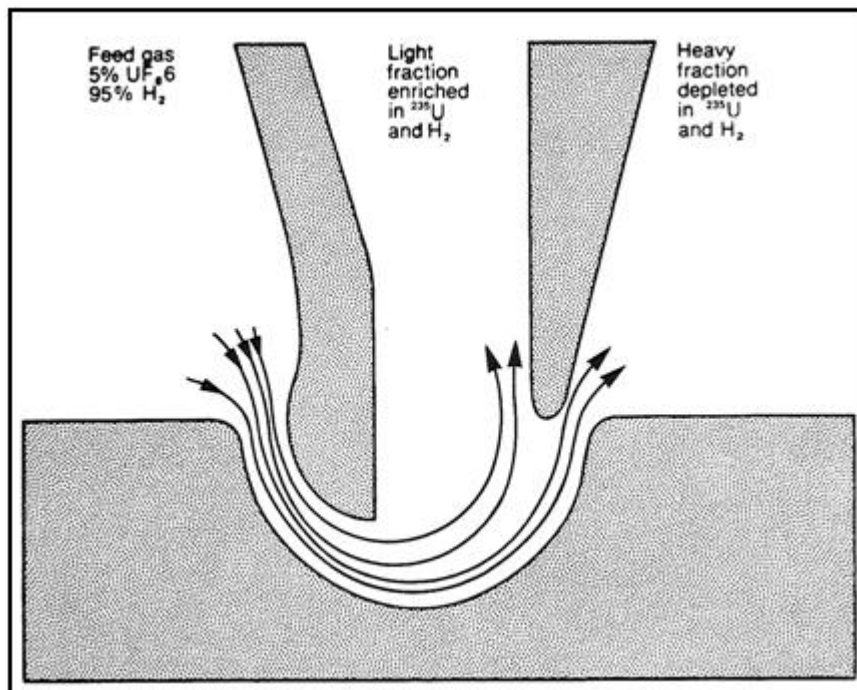
Ongelmat lasermenetelmissä liittyvät pääosin käytössä oleviin lasereihin. Tätä tekniikkaa käyttävä suuren luokan väkevöintilaitos vaatii samassa ajassa useampia pulsseja tuottavia ja tehokkaampia lasereita mitä viime vuosina on ollut saatavilla. (Lyman 2005: 3)

3.4 Muut

Maailmassa on kehitetty ja tutkittu aikojen saatossa monia muitakin uraanin väkevöimiseen käytettäviä menetelmiä. Seuraavaksi esitellään näistä sellaiset menetelmät, jotka ovat periaatteiltaan osoittautuneet käytettäväksi laajaan tuotantoon. Menetelmät ovat kuitenkin osoittautuneet teknisesti tai taloudellisesti kannattamattomiksi, eivätkä sen vuoksi ole enää laajan tutkimuksen kohteena. Menetelmien toimintaperiaatteet ja historia käydään läpi hyvin pintapuolisesti.

3.4.1 Aerodynaamiset menetelmät

Menestyksekkäin aerodynaaminen uraanin väkevöintimenetelmä on saksalaisen E.W. Beckerin keksimä ja kehittämä Becker jet nozzle. Tätä tekniikkaa kehitettiin myöhemmin myös Etelä-Afrikassa, Alankomaissa ja Brasiliassa. Kuvassa 12 on esitettyä tämän menetelmän peruselementti eli isotooppien erotukseen käytettävä suutin (poikkileikkaus).



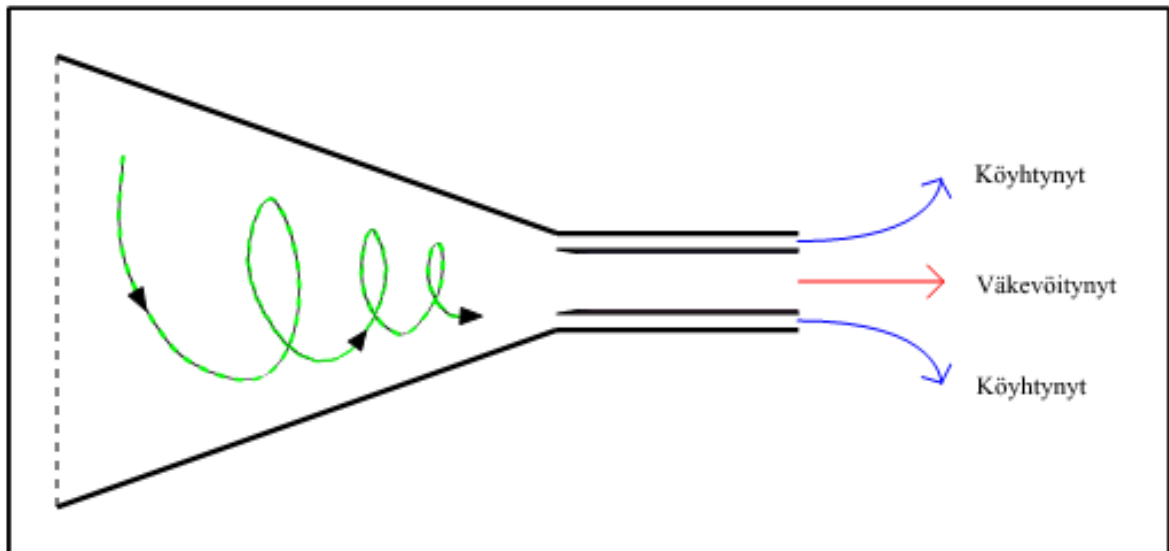
Kuva 12. Becker jet nozzle. (Marshall 1983: 136)

Tässä menetelmässä uraani tuodaan suuttimelle seoksena, josta n. 4–5 % on UF₆-kaasua ja vastaavasti n. 95–96 % on vetyä (H₂). Kaasun liikkuesssa suurella nopeudella kaarevaa ka-

navaa pitkin, siinä olevat raskaammat molekyylit pyrkivät menemään ulkokaarteeseen. Kanavan lopussa oleva terävä reuna jakaa virtauksen väkevöityyn ja köyhtyneeseen osaan. Vedyn rooli syötettävässä seoksessa on tärkeä, sillä kevyemmät ja nopeammat H_2 -molekyylit mm. raahaavat UF_6 -molekyylejä mukanaan ja siten nopeuttavat niitä. (Krass et al. 1983: 137–139)

Kaarevan virtauskanavan säde on tyypillisesti 0,05–0,1 mm ja se pitää valmistaa UF_6 -kaasun aiheuttaman korroosion kestävästä materiaaleista (U.S.NRC 2010), joita on aiemmin tässä työssä jo lueteltu.

Toinen enemmän kehitteillä ollut aerodynaaminen menetelmä on Etelä-Afrikassa kehitetty Helikon-prosessi, jossa käytetään kuvan 13 kaltaista vortex-putkea isotooppien erotukseen. Uraani tuodaan prosessiin seoksena, josta n. 1–2 % on UF_6 -kaasua ja vastaavasti n. 98–99 % on vetyä. Kaasuseos syötetään suurella nopeudella putkeen siten, että kaasu joutuu pyörivään liikkeeseen. Tällöin raskaammat molekyylit menevät putken reunoille ja kevyemmät jäävät keskemmälle. Putken lopussa väkevöitynyt ja köyhtynyt osa kerätään erikseen putken reunoilta ja keskeltä. (Krass et al. 1983: 143)

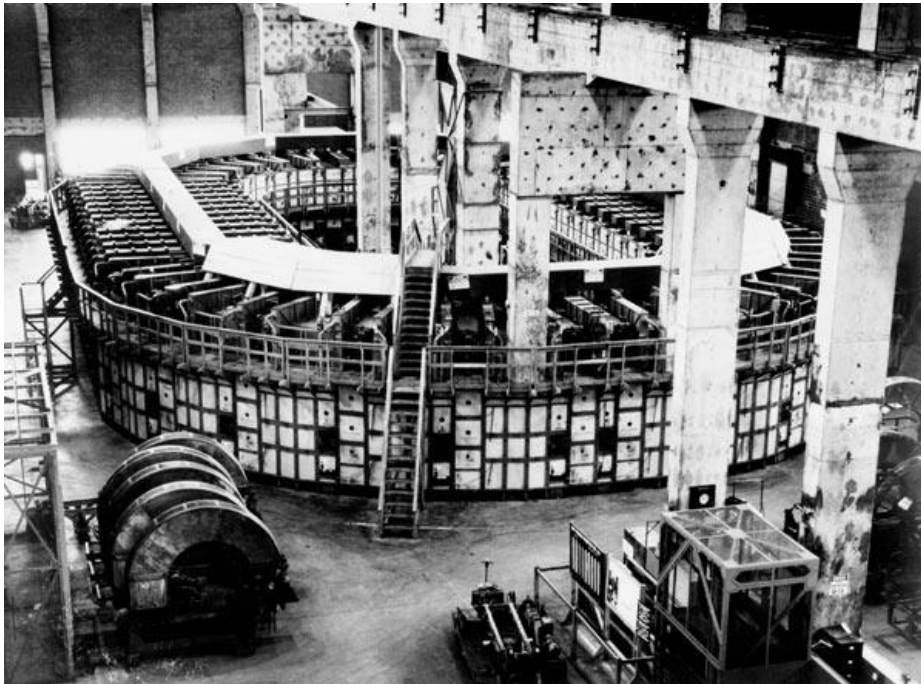


Kuva 13. Vortex-putki. (Krass et al. 1983: 144)

Putkien halkaisija vaihtelee 0,5 ja 4 senttimetrin välillä ja materiaalivalinnoissa pitää ottaa huomioon UF_6 -kaasun aiheuttama korroosio. (U.S.NRC 2010)

3.4.2 Sähkömagneettinen erotus

Tämä on kaasudiffuusion ja sentrifugimenetelmän lisäksi ainoa uraanin väkevöintimenetelmä, jota on menneisyydessä käytetty uraanin väkevöimiseen suuressa mittakaavassa. Laite nimeltä Calutron (kuva 14) kehitettiin toisen maailmansodan aikana osana Manhattan-projektia ja sitä käytettiin ydinasemateriaalin tuottamiseen.



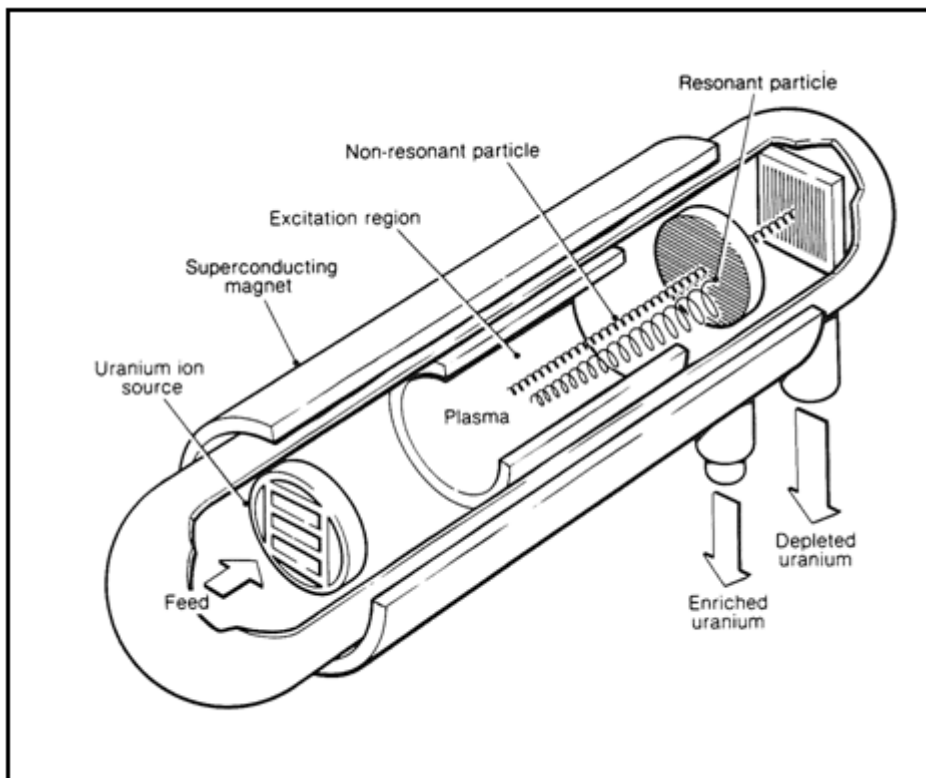
Kuva 14. Calutron, Oak Ridge Tennessee (Makhijani et al. 2005: 14).

Sähkömagneettinen erotus perustuu siihen, että magneettikentässä liikuessaan, varatut hiukkaset seuraavat kaarevaa rataa hiukkasten massasta riippuvalla säteellä. Raskaammat hiukkaset kiertävät suurempaa rataa kuin kevyemmät olettaen, että hiukkasilla on sama varaus ja nopeus. Itse prosessissa uraani-ionit kiihdytetään ja saatetaan voimakkaaseen magneettikenttään. Kun ionit ovat kuvan 14 laitteessa kiertäneet puoliympyrän, raskaammat ^{238}U -ionit ovat keskittyneet ulkoreunalle ja kevyemmät ^{235}U -ionit vastaavasti keskemmälle. Ongelmana tässä menetelmässä on tarvittava suuri energiamäärä magneettikentän ylläpitämiseksi ja yhdellä kerralla syötettävästä materiaalista saatava vähäinen tuote. (Makhijani et al. 2005: 15)

3.4.3 Plasmaerotus

Vuonna 1977 esitettiin eräs plasmaerotus-prosessi, joka perustuu ilmiöön nimeltä ionin syklotroni resonanssi. Tämä tarkoittaa sitä, että ionit liikkuvat magneettikentässä sitä vastaan kohtisuoria ympyrä ratoja pitkin. Jokaisella ionilla on magneettikentässä oma syklotronitaajuus (kulmanopeus), joka riippuu mm. ionin massasta, varauksesta ja magneettikentän voimakkuudesta. Ionien nopeuden kasvaessa myös radan säde kasvaa syklotronitaajuuden pysyessä vakiona. (Huttula 2007: 46)

Kyseinen menetelmä on esitettyä kuvassa 15. Uraani-ioneista koostuva plasma kulkee magneettikentässä. Samaan aikaan ioneita kiihdytetään sähkökentällä, jonka taajuus vastaa ^{235}U -ionin syklotronitaajuutta. Tämä vaikuttaa valikoivasti ^{235}U -ionien rotaatioon nopeuttamalla niitä ja siten suurentamalla niiden kiertorataa. Tämän jälkeen ^{235}U -ionit voidaan erottaa ^{238}U -ioneista oikein asetelluilla keräimillä. (Marshall 1983: 137)



Kuva 15. Havainnollinen kuva ioni syklotroni resonanssiin perustuvasta plasmaerotuksesta (Marshall 1983: 138).

Plasmasentrifugikonseptista on olemassa monia variaatioita, mutta mm. vaaditut erittäin korkeat lämpötilat ja rotaatiossa olevan plasman huono fysikaalinen tuntemus ovat olleet esteenä tekniikoiden kehittämiseksi (Marshall 1983: 137).

3.4.4 Kemiallinen erotus

Kemiallisia väkevöintimenetelmiä kehitettiin kuumeisesti toisen maailmansodan jälkeen, mutta ne ovat kerta toisensa jälkeen osoittautuneet liian kalleiksi sekä liian hitaiksi. Kemialliset menetelmät perustuvat eri isotooppien hieman erilaisiin kemiallisiin ominaisuuksiin. Japanilainen ja ranskalainen prosessi ovat eniten kehittyneitä kemiallisia väkevöintimenetelmiä. (Makhijani et al. 2004: 16)

Japanilaisessa prosessissa käytetään isotooppien erottamiseen hienosta pulverista koostuvaa ioninvaihtohartsia, jolla on taipumus vetää valikoivasti puoleensa kemiallisilta ominaisuuksiltaan erilaisia aineita. (Krass et al. 1983: 150)

Ranskalaisessa prosessissa kemiallinen vaihto tapahtuu kahteen toisiinsa sekoittumattomaan nesteeseen liuenneiden uraaniatomien välillä. Toinen nesteistä on vesipohjainen ja toinen orgaaninen liuos. (Krass et al. 1983: 154)

4 LAITOKSET

Taulukossa 2 on esiteltynä maailmalla parhaillaan toiminnassa olevat kaupalliset uraanin väkevöintilaitokset sekä niiden sijainnit ja arviot nimellisistä väkevöintikapasiteeteista (kapasiteetit eri lähteissä erilaisia). Siitä nähdään, että Ranska ja USA ovat ainoat maat, joissa on käytössä kaasudiffuusiolaitokset. Muut maat käyttävät jo pelkästään sentrifugilaitoksia. Taulukosta myös huomataan, että eniten ydinvoimaa käyttävissä maissa (Ranska, USA ja Venäjä) on luonnollisesti myös suurimmat väkevöintikapasiteetit käytössä. Näiden laitosten lisäksi maailmalla on käytössä muutamia pienempiä yksiköitä mm. Brasiliassa, Intiassa ja Iranissa.

Taulukko 2. Toiminnassa olevat kaupalliset uraanin väkevöintilaitokset. (IAEA 2009: 55, ellei toisin mainita)

Maa	Laitos	Menetelmä	Kapasiteetti (1000 SWU/a)
Kiina	Lanzhou 2	sentrifugi	500
Kiina	Shaanxi	sentrifugi	500
Ranska	Eurodif (Georges Besse)	kaasudiffuusio	10800
Saksa ¹	Urenco Germany GmbH	sentrifugi	2750
Japani	Rokkasho	sentrifugi	1050
Alankomaat ¹	Urenco Nederland	sentrifugi	4400
Pakistan	Kahuta	sentrifugi	5
Venäjä ²	Angarsk	sentrifugi	2600
Venäjä ²	Novouralsk	sentrifugi	12160
Venäjä ²	Zelenogorsk	sentrifugi	7210
Venäjä ²	Seversk	sentrifugi	3550
Iso-Britannia ¹	Urenco UK Ltd.	sentrifugi	5050
USA	Paducah Gaseous Diffusion	kaasudiffuusio	11300

(¹ Urencon laitosten kapasiteetit (Urenco), ² Venäjän laitosten kapasiteetit (SIPRI 2007: 570))

Taulukosta 3 huomataan miten tulevaisuudessa jo vanhentuneet ensimmäisen sukupolven diffuusiolaitokset tullaan korvaamaan uudemmilla sentrifugilaitoksilla ja mahdollisesti myös lasermenetelmillä mikäli ne saadaan toimimaan siten, että ne ovat kaupallisesti kannattavia. Taulukossa oleva HEU (Highly Enriched Uranium) tarkoittaa ydinasemateriaalia, jota laimennetaan kaupalliseen käyttöön sopivaksi.

Taulukko 3. Väkevöintimenetelmien osuudet kaupallisesta tuotannosta. (WNA)

Menetelmä	2007	2017
Kaasudiffuusio	25 %	0 %
Sentrifugi	65 %	93 %
Laser	0 %	3 %
HEU	10 %	4 %

Uusia kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja uraanin väkevöintilaitoksia on rakenteilla tai suunnitteilla mm. Yhdysvaltoihin ja Ranskaan.

AREVA on parhaillaan rakentamassa Ranskaan Georges Besse II -sentrifugilaitosta, joka koostuu kahdesta yksiköstä, yhteiskapasiteetiltaan 7500000 SWU/a. Ensimmäinen yksikkö käynnistyi Huhtikuussa 2009 ja toisen yksikön on tarkoitus käynnistyä vuoden 2010 alkupuolella. Koko laitospasiteetti saadaan käyttöön vuoteen 2018 mennessä. AREVA myös ilmoitti vuonna 2007 rakentavansa 3000000 SWU/a sentrifugilaitoksen yhdysvaltojen Eagle Rockiin, jonka on tarkoitus aloittaa tuotanto vuoteen 2014 mennessä. (AREVA)

USEC on rakentanut sentrifugilaitosta Piketoniin Ohioon vuodesta 2007 lähtien, joka tunnetaan nimeltä American Centrifuge Plant (ACP). Laitoksen kapasiteetti tulee olemaan 3800000 SWU/a. Ensimmäinen kaskadi tuotantovalmiita sentrifugeja aloitti toimintansa Maaliskuussa 2010. Tämä laitos käyttää uusia AC100-sentrifugeja (kuva 5), joiden arvioidaan olevan tähän mennessä kehittyneimpiä uraanin väkevöintilaitteita. (USEC)

Urencon tytäryhtiö Louisiana Energy Services (LES) on rakentamassa sentrifugilaitosta kapasiteetiltaan 5900000 SWU/a Euniceen New Mexicoon, jonka on arvioitu tuottavan sen verran väkevöityä uraania, että se valmistuessaan kattaa 10 % Yhdysvaltojen sähköntarpeesta. (Urenco)

GE-Hitachi on alkanut SILEX eli GLE-menetelmää käyttävän kaupallisen uraanin väkevöintilaitoksen suunnittelun alkuperäisistä testeistä saatujen hyvien tulosten pohjalta. Koko testijakson odotetaan antavan vuoden 2010 loppuun mennessä todisteet siitä, kannattaako täyden kokoluokan laitosta rakentaa. Mikäli päätös on myönteinen, tavoitteena on alkaa kapasiteetiltaan 3,5–6 miljoonan SWU/a väkevöintilaitoksen rakentaminen vuonna 2012. (WNA)

Muita meneillään olevia hieman pienemmän luokan väkevöintilaitosprojekteja ovat mm. Resenden laitos Brasiliassa, jonka on määrä valmistua vuonna 2010, sekä Natanzin laitos Iranissa, jota epäillään käytettävän tulevaisuudessa aseuraanin tuotantoon. Myös useiden vanhempien sentrifugilaitoksien kapasiteetteja on jo lisätty tai ollaan lisäämässä. (WISE Uranium Project)

5 MENETELMIEN VERTAILU

Taulukossa 4 on lueteltuna eri menetelmien erotustekijät ja energian kulutus. Erotustekijä on yhdessä elementissä saavutettava ^{235}U -pitoisuuden nousu. Mitä pienempi erotustekijä, sitä enemmän elementtejä tarvitaan halutun väkevöintiasteen saavuttamiseksi. Tämä taas vaikuttaa suoraan laitoksen kokoon ja energiankulutukseen. Taulukosta voidaan selvästi nähdä mm. se, minkä vuoksi vanhoja diffuusiolaitoksia ollaan korvaamassa uusilla sentrifugilaitoksilla. Kaasudiffuusiomenetelmässä on sentrifugimenetelmään verrattuna heikko erotustekijä ja suuri energian kulutus. Sentrifugimenetelmän etuna kaasudiffuusiomenetelmään nähden on näiden lisäksi mm. huomattavasti lyhempi tasapaino aika. Lasermenetelmät vaikuttavat edellä mainittujen tekijöiden osalta erittäin hyviltä vaihtoehdoilta, mutta kehitystä edelleen kaivataan mm. lasereiden osalta. SSL:n mukaan uudessa SILEX-menetelmässä erotustekijä on mahdollisesti n. 2–20, joka toteutuessaan oli huomattavasti suurempi kuin muissa menetelmissä (SSL).

Taulukko 4. Väkevöintimenetelmien vertailua. (Tyson 1991)

Prosessi	Erotustekijä	Energiankulutus [kWh/SWU]
<i>Kaasudiffuusio</i>	1,004	2500
<i>Sentrifugi</i>	1,2 – 1,5	50
<i>Becker</i>	1,015	3600
<i>Helikon</i>	1,03	3000 – 4000
<i>Kemiallinen</i>	1,001 – 1,002	150 – 375
<i>Sähkömagneettinen</i>	1,15 – 1,20	3000 – 4000
<i>Plasma</i>	1,035 – 1,1	200 – 600
<i>AVLIS</i>	1,05 – 1,15	40
<i>MLIS</i>	1,05 – 1,15	30

Taulukoissa 5, 6, 7 ja 8 esitellään arvioita nykyisten sekä tulevien laitosten vuotuisista sekä investointikustannuksista ja SWUn hinnoista. Paremmen vertailun vuoksi kaikki arvot ovat muunnettuna vuoden 2006 dollareihin käyttäen tilastollisia menetelmiä ja tiettyjä oletuksia, joita voi paremmin tarkastella lähteestä (Rothwell 2008).

Taulukosta 5 nähdään, miten suuret vuotuiset kustannukset ja SWUn hinnat käytössä olevilla kaasudiffuusiolaitoksilla on. Suuret vuotuiset kustannukset koostuvat lähes 85 pro-

senttisesti kaasudiffuusiolaitosten sähkönkulutuksesta. Tämä taas johtaa muihin laitoksiin verrattain suureen SWUn hintaan.

Taulukosta 7 havaitaan Venäjän laitosten pienet kustannukset ja SWUn hinnat. Tämä johtuu mm. halvasta sähkön hinnasta, edullisista materiaaleista ja työvoimasta sekä korkealle kehittyneestä sentrifugiteknologiasta. Taulukosta 8 nähdään, että tulevien sentrifugilaitosten kustannukset tulevat olemaan hyvin samanlaisia, kuin jo käytössä olevissa sentrifugilaitoksissa, joita on esiteltyä taulukossa 6. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että mitä suurempi kapasiteetti laitoksella on, sitä halvemaksi uraanin väkeväinti tulee, vaikkakin vuotuiset ja investointikustannukset luonnollisesti nousevat kapasiteetin kohotessa.

Taulukko 5. Diffuusiolaitosten kustannukset. (Rothwell 2008: 19)

Yhtiö		USEC	Areva
Laitos	(2006 \$)	Paducah	Eurodif
Kapasiteetti	1000 SWU/a	8000	11300
Investointi	milj. \$	3534	4547
Vuotuinen kustannus	milj. \$	1569	1432
SWUn hinta	\$/SWU	137	130

Taulukko 6. Euroopan ja Japanin sentrifugilaitosten kustannusarviot. (Rothwell 2008: 18)

Yhtiö		Urenco	Urenco	Urenco	JNFL
Laitos	(2006 \$)	Capenhurst	Almelo	Gronau	Rokkasho
Kapasiteetti	1000 SWU/a	3400	2900	1800	1250
Investointi	milj. \$	1892	1685	1189	911
Vuotuinen kustannus	milj. \$	201	181	130	102
SWUn hinta	\$/SWU	59	62	72	81

Taulukko 7. Venäjän sentrifugilaitosten kustannusarviot. (Rothwell 2008: 19)

Yhtiö		Rosatom	Rosatom	Rosatom	Rosatom
Laitos	(2006 \$)	Novouralsk	Zelenogorsk	Seversk	Angarsk
Kapasiteetti	1000 SWU/a	9000	5000	3000	2000
Investointi	milj. \$	3851	2507	1727	1284
Vuotuinen kustannus	milj. \$	277	183	127	96
SWUn hinta	\$/SWU	31	37	42	48

Taulukko 8. Tulevien sentrifugilaitosten kustannusarviot. (Rothwell 2008: 18)

Yhtiö Laitos	(2006 \$)	USEC ACP	Urenco NEF	Areva Besse II	INBrazil Resende
Kapasiteetti	1000 SWU/a	3800	3000	7500	203
Investointi	milj. \$	2645	1779	4389	300
Vuotuinen kustannus	milj. \$	272	170	420	30
SWU:n hinta	\$/SWU	72	57	56	147

6 YHTEENVETO

Uraanin väkevöinnin historia lähti kunnolla liikkeelle toisesta maailmansodasta, jolloin tavoitteena oli valmistaa materiaalia ydinaseisiin. Yli 90 % nykyisin toimivista ydinvoimalaitoksista käyttää polttoaineenaan väkevöityä uraania, jonka ^{235}U -pitoisuus on vähintään 3 %. Nykyisin kaupallisessa käytössä olevat uraanin väkevöintimenetelmät ovat sentrifugi- ja kaasudiffuusiomenetelmät. Muitakin tekniikoita on tutkittu ja kehitetty, mutta ne ovat tavalla tai toisella osoittautuneet teknisesti tai taloudellisesti kannattamattomiksi.

Kaikkien väkevöintimenetelmien perusosa on väkevöintielementti, jossa syötettävä materiaali jakautuu väkevöityneeseen ja köyhtyneeseen osaan. Elementin erotustekijä määrää sen miten monta elementtiä tarvitaan peräkkäin, jotta saavutetaan haluttu väkevöintiaste. Useimmissa menetelmissä haluttuun väkevöintiasteeseen pääsemiseksi pitää olla monta elementtiä rinnan yhdessä vaiheessa ja monta vaihetta peräkkäin, jolloin elementit on järjestetty ns. kaskadiksi.

Eri väkevöintimenetelmät perustuvat mm. uraanin isotooppien 235 ja 238 väliseen massaeroon, erilaiseen kemialliseen käytökseen tai atomien/molekyylien eri sidosenergioihin. Uraani syötetään useimmissa menetelmissä systeemiin UF_6 -kaasuna (sentrifugi, kaasudiffuusio), mutta jotkut menetelmät käyttävät mm. uraanimetallia (AVLIS) tai uraani-ioneista koostuvaa plasmaa (sähkömagneettinen, plasma).

Tulevien vuosien aikana kaasudiffuusiolaitokset tullaan sulkemaan, koska niillä on verrattain huonot erotustekijät ja suuri energiankulutus. Nämä tullaan korvaamaan kehittyneimmillä sentrifugilaitoksilla, joita on jo rakenteilla mm. Ranskassa ja Yhdysvalloissa, sekä mahdollisesti laser menetelmiä käyttävillä laiteilla.

LÄHDELUETTELO

ACP, The American Centrifuge Project (päivitetty 14.4.2010). *Information Center*. [Viitattu 16.4.2010].

Saatavissa <http://www.americacentrifuge.com/informationcenter.htm>.

AREVA. *A new age for enrichment in France*. [Viitattu 18.4.2010].

Saatavissa <http://www.aveva.com/EN/operations-887/georges-besse-ii-uranium-enrichment-via-centrifugation.html>.

Barzashka, I. & I. Oelrich. *Engineering Considerations for Gas Centrifuges*. Federation of American Scientists (FAS). [Viitattu 8.4.2010].

Saatavissa: <http://www.fas.org/programs/ssp/nukes/fuelcycle/centrifuges/engineering.html>.

Cochran, G.C. & N. Tsoulfanidis (1992). *The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management*. 378 s. American Nuclear Society, La Grange Park.

Hecht Jeff (2007). *Sillex uranium-enrichment scheme may not be mature enough for practical use*. *Laser Focus World* 2007, vol 43; nro 10 s. 29–31. [Viitattu 22.3.2010].

Saatavilla: <http://www.lfw-digital.com/lfw/200710/?pg=32>.

Huttula Marko (2007). *Massaspektroskopia*. 68 s. Oulun Yliopisto, Oulu. [Viitattu 16.4.2010].

Saatavissa <http://physics oulu.fi/fysiikka/oj/764359A/2007/Massasp.Luentomoniste-2007.pdf>.

IAEA, International Atomic Energy Agency (2009). *Nuclear Fuel Cycle Information System: A Directory of Nuclear Fuel Cycle Facilities 2009 Edition*. 75 s. IAEA, Wien. [Viitattu 21.3.2010].

Saatavissa: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_infcis_NFCIS.html.

IPFM, International Panel on Fissile Materials. *Fissile materials & nuclear weapons: production*. [Viitattu 8.4.2010].

Saatavissa http://www.fissilematerials.org/ipfm/pages_us_en/fissile/production-production.php.

Krass, A.S., P. Boskma, B. Elzen & W.A. Smit (1983). *Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation*. 296 s. Taylor & Francis, Lontoo.

Lyman, J.L. (2005). *Enrichment Separative Capacity for SILEX*. 7 s. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos. [Viitattu 22.3.2010].

Saatavissa: <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/docs4/silex.pdf>.

Makhijani, A., L. Chalmers & B. Smith (2004). *Uranium Enrichment*. 47 s. Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park. [Viitattu 14.3.2010].

Saatavissa: <http://www.ieer.org/pubs>

Marshall, W. (1983). *Nuclear power technology. vol. 2, Fuel Cycle*. 456 s. Clarendon Press, Oxford.

MSNBC (päivitetty 9.2.2010). *Defiant Iran accelerates nuclear program*. [Viitattu 9.4.2010].

Saatavissa http://www.msnbc.msn.com/id/35308590/ns/world_news-mideastn_africa.

Rothwell, G. & C. Braun (2008). *THE COST STRUCTURE OF INTERNATIONAL URANIUM ENRICHMENT SERVICE SUPPLY*. 20 s. Science & Global Security. [Viitattu: 24.4.2010].

Saatavissa: <http://web.mit.edu/stgs/pdfs/RothwellBraunEnrichment.pdf>.

Settle, Frank. *Nuclear Chemistry: Uranium Enrichment*. Chemcases. [Viitattu 8.4.2010].

Saatavissa: <http://www.chemcases.com/nuclear/nc-07.html>.

SIPRI Yearbook 2007: Armaments, Disarmament and International Security. 752 s.
Oxford University Press. [Viitattu 18.4.2010]
Saatavissa <http://yearbook2007.sipri.org>.

SSL, Silex Systems Limited. *Company history*. [Viitattu 13.4.2010].
Saatavissa: <http://www.silex.com.au>.

Tyson, Sean (1991). *URANIUM ENRICHMENT TECHNOLOGIES: PROLIFERATION IMPLICATIONS*. [Viitattu 22.3.2010].
Saatavissa: <http://www.nti.org/db/archives/nuc/eos/tyson.htm>.

Urenco (2003). *Uranium enrichment*. 2. pain. 18 s.

Urenco. *Company structure*. [Viitattu 18.4.2010].
Saatavissa <http://www.urengo.com/content/17/Company-structure.aspx>.

USEC, United States Enrichment Company. *The American Centrifuge*. [Viitattu 18.4.2010].
Saatavissa <http://www.usec.com/americancentrifuge.htm>.

U.S.NRC, United States Nuclear Regulatory Commission (10.3.2010). *PART 110-- EXPORT AND IMPORT OF NUCLEAR EQUIPMENT AND MATERIAL*. [Viitattu 2.4.2010].
Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part110/full-text.html>.

WISE Uranium Project (päivitetty 29.3.2010). *Uranium Enrichment and Fuel Fabrication - Current Issues (Other Countries)*. [Viitattu 18.4.2010].
Saatavissa <http://www.wise-uranium.org/eproj.html>.

WNA, World Nuclear Association. *Uranium Enrichment*. [Viitattu 28.3.2010].
Saatavissa: <http://world-nuclear.org/info/inf28.html>.