

# Uraanin väkevöinti

Joona Kurki

Nykyään käytössä olevista ydinvoimalaitoksista valtaosa on uraanioksidia polttoaineena käyttäviä kevytvesireaktoreja. Kevytvesihidasteista reaktoria ei ole mahdollista saada kriittiseksi luonnonuraanilla, joka sisältää suhteellisen pienen osuuden fissiiliä isotooppia U-235. Tämän takia luonnonuraani on väkevöitävä fissiilin isotoopin suhteen, jotta sitä voitaisiin käyttää kevytvesireaktorin polttoaineena. Vaikka vaihtoehtoisia polttoaineita ja polttoainesyklejä on suunniteltu otettavan käyttöön tulevaisuudessa, tulee lievästi väkevöidyllä uraanilla olemaan vallitseva asema ydinvoimalaitosten polttoaineena vielä useamman vuosikymmenen ajan.

Uraanin väkevöinti on haasteellinen tekninen ongelma sillä saman alkuaineen isotooppeja ei ole mahdollista erottaa toisistaan kemiallisiin reaktioihin perustuvilla menetelmillä. Isotooppien separoinnin on siten perustuttava puhtaasti fysikaalisiin ominaisuuksiin, joista perinteisesti merkittävin on ollut eri isotooppien välinen massaero. Massaero on kuitenkin raskaiden alkuaineiden – kuten uraanin – tapauksessa erittäin pieni, mistä seuraa väistämättä erotusprosessin pieni tehokkuus. Tehokkuuden parantamiseksi on tutkittu useita eri väkevöintitekniikoita, mutta ensimmäiset 1940-luvulla kehitetyt menetelmät ovat silti yhä käytännössä taloudellisimmat. Tällä hetkellä ainoa potentiaalisesti tehokkuutta kasvattava aktiivisesti tutkittu menetelmä on nk. *laser-isotooppierotus*, joka saatetaan ottaa käyttöön lähitulevaisuudessa.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 URAANIN VÄKEVÖINTI.....</b>	<b>3</b>
1.1 Väkevöinnin perusteet.....	3
<b>2 VÄKEVÖINTITEKNIIKOITA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Lämpödiffuusiomenetelmä.....	4
2.2 Kaasudiffuusiomenetelmä.....	4
2.3 Sentrifugimenetelmä.....	5
2.4 Sähkömagneettinen menetelmä.....	5
2.5 Aerodynaamiset prosessit.....	6
2.6 Laser-menetelmä.....	6
2.7 Kemialliset menetelmät.....	7
2.8 Plasmamenetelmät.....	7
<b>3 VÄKEVÖINTI TÄNÄÄN JA TULEVAISUUDESSA.....</b>	<b>7</b>
3.1 Käytössä oleva väkevöintilaitokset.....	7
3.2 Rakenteilla ja suunnitteilla olevat laitokset.....	8
3.3 Kansainväliset laitokset.....	8
3.4 Tulevaisuuden väkevöintimenetelmät.....	9
<b>4 YHTEENVETO JA POHDINNAT.....</b>	<b>9</b>
<b>5 KIRJALLISUUSVIITTEET.....</b>	<b>10</b>

# 1 URAANIN VÄKEVÖINTI

Ydinreaktori tarvitsee toimiakseen polttoainetta, jonka on sisällettävä reaktorityypistä riippuva suhteellinen määrä fissiilejä isotooppeja jotta jatkuvan fissioketjureaktion ylläpitäminen olisi mahdollista. Yleisimmin käytetty polttoainetyyppi on uraanidioksidi ( $\text{UO}_2$ ), jossa yksi uraaniatomi on yhdistynyt kahteen happiatomiin.

Ainoa maapallolla luonnollisesti esiintyvä fissiili isotooppi on  $^{235}\text{U}$ , jota luonnonuraanista on noin 0,711 %, loppujen ollessa pääosin fertiiliä  $^{238}\text{U}$ :a. Yleisimmin käytössä olevat kevytvesihidasteiset reaktorit kuitenkin vaativat fissiilin  $^{235}\text{U}$ :n osuuden polttoaineen uraanista olevan suurempi, noin 2 – 4 %, joten kevytvesihidasteisen reaktorin polttoaineeksi tarkoitettun luonnonuraanin  $^{235}\text{U}$ -pitoisuutta on nostettava. Tätä fissiilin isotoopin suhteellisen osuuden kasvatusta kutsutaan *väkevöinniksi*.

Alun perin ydinmateriaalin väkevöintitekniikat – kuten koko ydintekniikkakin – kehitettiin sotilaallisiin tarpeisiin toisen maailmansodan aikana: itse asiassa lähes kaikki eri väkevöintitekniikat kehitettiin *Manhattan-projektin* aikana 1940-luvun alkuvuosina.

## 1.1 Väkevöinnin perusteet

Koska saman alkuaineen eri isotoopit ovat kemiallisesti *lähes* identtisiä (sama määrä protoneja sekä elektroneja), ei mikään suoraan kemiallisiin reaktioihin perustuva menetelmä tule kyseeseen isotooppiväkevöinnin aikaansaamiseksi<sup>1</sup>. Tällöin ainoaksi mahdollisuudeksi jää puhtaasti fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuvat prosessit, jotka tyypillisesti eivät ole kovin tehokkaita: suurin osa fysikaalisiin ilmiöihin perustuvista väkevöintiprosesseista perustuu isotooppien eri isotooppien toisistaan poikkeaviin massoihin, mutta koska uraani itsessään on hyvin raskas alkuaine, on sen eri isotooppien välinen suhteellinen massaero hyvin pieni (n. 1 %), mistä väistämättä aiheutuu väkevöintiprosessin heikko tehokkuus.

Suurin osa väkevöintiprosesseista käsittelee uraania kaasumaisessa olomuodossa, jonka vuoksi uraani on ennen väkevöintiä muunnettava helposti kaasuuntuvaan muotoon, lähes poikkeuksetta uraaniheksafluoridiksi  $\text{UF}_6$ , joka kaasuuntuu normaalipaineessa n. 65 °C lämpötilassa. Tätä vaihetta uraanipolttoaineen valmistuksessa kutsutaan *konvertoinniksi*.

Uraaninrikastuksen hintaa mitataan erityisellä yksiköllä, nk. *erotustyöllä* (engl. *separative work unit*, SWU) joka usein ilmaistaan nk. *arvofunktion* (engl. *value function*)

$$V(x) = (1 - 2x) \ln\left(\frac{1-x}{x}\right)$$

avulla, missä  $x$  on väkevöintiaste paino-osuutena. Tällöin rikastuksen hinnaksi saadaan

$$SWU = M_P V(x_P) + M_T V(x_T) - M_F V(x_F)$$

missä  $M_P$  on väkevöidyn lopputuotteen massa (väkevyys  $x_P$ ),  $M_T$  köydytetyn jätteen massa (väkevyys  $x_T$ ), ja  $M_F$  on syöttömassa (väkevyys  $x_F$ ). Yhden SWU:n suuruusluokkaa havainnollistaa esimerkiksi se, että yhden kilogramman 4,5 %:n väkevyteen nostetun uraanin tuottaminen kymmenestä kilosta luonnonuraania maksaa n. 6,1 SWU:ta.

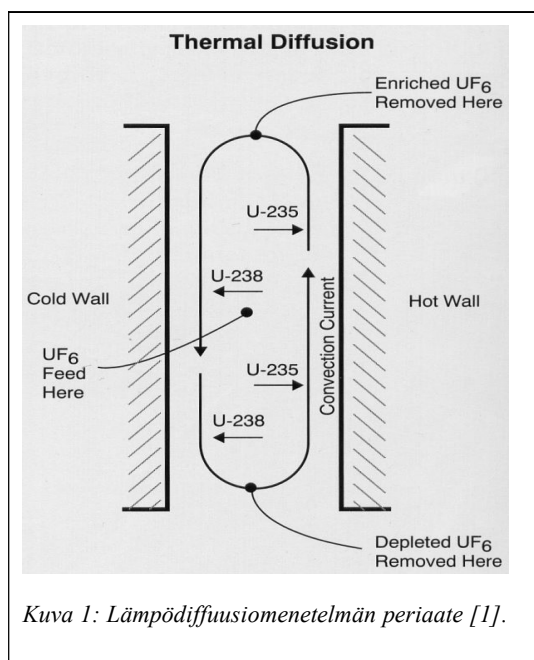
<sup>1</sup> Tähän sääntöön on olemassa kuitenkin poikkeus, josta lisää luvussa 2.7

## 2 VÄKEVÖINTITEKNIKOITA

### 2.1 Lämpödiffuusiomenetelmä

Lämpödiffuusiomenetelmässä kaasumuotoinen uraani johdetaan kahden koaksiaalisen putken väliin. Sisemmässä putkessa virtaava höyry lämmittää uranikaasuputken sisäpintaa, ja putken ulkopintaa jäähdetään vedellä. Näin uranikaasun yli syntyy lämpötilagradientti, jonka vaikutuksesta kevyemmät molekyylit pyrkivät keskittymään lämmitetyn sisäpinnan läheisyyteen. Luonnonkonvektion vaikutuksesta väkevöitynyt uranikaasu kohoaa pikkuhiljaa putken yläosaa kohti.

Käytännössä lämpödiffuusiomenetelmää käytettiin vain hyvin vähän aikaa vuosina 1944 – 1945, ja vain yhdellä laitoksella (S-50 Oak Ridgessä), sillä kaasudiffuusio osoittautui nopeasti kaikin puolin paremmaksi väkevöintimenetelmäksi.



Kuva 1: Lämpödiffuusiomenetelmän periaate [1].

### 2.2 Kaasudiffuusiomenetelmä

Termisessä tasapainossa olevan kaasuseoksen kaikilla molekyyleillä on sama liike-energia, joten kevyet molekyylit liikkuvat raskaita nopeammin:

$$E = \frac{1}{2} Mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{M}}$$

Tämän seurauksena kevyemmät molekyylit törmäilevät raskaita molekyyliä useammin kaasun sisällä olevan säiliön seinämiin. Jos säiliön seinä on tehty huokoisesta materiaalista, ja sen ulkopuolella olevan kaasun paine on sopivasti säiliön sisäistä painetta pienempi, sisältää säiliöstä ulosvuotava kaasu suhteessa enemmän kevyitä molekyyliä kuin mikä kevyiden molekyylien osuus säiliön sisällä on, eli säiliön ulkopuolinen kaasu väkevöityy kevyemmän isotoopin suhteen, ja alkuperäinen kaasu köyhtyy. Teoreettisesti voidaan johtaa huokoisen seinämän läpi virtaavalle kaasulle verranto:

$$J_i \sim \sqrt{M_i}$$

Kaasudiffuusiomenetelmässä yksittäisen vaiheen erotuskyky on todella pieni (teoreettinen maksimi 1,0043), joten useammasta väkevöintivaiheesta on koottava nk. väkevöintikaskadi jotta haluttuihin lopputuotteen väkevyyksiin olisi mahdollista päästä. Tyypillisessä kaasudiffuusioikaskadissa on yli 1000 peräkkäistä diffuusiovaihetta, joten tämäntyyppiset laitokset ovatkin hyvin suuria ja kuluttavat suunnattomia määriä energiaa.

Kaasudiffuusiomenetelmä on toinen nykyään suurella mittakaavalla käytössä olevista väkevöintimenetelmistä. Sitä on käytetty Yhdysvalloissa, Venäjällä, Iso-Britanniassa, Ranskassa, Kiinassa ja Argentiinassa, mutta nykyään tuotantokäytössä olevia

kaasudiffuusiolaitoksia on enää Yhdysvalloissa (USEC:in laitos Paducahissa, Kentuckyssa) ja Ranskassa (Eurodifin laitos Tricastinissa).

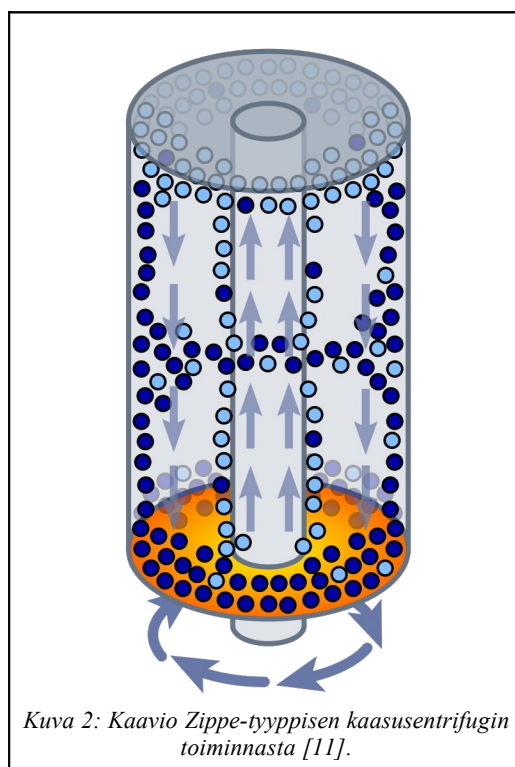
## 2.3 Sentrifugimenetelmä

Sentrifugimenetelmässä uraanikaasu johdetaan nopeasti pyörivään sentrifugiin. Keskeiskiihtyvyyden vaikutuksesta raskaat molekyylit pyrkivät keskittymään säiliön ulkoreunalle, jolloin keskiosassa oleva kaasu väkevöityy hieman kevyemmän U-235-isotoopin suhteen.

Yksittäisen sentrifugin väkevöintikapasiteetti on pienempi kuin yksittäisen kaasudiffuusiiovaiheen pienen kokonsa takia, mutta erotuskyky on silti huomattavasti korkeampi. Sentrifugilaitoksilla yksittäinen vaihe koostuu useista rinnakkaisista sentrifugeista, jotta massavirta saadaan riittävän suureksi, ja koko väkevöintikaskadiin erillisiä vaiheita tarvitaan tyypillisesti 10 – 20, eli huomattavasti vähemmän kuin kaasudiffuusiolaitoksissa.

Sentrifugimenetelmä oli yksi ensimmäisistä ehdotetuista väkevöintimenetelmistä jotka kehitettiin Yhdysvalloissa toisen maailmansodan aikana, mutta tuolloin sen käyttöönottoa suuressa mittakaavassa lykättiin kaasudiffuusiomenetelmän käyttöönoton tieltä. Nykyään trendi on päinvastainen: kun nykyään käytössä olevat kaasudiffuusiolaitokset suljetaan, ne korvataan sentrifugimenetelmään perustuvilla laitoksilla.

Sentrifugimenetelmä on nykyään ylivoimaisesti käytetyin väkevöintimenetelmä sen suuren tehokkuuden takia: uusilla sentrifugilaitoksilla on laskettu saavutettavan sama erotustyö käyttäen 95 % vähemmän energiaa kuin perinteisillä kaasudiffuusiolaitoksilla [6].



## 2.4 Sähkömagneettinen menetelmä

Sähkömagneettinen menetelmä on *massaspektrometrin* sovellus suuren mittakaavan isotooppiseparaatioon. Sähkömagneettisessa menetelmässä ionisoitu isotooppisuihku ohjataan magneettikenttään, jossa erimassaiset molekyylit kaartuva erisäteisille radoille. Separoidut suihkut ohjataan sitten kohtiomateriaaliin, josta eri isotoopit voidaan irrottaa kemiallisin menetelmin.

Sähkömagneettisen menetelmän tärkein etu muihin menetelmiin nähden on se, että lähes *täydellinen* erotus on mahdollista saada aikaan yhden erotusvaiheen aikana. Valitettavasti sähkömagneettinen menetelmä on kuitenkin käytännössä hyvin epätaloudellinen, jonka takia sitä ei juurikaan ole käytetty toisen maailmansodan jälkeen.

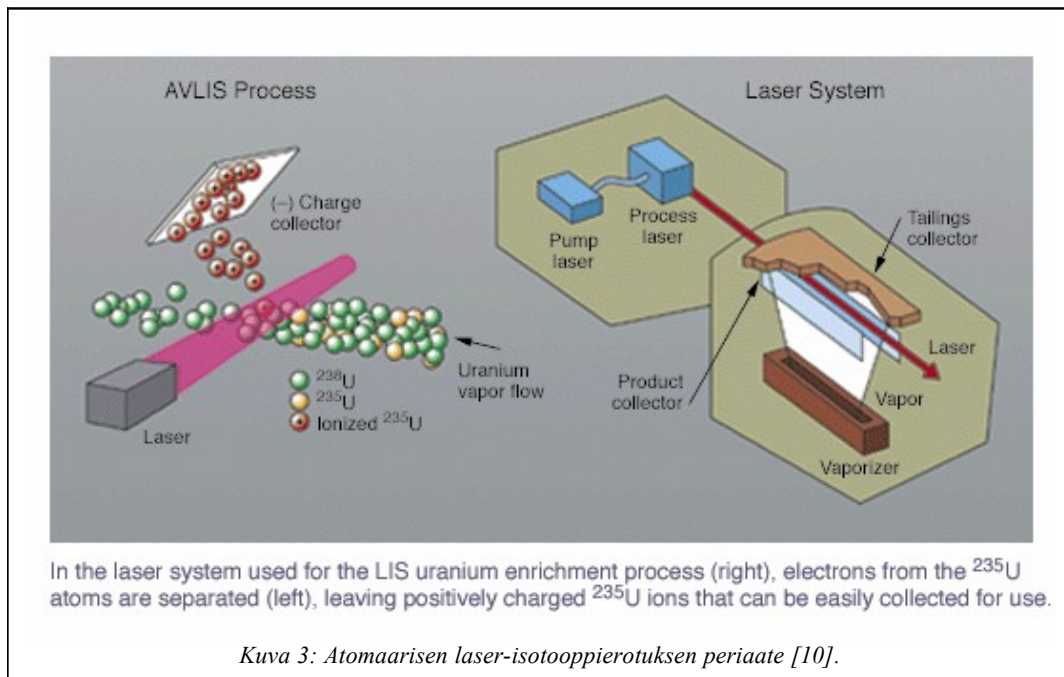
## 2.5 Aerodynaamiset prosessit

Aerodynaamiset prosessit perustuvat samaan ideaan kuin sentrifugimenetelmän: kaasun virratessa suurella nopeudella kaarevaa rataa pitkin, pyrkivät raskaammat molekyylit keskittymään ulkokaarteeseen puolelle kevyempien molekyylin jäädessä sisäkaarteeseen.

Aerodynaamisia prosesseja on kokeilty käytännössä ainakin Brasiliassa (saksalainen Becker Jet Nozzle) ja Etelä-Afrikassa (Helikon Vortex Tube). Kummatkin prototyypit todettiin kuitenkin epätaloudellisiksi.

## 2.6 Laser-menetelmä

Laser-isotooppierotus (LIS, *Laser isotope separation*) perustuu atomien tai molekyylin ionisoimiseen sähkömagneettisella säteilyllä resonanssiabsorptioiden kautta. Yksittäisten atomien tapauksessa menetelmästä käytetään nimitystä *atomihöyry-laser-isotooppierotus* (AVLIS, *atomic vapor laser isotope separation*), ja  $^{235}\text{UF}_6$ -molekyylin tapauksessa *molekyylilaser-isotooppierotus* (MLIS, *molecular laser isotope separation*).



Jokaisella atomilla on tietty määrä diskreettejä viritystiloja, joita jokaista vastaa tietty energia. Atomit absorboivat tehokkaasti sähkömagneettista säteilyä näiden viritystilojen energioita vastaavilla *resonanssiabsorptiotaajuuksilla*. Koska eri viritystilojen energiat ovat riippuvaisia atomin massasta, on isotooppien  $^{235}\text{U}$  ja  $^{238}\text{U}$  resonanssiabsorptiotaajuudet toisistaan poikkeavat, joten säteilyttämällä kaasumaista uraania tarkkaan jotain  $^{235}\text{U}$ :n viritystila vastaan säädetyllä laser-säteellä, on uraanikaasusta mahdollista eksitoida selektiivisesti vain  $^{235}\text{U}$ -isotoopit niin että  $^{238}\text{U}$ -isotoopit jäävät perustilaansa. Altistamalla kaasu vielä muutamalle korkeampia energiatilejoja vastaavalle laser-säteelle, saadaan  $^{235}\text{U}$ -atomit ionisoitua niin, että  $^{238}\text{U}$ -atomit pysyvät neutraaleina. Tämän jälkeen fysiiliset ionit voidaan erottaa kaasusta yksinkertaisesti sähkökentän avulla.

Vastaava prosessi voidaan suorittaa myös uraaniheksafluoridikaasulle, sillä aivan kuten atomeillakin, myös molekyyileillä on diskreetti joukko rotaatio- ja vibraatioviritystiloja, jotka ovat riippuvia molekyylin massasta.

Laser-isotooppierotus on arvioitu olevan noin 10-kertaa kaasudiffuusiomenetelmää tehokkaampi, mutta se on toistaiseksi vielä kehitysvaiheessa. Laser-isotooppierotusta on tutkittu ainakin Yhdysvalloissa ja Australiassa, tosin Yhdysvalloissa käynnissä ollut tutkimusprojekti keskeytettiin vuonna 1999.. Laser-isotooppierotusta tutkittiin Ranskassa CEA:lla vuosina 1983 – 2003 (ranskankielinen termi SILVA, *la séparation isotopique par laser sur la vapeur atomique*), mutta se päätettiin lopettaa toteutuksen hankaluuden ja taloudellisen epävarmuuden vuoksi.

## 2.7 Kemialliset menetelmät

Vaikka saman alkuaineen isotoopit ovatkin kemiallisesti lähes identtisiä, käyttäytyvät molekyylit joissa tietystä alkuaineesta on kahta eri isotooppia tietyissä tilanteissa hieman eri tavoin: etenkin reaktionopeudet voivat vaihdella hieman saman alkuaineen eri isotooppien välillä. Eri reaktionopeuksiin pohjautuva menetelmä, nk. *kemiallinen vaihto* (engl. *chemical exchange*) on osoitettu toimivaksi (sitä käytetään esimerkiksi deuteriumin erottamiseksi vedestä s.o. raskaan veden valmistuksessa), mutta tällä hetkellä ei ole suunnitelmia tämän menetelmän käyttöönotosta.

## 2.8 Plasmamenetelmät

Plasmamenetelmä perustuu  $^{235}\text{U}$ :n ja  $^{238}\text{U}$ :n toisistaan poikkeaviin ionisyklotronitaajuuksiin, joiden avulla  $^{235}\text{U}$ -atomit voidaan erottaa plasmavirtauksesta käyttäen jommankumman isotoopin syklotronitaajuudella värähtelevää sähkökenttää. Tähän mennessä plasma-menetelmää on tutkittu vain Yhdysvalloissa ja Ranskassa 1970- ja 1980-luvuilla, mutta kumpikin maa on lopettanut tutkimusohjelmansa menetelmän epätaloudellisuuden vuoksi.

Taulukko 1: Eri väkevöintimenetelmien vertailu [7].

Prosessi	Erotustekijä (P/T)	Energian kulutus [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

### 3 VÄKEVÖINTI TÄNÄÄN JA TULEVAISUUDESSA

#### 3.1 Käytössä oleva väkevöintilaitokset

Nykyään suuren mittaluokan väkevöintilaitoksia on kaupallisessa käytössä Ranskassa, Saksassa, Hollannissa, Iso-Britanniassa, Yhdysvalloissa sekä Venäjällä. Lisäksi pienempiä laitoksia on muunmuassa Japanissa ja Kiinassa.

Edellisessä kappaleessa esitellyistä menetelmistä on käytössä vain kaksi: kaasudiffuusiomenetelmä sekä sentrifugimenetelmä, joista jälkimmäinen – kuten edellä todettu – on yleisempi suhteellisesti suuren tehokkuutensa takia. Tällä hetkellä maailman tuotantokapasiteetista n. 40 % muodostuu kaasudiffuusiolaitoksista, mutta nykyään käytössä olevat laitokset lähenevät käyttöikänsä loppua, ja ne korvataan hyvin todennäköisesti tehokkaammilla sentrifugilaitoksilla.

Väkevöintilaitosten kapasiteetti mitataan yleisesti erotustyön avulla. Taulukossa 1 on esitetty tuotantokapasiteetti vuosina 2002 ja 2006, sekä arvio vuoden 2015 tuotantokapasiteetista.

Taulukko 2: Maailman uraanin väkevöintikapasiteetti (1000 SWU/a) [3].

	2006	2015
Ranska (AREVA)	10800	11000+
Saksa, Hollanti ja Iso-Britannia (Urenco)	9000	11000+
Japani (JNFL)	1050	1500
USA (USEC)	11300	3500+
USA (Urenco & Areva)	0	4000+
Venäjä (Tenex)	25000	33000+
Kiina (CNNC)	1000	1000+
Muut	300	300
Yhteensä	48450	61800+
Tarve	48428	57000 – 63000

#### 3.2 Rakenteilla ja suunnitteilla olevat laitokset

Yhdysvaltoihin, New Mexicoon, on rakenteilla sentrifugilaitos, *National Enrichment Facility* (NEF), jonka on määrä saavuttaa täysi tuotantokapasiteettinsa, 3 miljoonaa SWU/a, vuoteen 2013 mennessä, mikä vastaa noin neljäsosaa yhdysvaltojen väkevöintitarpeesta. Tyypiltään NEF on sentrifugilaitos, jonka omistaa Urenco Group [4].

Lisäksi USEC (U.S Enrichment Company) on rakentamassa Yhdysvaltoihin, Ohioon, sentrifugilaitosta, *American Centrifuge Plant* (ACP), jonka on kaavailtu tuottavan 3,8 miljoonaa SWU/a vuoteen 2017 mennessä.

Ranskaan on rakenteilla sentrifugilaitos *Georges Besse II*, jonka määrä aloittaa kaupallinen käyttö vuonna 2009. Laitoksen täysi kapasiteetti 7,5 miljoonaa SWU/a, on tarkoitus saavuttaa vuoteen 2018 mennessä. Areva on lisäksi suunnitellut rakentavansa vastaavan, tosin puolta pienemmän laitoksen Yhdysvaltoihin. Tämän laitoksen on alustavasti suunniteltu valmistuvan vuonna 2013.

### 3.3 Kansainväliset laitokset

Kansainvälinen atomienergiajärjestön IAEA, on ehdottanut kansainvälisten väkevöintilaitosten ja ydinpolttoainepankin perustamista ydinpolttoaineen saatavuuden varmistamiseksi, ja ydinaseiden leviämisen riskin pienentämiseksi [8].

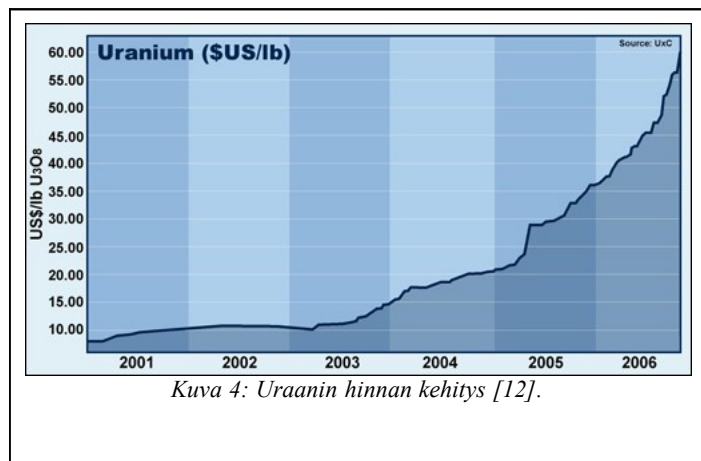
Ensimmäiseksi kansainväliseksi laitokseksi on tulossa Siperiassa sijaitseva Angarsk IUEC, jonka perustamisesta sopivat Venäjä ja Kazakstan huhtikuussa 2007 [9]. Myöhemmin hankkeeseen on liittymässä muitakin Itä-Euroopan maita: ainakin Armenia ja Ukraina ovat ilmoittaneet mielenkiintonsa liittyä sopimukseen. Samalla laitoksen tuotantokapasiteettia on tarkoitus nostaa huomattavasti.

Myös CEA on ehdottanut Ranskassa rakenteilla olevaa Georges Besse II -laitosta avattavaksi kansainväliseen käyttöön, ja ehdotus Etelä-Afrikkaan avattavasta kansainvälisestä laitoksesta näyttää todennäköiseltä [3].

### 3.4 Tulevaisuuden väkevöintimenetelmät

Käytössä olevat uraaninväkevöintimenetelmät ovat käytännössä olleet hyvin pitkälti kehittymättömässä tilassa useiden vuosikymmenten ajan, lukuunottamatta pieniä menetelmiin tehtyjä tehokkutta parantavia optimointeja.

Pääsyyllinen kehityksen hitaaseen vauhtiin lienee uraanin hinta, joka pysytteli hyvin matalana aina vuoteen 2001 saakka pääosin aiemman ylituotannon, sekä ydinaseriisunnan seuraksena vapautuneiden korkeastirikastetun uraanin ja plutoniumin vapauduttua markkinoille.



Kuva 4: Uraanin hinnan kehitys [12].

Uraanin hinnan noustessa, ja toisaalta köydytettyjen uraanivarastojen kertyessä väkevöintilaitoksille, on todennäköistä että ennemmin tai myöhemmin jokin edistynyt väkevöintimenetelmä – todennäköisimmin atomaarinen laser-isotooppi-erotus – otetaan käyttöön, sillä tällöin köydytetystä uraanista voitaisiin saada taloudellisesti polttoainemateriaalia, ja köydytetyn uraanin varastot pienenisivät hieman jatkuvan kasvamisen sijaan.

## 4 YHTEENVETO JA POHDINNAT

Mahdollisista uraaninväkevöintimenetelmistä on nykyään käytössä laajassa mittakaavassa vain kaksi: kaasudiffuusiomenetelmä sekä sentrifugimenetelmä, joista edellinen on

poistumassa käytöstä lähitulevaisuudessa. Muista tutkituista väkevöintimenetelmistä vain laser-isotooppiseparaatio näyttää potentiaaliselta ehdokkaalta tulevaisuuden väkevöintimenetelmäksi, kaikkien muiden menetelmien osoittauduttua epätaloudellisiksi nykyisin käytössä olevaan tekniikkaan verrattuna.

Väkevöintimenetelmissä tapahtunut suhteellisen pieni kehitys lienee suurelta osin seurausta väkevöidyn uraanin hinnasta, joka vuoteen 2001 asti pysytteli pitkän aikaa hyvin tasaisissa lukemissa, johtuen etenkin tätä edeltäneenä aikana tapahtuneesta ylituotannosta, ja ydinaseriisunnan seurauksena vapautuneista korkeastiväkevöidystä uraanista ja plutoniumista. Nykyään uraanin hinta on kuitenkin nousussa, mikä saattaa kiihdyttää laser-menetelmän kehitystä kaupalliseen käyttöön. Lisäpainetta jatkokehitykselle luovat tähän päivään asti kertyneet köyhdytetyn uraanin varastot, joiden säilöminen on hyvin ongelmallista.

## 5 KIRJALLISUUSVIITTEET

[1]	U.S. Department of Energy: The Manhattan Project – An Interactive History <a href="http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/index.htm">http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/index.htm</a> (Haettu 29.11.2007)
[2]	J. Lamarsh ja A. Baratta: Introduction to Nuclear Engineering, 3 <sup>rd</sup> edition, Prentice-Hall, 2001
[3]	Australian Uranium Association: Nuclear Issues Briefing Paper 33: Uranium Enrichment, Lokakuu 2007 <a href="http://www.uic.com.au/nip33.htm">http://www.uic.com.au/nip33.htm</a> (Haettu 29.11.2007)
[4]	The National Enrichment Facility <a href="http://www.nefnm.com/">http://www.nefnm.com/</a> (Haettu 8.12.2007)
[5]	World Information Service on Energy – Uranium Project <a href="http://www.wise-uranium.org/">http://www.wise-uranium.org/</a> (Haettu 8.12.2007)
[6]	USEC's American Centrifuge <a href="http://www.usec.com/v2001_02/Content/AboutUSEC/AmericanCentrifugeBrochure.pdf">http://www.usec.com/v2001_02/Content/AboutUSEC/AmericanCentrifugeBrochure.pdf</a> (Haettu 13.12.2007)
[7]	Nuclear enrichment centre <a href="http://www.nti.org/db/archives/nuc/eos/tyson.htm">http://www.nti.org/db/archives/nuc/eos/tyson.htm</a> (Haettu 9.12.2007)
[8]	IAEA:n lehdistötiedote: IAEA Seeks Guarantees of Nuclear Fuel <a href="http://www.iaea.org/NewsCenter/PressReleases/2006/prn200615.html">http://www.iaea.org/NewsCenter/PressReleases/2006/prn200615.html</a> (Haettu 9.12.2007)
[9]	World Nuclear News: International enrichment centre agreement signed <a href="http://www.world-nuclear-news.org/explorationNuclearFuel/100507International_enrichment_centre_agreement_signed.shtml">http://www.world-nuclear-news.org/explorationNuclearFuel/100507International_enrichment_centre_agreement_signed.shtml</a> (Haettu 9.12.2007)
[10]	Lawrence Livermore National Laboratory: Laser Isotope Separation <a href="https://www.llnl.gov/str/Hargrove.html">https://www.llnl.gov/str/Hargrove.html</a> (Haettu 9.12.2007)
[11]	Wikimedia Commons: Zippe-type Gas Centrifuge <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Zippe-type_gas_centrifuge.svg">http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Zippe-type_gas_centrifuge.svg</a> (Haettu 10.12.2007)
[12]	Ur Energy Inc: Uranium News <a href="http://www.ur-energy.com/news/uranium_news.htm">www.ur-energy.com/news/uranium_news.htm</a> (Haettu 10.12.2007)