

Uraanin väkevöinti

Ydin- ja energiatekniikan seminaari 12.12.2007

Joona Kurki

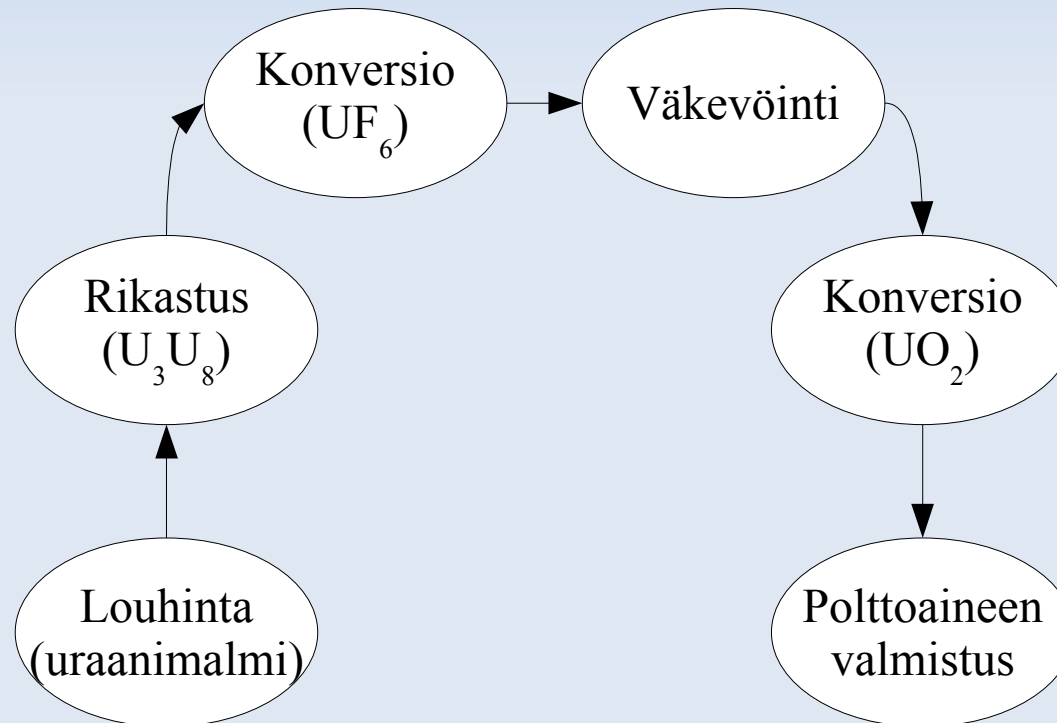
1. Uraani polttoaineena
2. Väkevöinnin perusteet
3. Väkevöintitekniikoita
4. Väkevöinti tänään ja tulevaisuudessa
5. Yhteenveto

1. Uraani polttoaineena

- Maailmassa n. 440 ydinreaktoria, joista valtaosa uraanikäyttöisiä kevytvesireaktoreja
- Luonnonuraanista 0,71 % fissiiliä ^{235}U :a. Kevytvesireaktorit vaativat kuitenkin suhteen olevan n. 2 – 4 %
- Vaikka uusia polttoaine- ja polttoainekierto vaihtoehtoja suunnitellaan, on uraanidioksidilla keskeinen rooli vielä useamman vuosikymmenen ajan

1. Uraani polttoaineena

Uraanin matka polttoaineeseen:



2. Väkevöinnin perusteet

- Väkevöinnin ongelma: eri isotoopit kemiallisesti *lähes* identtisiä
- Isotooppiseparaation on perustuttava fysikaalisiin ominaisuuksiin
- Perinteiset menetelmät: ^{235}U :n ja ^{238}U :n välinen massaero
- Laser-isotooppierotus: toisistaan poikkeavat resonanssiabsorptiotaajuudet

2. Väkevöinnin perusteet

- Väkevöintiin kuluva energiaa mitataan *erotustyöyksiköissä* SWU (separative work unit) [kg]
- Erotustyön hinnaksi saadaan *arvofunktion* $V(x)$ avulla (M massa, x konsentraatio, $P, T, F = \text{product, tails, feed}$):

$$W = M_P V(x_P) + M_T V(x_T) + M_F V(x_F)$$
$$V(x) = (1 - 2x) \ln\left(\frac{1 - x}{x}\right)$$

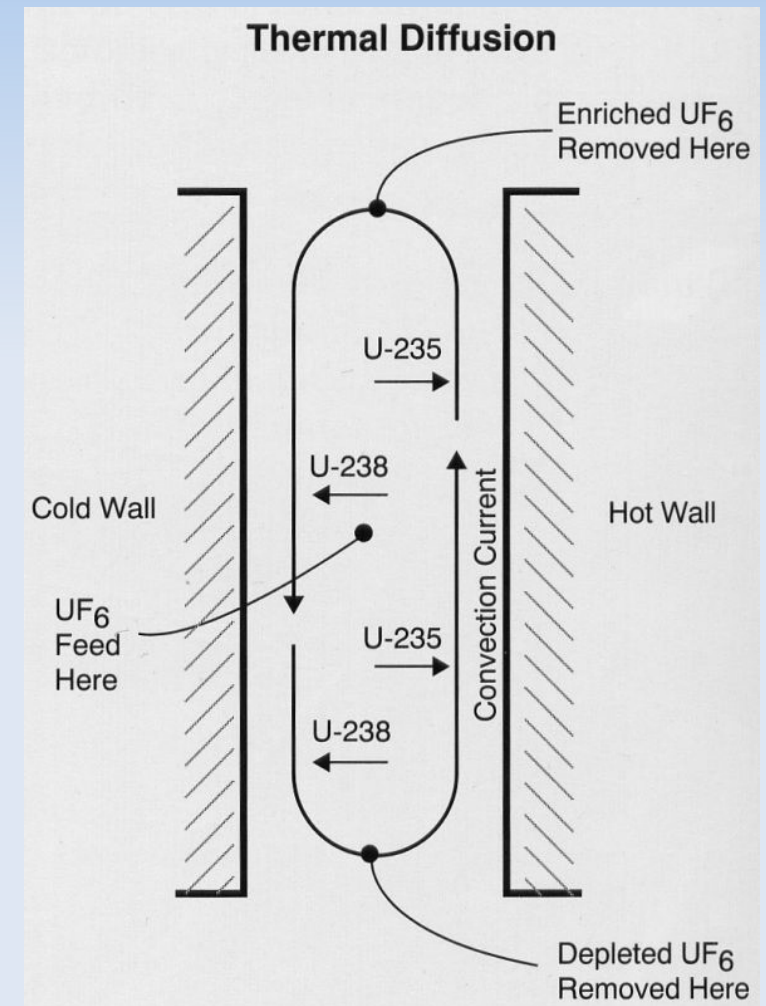
- Esim. $F = 10$ kg, $x_F = 0,711$ %, $P = 1$ kg, $x_P = 4,5$ % ja $T = 9$ kg, $x_T = 0,3$ % $\rightarrow W = 6,1$ SWU

3. Väkevöintitekniikoita

- Lämpödiffuusiomenetelmä
- Kaasudiffuusiomenetelmä
- Sentrifugimenetelmä
- Aerodynaamiset menetelmät
- Sähkömagneettinen menetelmä
- Laser-menetelmä
- Plasmamenetelmä
- Kemialliset menetelmät

3. Väkevöintitekniikoita

- **Lämpödiffuusiassa** lämpötilagradientti aikaansaa lievän erotuksen kaasumaiselle uraanille
- **Kaasudiffuusiassa** kevyemmät molekyylit diffundoituvat huokoisen seinämän läpi raskaita molekyylejä helpommin
- Huono tehokkuus, tarvitaan > 1000 peräkkäistä vaihetta (suuri laitos, ja suuri energiankulutus)



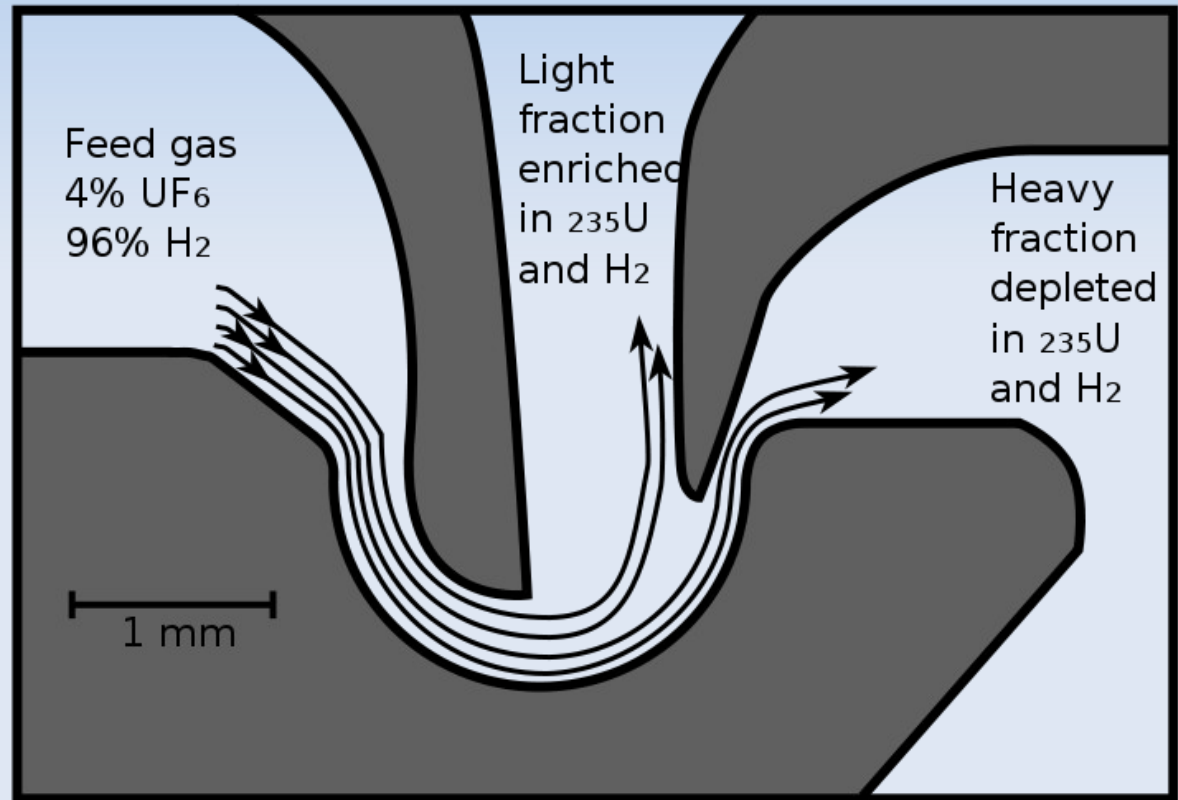
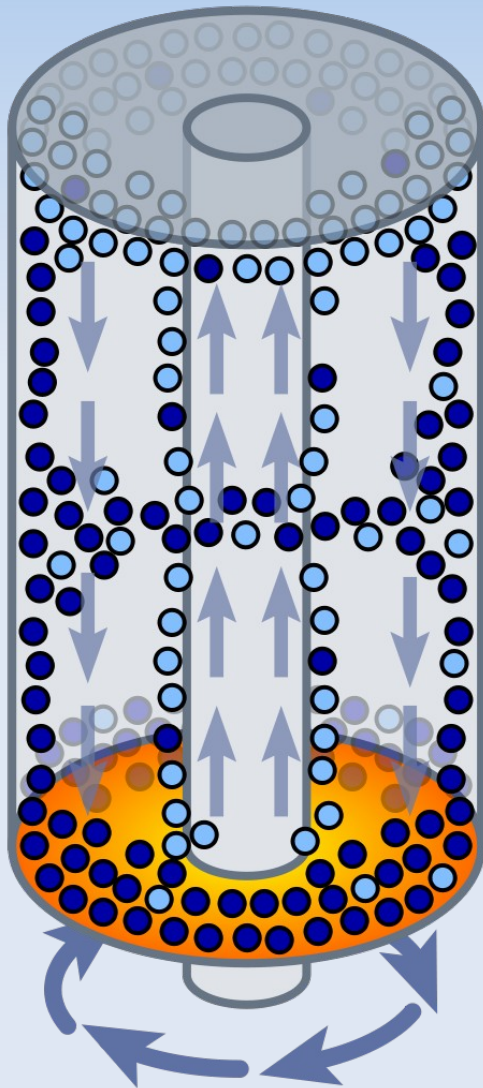
3. Väkevöintitekniikoita

- **Sentrifugimenetelmä:** suurella nopeudella pyörivään sentrifugiin johdetaan uraaniheksafluoridikaasua
- Raskaammat molekyylit kertyvät sentrifugin ulkoreunalle, jolloin keskiosaan jäävä kaasu väkevöityy
- Sentrifugin erotuskyky huomattavasti kaasudiffuusiota suurempi. Peräkkäisiä vaiheita tarvitaan tyypillisesti 10 – 20

3. Väkevöintitekniikoita

- **Aerodynaamiset menetelmät:** sama idea kuin sentrifugimenetelmässä: suurella nopeudella kaarevaa rataa virtaavassa kaasussa raskaammat molekyylit painuvat ”ulkokaarteeseen”
- *Becker jet nozzle* (Brasilia), *Helikon vortex tube* (Etelä-Afrikka)
- Epätaloudellisia, kumpikin suljettu

3. Väkevöintitekniikoita



3. Väkevöintitekniikoita

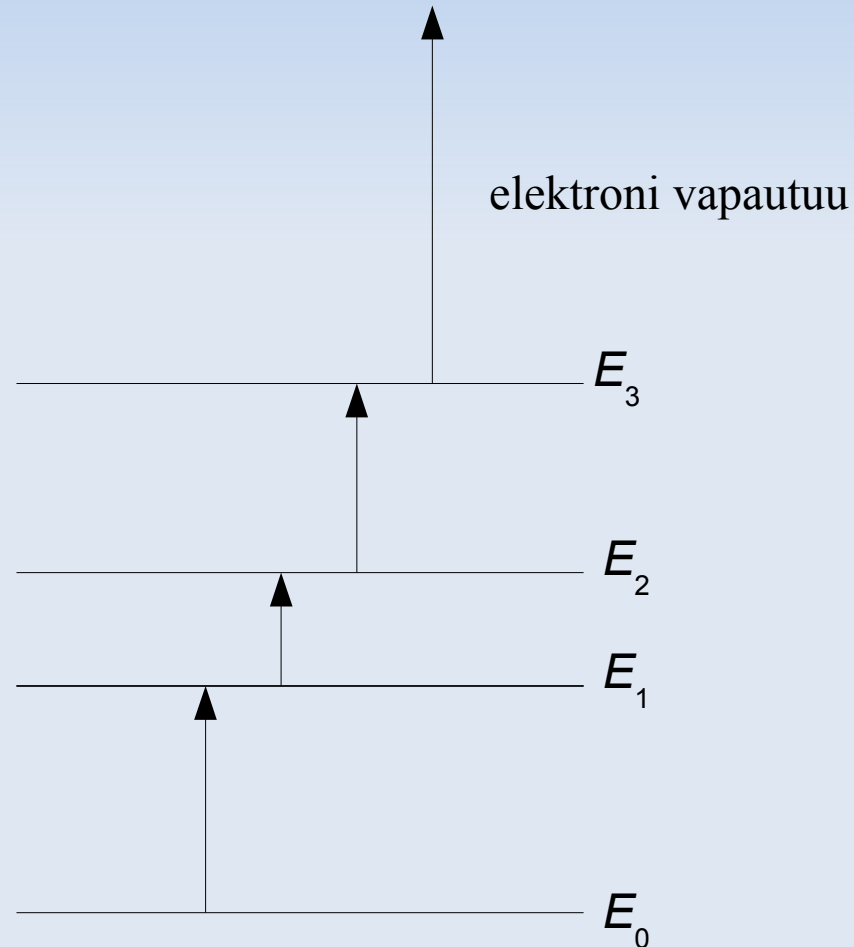
- Sähkömagneettinen menetelmä (EMIS, *electromagnetic isotope separation*):
massaspektrometrin sovellus
isotooppierotukseen
- Ionisoitu hiukkassuihku ohjataan
magneettikenttään, jolloin eri massaiset
molekyylit kulkevat eri säteisillä radoilla
- Teoriassa *täydellinen* erotus yhdessä
vaiheessa → mahdollisuus ydinasemateriaalin
valmistukseen (vrt. *Calutron*)
- Taloudellisesti kannattamaton

3. Väkevöintitekniikoita

- **Laser-isotooppiseparaatio** (LIS, AVLIS, MLIS)
- ^{235}U :llä ja ^{238}U :lla eri resonanssi-absorptiotaajuudet
- ^{235}U -isotoopit (tai vastaavat molekyylit) ionisoidaan selektiivisesti voimakkailla laser-säteillä, ^{238}U :n jäädessä neutraaleiksi
- Ionisoidut ^{235}U -atomit (tai molekyylit) voidaan erottaa sähkökentällä
- Potentiaalisesti sentrifugimenetelmää parempi

3. Väkevöintitekniikoita

AVLIS:in toimintaperiaate



3. Väkevöintitekniikoita

- **Plasma-menetelmä:** eri isotooppien toisistaan poikkeavat ionisyklotronitaajuudet
- **Kemiallinen vaihto:** eri isotooppien toisistaan poikkeavat reaktioajat
- Käytännössä osoitettu toimiviksi, mutta tutkimukset lopetettu taloudellisesti kannattamattomina

3. Väkevöintitekniikoita

Prosessi	Erotustekijä (P/T)	Energian kulutus [kWh/SWU]
<i>Kaasudiffuusio</i>	1,004	2500
<i>Sentrifugi</i>	1,012 – 1,015	50
<i>Becker</i>	1,015	3600
<i>Helikon</i>	1,03	3000 – 4000
<i>Sähkömagneettinen</i>	1,15 – 1,20	3000 – 4000
<i>AVLIS</i>	1,05 – 1,15	40
<i>MLIS</i>	1,05 – 1,15	30
<i>Plasma</i>	1,035 – 1,1	200 – 600
<i>Kemiallinen</i>	1,001 – 1,002	150 – 375

P/T = Product / Tails

4. Väkevöinti tänään ja huomenna

- Nykyään laajassa kaupallisessa käytössä vain kaasudiffuusiomenetelmä sekä sentrifugimenetelmä
- Kaasudiffuusiolaitokset (Ranskassa ja USA:ssa) lähestyvät käyttöikänsä loppua, ne korvataan sentrifugilaitoksilla
- Uusista menetelmistä tutkitaan lähinnä Laser-menetelmää, mutta sen taloudellisuus ei ole vielä aivan selvillä

4. Väkevöinti tänään ja huomenna

Maailman väkevöintikapasiteetti [tuhatta SWU:ta / vuosi]

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

4. Väkevöinti tänään ja huomenna

Rakenteilla olevia laitoksia

- Urenco: *National Enrichment Facility*, New Mexicy. 3 000 000 SWU/a vuoteen 2013 mennessä
- USEC: *American Centrifuge Facility*, Ohio. 3 800 000 SWU/a vuoteen 2017 mennessä
- Areva: *Georges Besse II*, Ranska. 7 500 000 SWU/a vuoteen 2019 mennessä (käynnistyy 2009)
- Areva: laitos yhdysvaltoihin, käynnistys 2013? Kapasiteetti n. $\frac{1}{2}$ Georges Besse II:sta.

4. Väkevöinti tänään ja huomenna

- IAEA:n ehdotuksen mukaisesti ollaan perustamassa kansainvälisiä väkevöintilaitoksia. Myöhemmin tavoitteena myös nk. *ydinpolttoainepankki*
- Ensimmäisestä laitoksesta sopimus Venäjän ja Kazakstanin välillä
- CEA ehdottanut *Georges Besse II*:n avaamista kansainväliseen käyttöön

5. Yhteenveto

- Tutkituista menetelmistä käytössä vain kaksi: kaasudiffuusio sekä sentrifugimenetelmä
- Uusien menetelmien tutkimus pysynyt paikallaan johtuen pääosin uraanin matalasta hinnasta
- Hinnan nousu ja köyhdytetyn uraanin varantojen kerääntyessä tutkimuksen jatkamisesta tulee jälleen taloudellista
- Uusista menetelmistä *AVLIS* kehitettänee ensimmäiseksi kaupalliseen käyttöön