



Uraanirikastetta tynnyrissä © IAEA

# Perustietoa uraanista

Esa Pohjolainen  
Geologian tutkimuskeskus

# Uraanin alkuperä

- Alkuaineita on syntynyt kolmella eri tavalla:
  1. **Alkuräjähdyksen nukleosynteesi:** alkuräjähdyksessä 13,7 miljardia vuotta sitten syntyi vetyä (H) ja heliumia (He), joiden osuus maailmankaikkeuden alkuaineista on edelleen noin 99 %
  2. **Tähtien nukleosynteesi:** heliumia raskaammat alkuaineet rautaan (Fe) saakka ovat syntyneet tähtien fuusioreaktioissa
  3. **Neutronisieppaus:** kaikki rautaa raskaammat alkuaineet (mm. uraani) ovat syntyneet tähtien supernovaräjähdyksissä ja neutronitähtien törmäyksissä



# Uraani maapallolla

- Uraani on raskain luonnossa esiintyvä alkuaine, jonka kaikki isotoopit ovat radioaktiivisia
- Uraania oli mukana pieninä pitoisuuksina kaasus- ja pölypilvessä, josta aurinko ja maapallo muodostuivat 4,6 miljardia vuotta sitten
- Uraanin määrä maapallolla on aikojen saatossa vähentynyt merkittävästi, koska se hajoaa radioaktiivisesti muiksi alkuaineiksi
  - Maan syntyessä 4,6 miljardia vuotta sitten isotoopin  $^{238}\text{U}$  (puoliintumisaika 4,5 miljardia vuotta) määrä oli kaksinkertainen nykytasoon verrattuna
  - Aikojen kuluessa isotoopin  $^{235}\text{U}$  määrä on vähentynyt paljon nopeammin kuin  $^{238}\text{U}$ :n, koska  $^{235}\text{U}$ :n puoliintumisaika on lyhyempi (0,7 miljardia vuotta)
- Uraanin, toriumin ja kaliumin radioaktiivisen hajoamisen tuottama lämpöenergia on maapallon sisäisen lämpöenergian tärkein lähde
  - Lämmön siirtyminen kohti pintaa
    - geologisten prosessien ja laattatektoniikan moottori



# Uraani maankuoressa

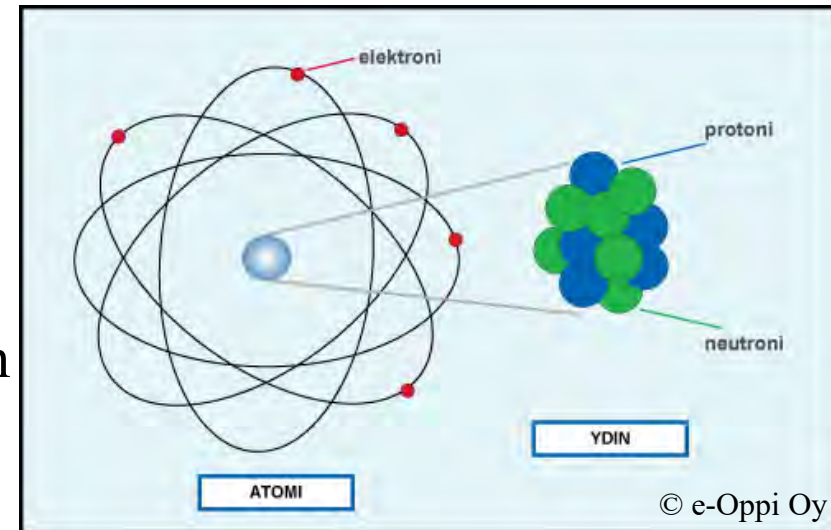
- Uraani on geokemiallisten ominaisuuksiensa (mm. suuri varaus) vuoksi ns. sopeutumaton alkuaine eli kivien osittain sulaessa se rikastuu voimakkaasti muodostuvaan sulaan
- Maan vaipan yläosa ja kuori ovat aikojen saatossa toistuvasti osittain sulaneet ja tuottaneet mantereista kuorta → uraani erottunut tehokkaasti ja rikastunut mantereiseen yläkuoreen
- Mantereinen kuori sisältää nykyään arviolta puolet maapallon kaikesta uraanista
- Uraanin keskimääräinen pitoisuus mantereisessä kuoressa on 1,4 ppm (0,00014 %) ja mantereisessä yläkuoressa 2,8 ppm (0,00028 %)
- Uraniniitti ( $\text{UO}_2$ ) on yleisin uraanimineraali
- Uraani esiintyy lisäksi pieninä pitoisuuksina mm. monatsiitissa,  $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$  ja zirkonissa,  $\text{ZrSiO}_4$

# Uraani Suomen kallioperässä

- Kallioperän uraanipitoisuus vaihtelee huomattavasti
- Suomen kallioperän U-pitoisuus (2 ppm) vastaa maapallon mantereisen yläkuoren keskimääräistä U-pitoisuutta (2,8 ppm)
  - Suomessa on kuitenkin kivilajeja (mm. graniitti), jotka sisältävät keskimääräistä enemmän uraania
- Suomen kallioperä on monivaiheisten geologisten prosessien lopputulos ja muokkautunut useassa eri vaiheessa, joten uraani on paikoitellen rikastunut useassa vaiheessa → lopputuloksena paikoin uraania enemmän sisältäviä kivilajeja ja alueita
- Uraanin korkea pitoisuus on alueellinen ja paikallinen piirre
  - Kallioperän uraanipitoisuuden vaihtelu korreloi kivilajivaihtelun kanssa
  - Kallioperän U-pitoisuus heijastuu myös päällä olevaan maaperään ja alueen pohjaveteen
  - U-pitoisuus korkein Etelä-Suomen graniittialueella (keskimäärin 3 ppm) ja Ahvenanmaan rapakivigraniittialueella (5 ppm)

# Radioaktiivinen hajoaminen

- Alkuaineiden atomien ytimet ovat stabiileja tai epästabiileja
- Radioaktiivinen hajoaminen tarkoittaa epästabiilin ytimen hajoamista toiseksi ytimeksi
- Epästabiilissa ytimessä on liikaa massaa (energiaa) tai epätasapainoinen protoni-neutronisuhde
- Epästabiili ydin pyrkii siirtymään stabiiliin tilaan mm. siten, että ytimestä irtoaa jokin hiukkanen. Näin käyttäytyvää ydintä kutsutaan radioaktiiviseksi ja prosessia radioaktiiviseksi hajoamiseksi.
- Prosessin kautta epästabiili ydin muuttuu stabiiliksi ytimeksi joko suoraan tai useita pysymättömiä ytimiä sisältävän hajoamissarjan kautta



Atomiydin koostuu protoneista ja neutroneista.

# Radioaktiivinen hajoaminen ja radionuklidit

- Luonnossa esiintyvistä 345 nuklidista 275 on stabiileja ja 70 radioaktiivisia (radionuklideja)
  - Nuklidi on atomin ydin, jolla on tietty määrä protoneja ja neutroneja
- Kaikki vismuttia (Bi) raskaammat alkuaineet ovat radioaktiivisia
- Luonnon radionuklideista 45 eli yli puolet kuuluu uraanin ( $^{238}\text{U}$  ja  $^{235}\text{U}$ ) ja toriumin ( $^{232}\text{Th}$ ) hajoamissarjoihin
- Kantanuklidi hajoaa tytärnuklidiksi tietyllä tilastollisella vakioosuudella aikayksikköä kohti (puoliintumisaika)
- Mitä lyhyempi on radionuklidin puoliintumisaika, sitä enemmän hajoamisia on aikayksikköä kohti
- Aktiivisuuden yksikkö on Becquerel (Bq)
  - 1 Bq = yksi hajoaminen sekunnissa

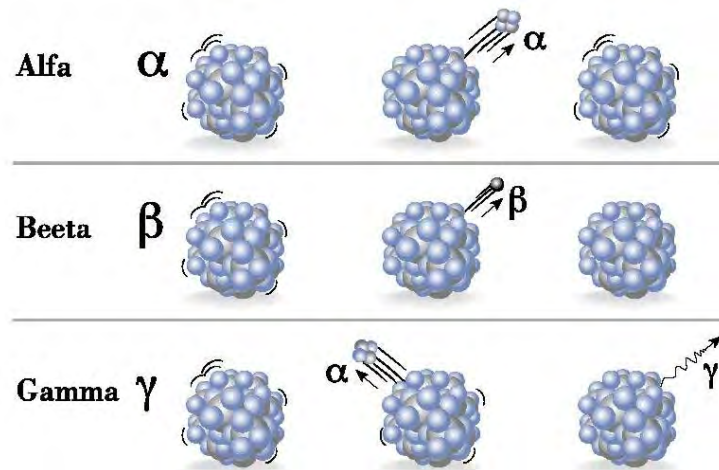
# Radioaktiivisen hajoamisen mekanismit

- Perusmekanismit ovat:
  1. Alfahajoaminen (ytimestä poistuu alfahiukkanen eli heliumydin,  $^4\text{He}$ )
  2. Betahajoaminen ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$  ja elektronikaappaus)
  3. Fissio (spontaani fissio, eri prosessi kuin ydinreaktoreissa hyödynnettävä indusoitu fissio)
  4. Sisäinen siirtymä (gammasiirtymä ja sisäinen konversio)
- Alfahajoaminen ja fissio johtuvat liian raskaasta atomiytimeistä (pääosin vain raskaiden alkuaineiden hajoamismekanismeja)
- Betahajoaminen johtuu epätasapainoisesta protoni-neutronisuhteesta
- Alfahajoamisen, betahajoamisen ja fission yhteydessä syntyy myös gammasäteilyä (gammasiirtymä)
  - Esim. alfa- ja betahajoamisessa tytärynuklidi ei siirry suoraan energeettiselle perustilalle vaan siirtyminen stabiilimpaan tilaan tapahtuu tytärytimen viritystilojen kautta. Viritystilat purkautuvat vapauttaen gammasäteilyä (gammakvantteja).



# Säteily - radioaktiivisen hajoamisen seurausilmiö

- Radioaktiivisessa hajoamisessa syntyy säteilyä, jonka avulla ydin purkaa massaansa eli energiaansa ( $E=mc^2$ )
- Energia purkautuu kvanttien ja hiukkasten massana sekä niiden liike-energiana
- Hajoamisessa syntyvä säteily koostuu pääosin alfa- ( $\alpha$ ), beta- ( $\beta$ ) ja gammasäteilystä ( $\gamma$ )
- Alfa- ja betasäteily ovat luonteeltaan hiukkassäteilyä, gammasäteily sähkömagneettista säteilyä
- Läheskään kaikki säteily (mm. valo, lämpösäteily, radioaallot) ei ole seurasta radioaktiivisesta hajoamisesta



Kuva: STUK

# Ionisoiva säteily

- Ionisoiva säteily ionisoi väliaineen atomeja
- Alfa-, beta- ja gammasäteily ovat ionisoivaa säteilyä, joka pystyy irrottamaan säteilyn kohteeksi joutuvan aineen atomeista elektroneja tai rikkomaan aineen molekyyliä
- Elävissä soluissa ionisaatio voi vaurioittaa solujen perimäainesta, DNA-molekyyliä. Pahimmassa tapauksessa vauriot johtavat syöpään tai muuhun terveyshaittaan.
  1. Alfasäteily: Voimakkaasti ionisoivaa, mutta heikko läpäisevyys. Alfahiukkanen ei pysty läpäisemään ihmisen ihoa. Alfasäteily voi olla vaarallista, jos alfahiukkasia lähettäviä radionuklideja joutuu elimistöön esimerkiksi hengitysilman mukana.
  2. Betasäteily: Kohtalaisesti ionisoivaa ja kohtalainen läpäisevyys. Betahiukkaset pystyvät tunkeutumaan esimerkiksi ihoon. Betasäteilyä lähettävät radionuklidit ovat vaarallisia iholla tai päästessään elimistöön.
  3. Gammasäteily: Heikosti ionisoivaa, mutta voimakas läpäisevyys. Ulkoiselta gammasäteilyltä on vaikea suojautua, koska se on yleensä hyvin läpätunkevaa.
- Myös neutroni- ja röntgensäteily ovat ionisoivaa säteilyä

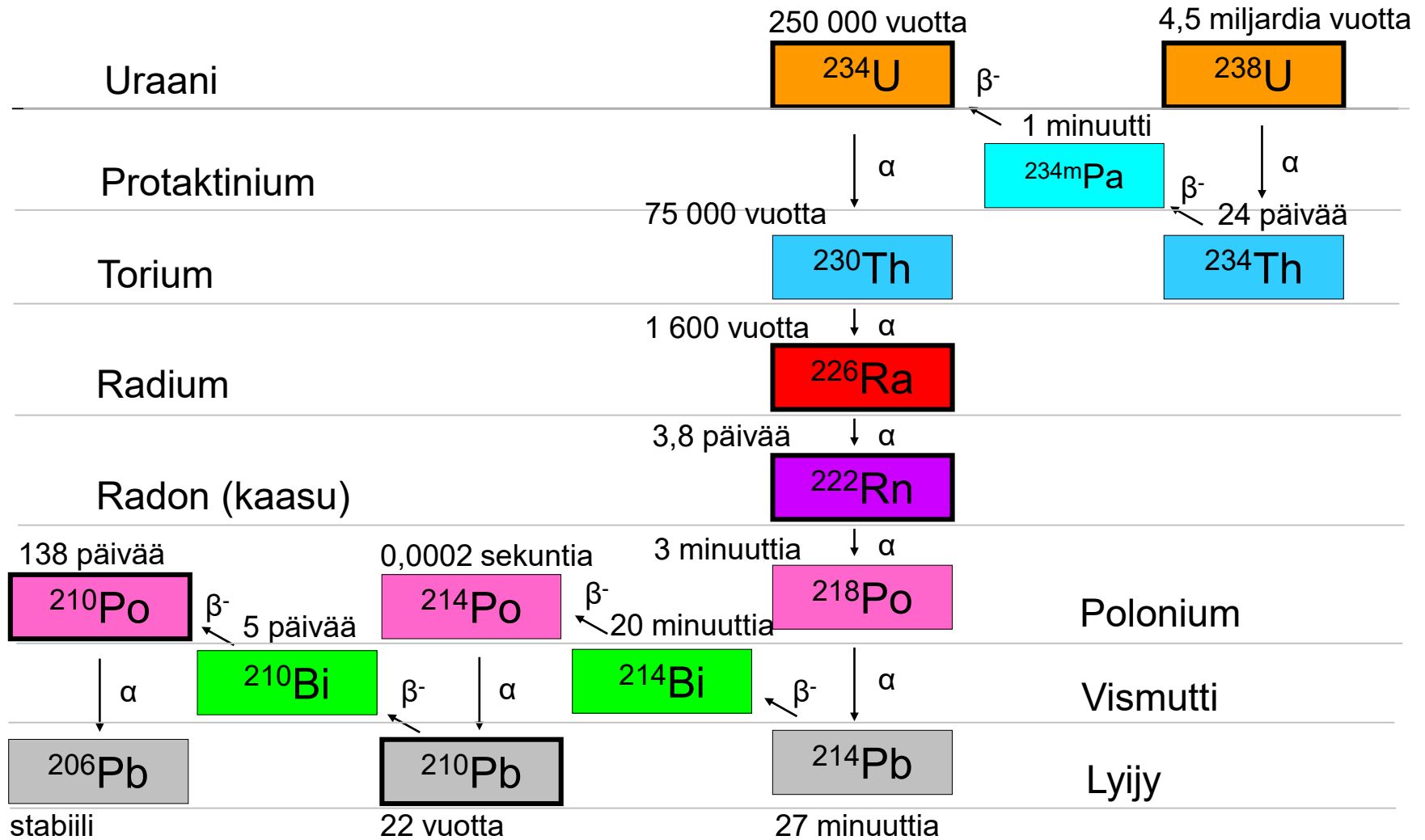
# Ionisoivan säteilyn haitalliset vaikutukset

- Solujen ja kudosten säteilyvauriot saavat alkunsa muutoksista DNA:n rakenteessa
- Solut koostuvat pääosin vedestä, ja ionisoiva hiukkanen osuukin useimmiten vesimolekyylisiin ( $H_2O$ ) ja aiheuttaa sen hajoamisen
  - Säteilyn aiheuttamissa veden hajoamisreaktioissa syntyy hyvin reaktiivisia vapaita radikaaleja, esim. hydroksyyli- ( $OH\cdot$ ) ja vetyatomiradikaaleja ( $H\cdot$ )
  - Vapaat radikaalit voivat katkaista sidoksia molekyyleistä kaapatun niiltä vetyatomeja
  - Vaarallisinta on, jos vapaan radikaalin kohdemolekyylillä on solun perimäainekseen eli DNA
  - Vapaa radikaali voi reagoida DNA-molekyylin kanssa, mikä saattaa johtaa DNA:n rakenneosien muuntumiseen tai DNA-juosteen katkeamiseen
- Ionisoiva hiukkanen voi ionisoida atomeja ja katkaista molekyylien sidoksia, myös hiukkasen tai kvantin osuma solun tumaan voi vaurioittaa DNA:ta
- Vaurio DNA:ssa voi johtaa perimän vaurioitumiseen, solun kuolemaan, muuntumiseen syöpäsolun esiasteeksi, jakaantumiskyvyn menetykseen tai vaurion korjaamiseen
  - Ionisoivan säteilyn aikaansaama DNA-vaurio voi periä jälkeläissoluille vain mutaatioiden muodossa: mikäli vaurio jää korjautumatta, seuraavassa solunjakautumisessa käytetään DNA:n kahdentuessa mallina tätä säteilyn seurauksena syntyneitä virheellisiä DNA:ta, minkä seurauksena kaikissa kyseisen solun jälkeläissoluissa on virhe tässä DNA:n kohdassa

# Uraanin hajoaminen

- Luonnossa esiintyvä uraani koostuu kolmesta isotoopista:
  1.  $^{238}\text{U}$  (99,27 % luonnon uraanista), puoliintumisaika 4,5 miljardia vuotta
  2.  $^{235}\text{U}$  (0,72 %), puoliintumisaika 0,7 miljardia vuotta
  3.  $^{234}\text{U}$  (0,0057 %), puoliintumisaika 250 000 vuotta, kuuluu isotoopin  $^{238}\text{U}$  hajoamissarjaan
- Uraani on epästabiili, koska sillä on liian raskas atomiydin (syntynyt äärimmäisissä, tähtien räjähdys- ja törmäystapahtumien olosuhteissa) → alfahajoamisen kautta pyrkii kohti stabiilimpaa tilaa
- Uraanin radioaktiivinen hajoaminen koostuu kahdesta erillisestä hajoamissarjasta, joiden kantanuclideina ovat  $^{238}\text{U}$  ja  $^{235}\text{U}$
- Uraanin hajoamissarjat koostuvat  $\alpha$ - ja  $\beta$ -hajoamisista
- Uraanin ( $^{238}\text{U}$ ) hajoamissarjassa valtaosa gammasäteilystä syntyy tytärynuklidien  $^{214}\text{Bi}$  (vismutti) ja  $^{214}\text{Pb}$  (lyijy) hajoamisten yhteydessä

# $^{238}\text{U}$ :n hajoamissarja ja nuklidien puoliintumisaajat



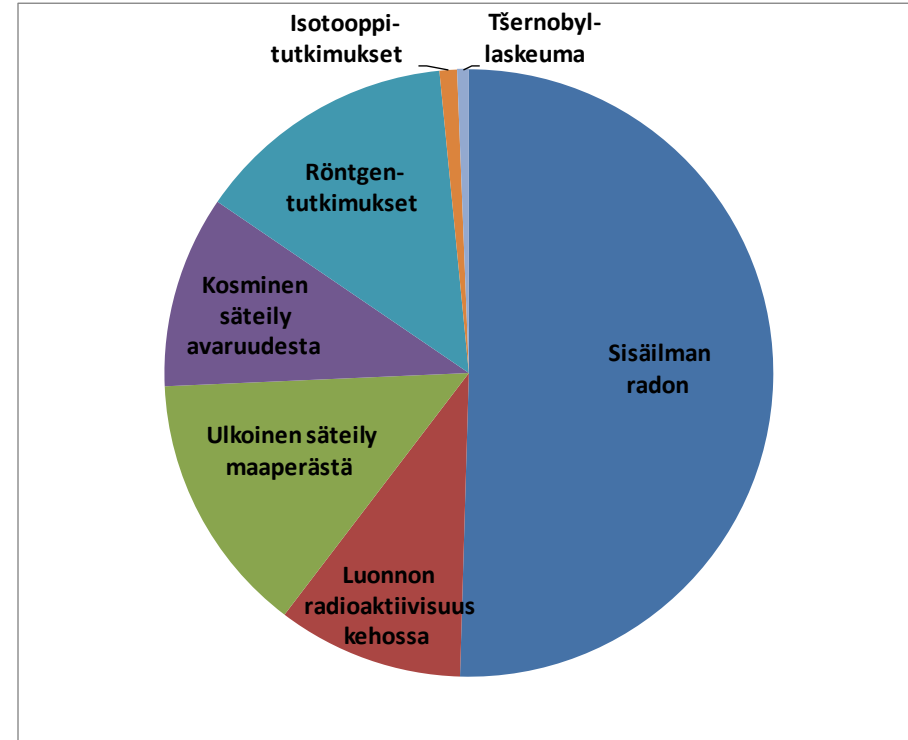
pohjakuva: STUK

# Uraaniin liittyvät terveydelliset riskit

- Terveydelle haitalliset säteilyvaikutukset liittyvät ensisijaisesti uraanin ( $^{238}\text{U}$ ) hajoamissarjaan kuuluviin radioaktiivisiin tytärynuklideihin: radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), radium ( $^{226}\text{Ra}$ ), lyijy ( $^{210}\text{Pb}$ ) ja polonium ( $^{210}\text{Po}$ )
- Sisäilman radon aiheuttaa noin puolet suomalaisten keskimääräisestä säteilyannoksesta vuodessa
  - Asuntojen, työpaikkojen ja porakaivovesien radonpitoisuudet ovat Suomessa suuria
- Uraani on kemiallisesti myrkyllinen raskasmetalli ja suurina annoksina haitallinen etenkin munuaisille
  - Uraanin kemiallisen myrkyllisyyden terveysriskit ovat sen säteilyriskejä suuremmat
- Uraani esiintyy luonnossa pääosin hapetusasteella  $\text{U}^{4+}$  tai  $\text{U}^{6+}$ 
  - $\text{U}^{4+}$  esiintyy pääosin pelkistävässä olosuhteissa, niukkaliukoinen
  - Hapettavissa olosuhteissa uraani hapettuu kuuden arvoiseksi ( $\text{U}^{4+} \rightarrow \text{U}^{6+}$ ),  $\text{U}^{6+}$  on herkkäliukoinen ja esiintyy vesissä pääosin uranyyli-ionina ( $\text{UO}_2^{2+}$ )

# Säteilyannokset

- Efektiivinen annos kuvaa säteilyaltistuksen terveydellistä kokonaisriskiä:
  - Efektiivinen annos ottaa huomioon säteilylajin sekä säteilylle altistuvien elinten ja kudosten säteilyherkkyyden
  - Efektiivisen annoksen yksikkönä on sievert (Sv), usein käytetään sen tuhannesosaa, millisievertiä (mSv)
  - 1 mSv vastaa riskiä 0,00005 ( $5 \times 10^{-5}$ ) saada kuolemaan johtava syöpä
  - Suomalaisen keskimääräinen säteilyannos on noin 3,2 millisievertiä vuodessa
- Annosnopeus ilmaisee, kuinka suuren säteilyannoksen ihminen saa tietyssä ajassa (yksikkönä Sv/h)
  - Taustasäteilystä johtuva annosnopeus vaihtelee Suomessa normaalisti välillä 0,05 - 0,30  $\mu\text{Sv/h}$



Suomalaisen keskimääräinen säteilyannos on noin 3,2 millisievertiä vuodessa. Noin puolet tästä annoksesta aiheutuu sisäilman radonista. Lisäksi luonnon taustasäteilystä aiheutuu keskimäärin 30 % ja säteilyn käytöstä terveydenhuollossa noin 15 % vuosittain.

# Radium ( $^{226}\text{Ra}$ )

- Maa-alkalimetalli
- Puoliintumisaika 1600 vuotta
- Uraanin ( $^{238}\text{U}$ ) hajoamissarjaan kuuluva radionuklidi
- Korkea radiotoksisuus (säteilymyrkyllisyys), alfa-aktiivinen
- Kemiallisilta ominaisuuksiltaan muiden maa-alkalimetallien (Ba, Ca, Mg) kaltainen
- Taipumus kerääntyä luihin
- Voi liueta pohja- ja pintavesiin kahden arvoisena ( $\text{Ra}^{2+}$ ) kationina (ei kovin herkästi)
- Saostuu vesistä niukkaliukoisten karbonaattien ja sulfaattien kanssa (kerasaostuminen)
- Radiumin ( $^{226}\text{Ra}$ ) hajotessa syntyy radonia ( $^{222}\text{Ra}$ )



# Radon ( $^{222}\text{Rn}$ )

- Jalokaasu, alfa-aktiivinen, liukenee vesiin, puoliintumisaika 3,8 päivää
- Uraanin ( $^{238}\text{U}$ ) hajoamissarjaan kuuluva radionuklidi
- Herkkäliikkeinen johtuen kaasumaisesta olomuodosta ja kemiallisesta reagoimattomuudesta
- Hajoaa radioaktiiviseksi, kiinteän olomuodon tytärnuklideiksi (mm.  $^{218}\text{Po}$  ja  $^{214}\text{Pb}$ )
- Radon ja sen hajoamistuotteet kulkeutuvat hengityksen mukana keuhkoihin ja lisäävät keuhkosyövän riskiä
  - Sisäilman radon aiheuttaa Suomessa arviolta 300 keuhkosyöpää joka vuosi
- Radon on ongelma varsinkin harjualueilla, missä huokoinen maaperä vaikuttaa osaltaan sisäilman korkeisiin radonpitoisuuksiin
- Radon tulee sisäilmaan talon perustuksissa olevien rakojen kautta, talvella pitoisuudet suuremmat (ulko- ja sisälämpötilojen eron aiheuttama alipaine)
- Sisäilman radonpitoisuuden mittaaminen kannattaa, sillä radon on tupakan jälkeen toiseksi tärkein keuhkosyövän aiheuttaja
  - Mittaamista suositellaan kaikissa pientaloissa ja kerrostalojen 1. kerroksen asunnoissa
  - Vanhojen asuntojen radonpitoisuus ei saisi ylittää 400 becquereliä kuutiometrissä

# Porakaivovedet

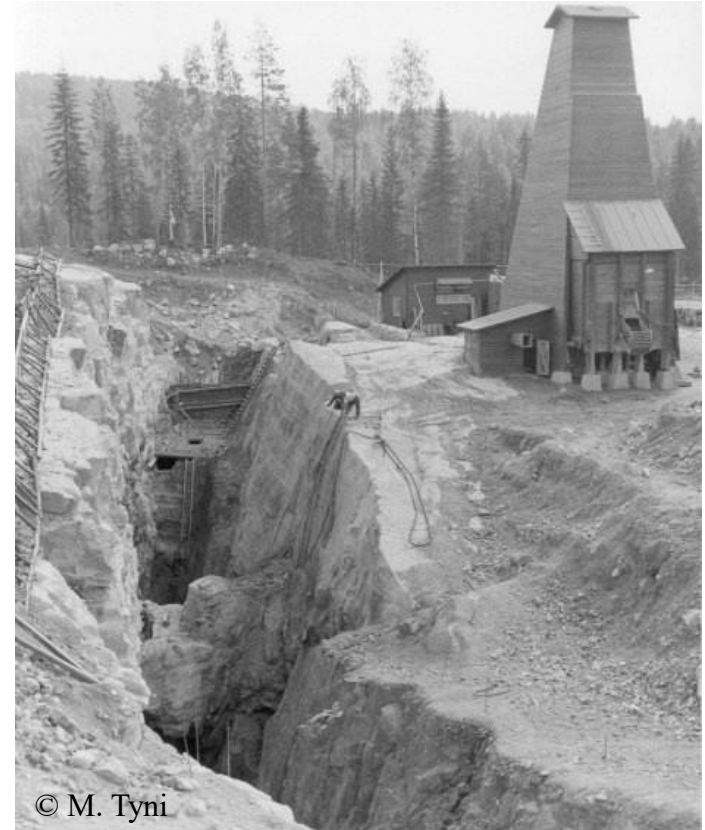
- Radon on merkittävin talousveden radioaktiivinen aine
- Radonpitoisuuden keskiarvo porakaivovedessä on 460 Bq/l, rengaskaivovedessä 50 Bq/l ja verkostovedessä 27 Bq/l
- Toimenpideraja vesilaitosten veden radonpitoisuudelle on 300 becquereliä litrassa ja yksityiselle kaivovedelle 1000 Bq/l
  - Noin 10 % Suomen porakaivovesistä ylittää yksityiselle kaivovedelle asetetun toimenpiderajan 1000 becquereliä litrassa
- Radon- ja uraanipitoisuudet ovat suurimpia graniittialueilla, mm. Uudellamaalla, Varsinais-Suomessa, Hämeessä ja Kymenlaaksossa
- Maailman terveysjärjestö WHO:n ohjearvo juomaveden uraanipitoisuudelle on 30 mikrogrammaa litrassa
  - Noin 13 % suomalaisista porakaivoveden käyttäjistä käyttää vettä, jossa uraanipitoisuus ylittää WHO:n ohjearvon
- STUK suosittelee harkitsemaan toimenpiteitä uraanin poistamiseksi juomavedestä, jos veden uraanipitoisuus ylittää arvon 100 µg/l

# Uraanin tuotantoketju

- Uraaninetsintä (malminetsintä)
- Löydetyn malmiesiintymän kannattavuus- ja tuotantoselvitykset (jos taloudellisesti hyödynnettävissä oleva esiintymä löydetään)
- Kaivoksen lupaprosessi
  - Ympäristö-, kaivos-, rakentamis- ja kemikaaliluvat mukaan lukien ympäristövaikutusten arviointi
  - Suomessa uraanin tuottamiseen tarvitaan ydinenergialain mukaan myös valtioneuvoston lupa
- Uraanin tuotanto (louhinta ja rikastus)
- Kaivoksen sulkeminen, radioaktiivisten rikastushiekkojen loppusijoitus ja maisemointi
- Jälkihoito ja seuranta (mm. raskasmetallien ja uraanin hajoamissarjaan kuuluvien radionuklidien tarkkailu vesissä)

# Uraaninetsintä Suomessa

- Suomessa uraaninetsintä on ollut suhteellisen vähäistä ja etsinnän tulokset ovat olleet melko vaatimattomia
- Etsintää harjoitettiin 1950-luvulta 1980-luvulle mm. Atomienergia Oy:n, Imatran Voima Oy:n, Outokumpu Oy:n ja GTK:n toimesta
- Uraaninetsintä käynnistyi uudelleen 2000-luvulla AREVA:n ja muutamien pienten junioriyhtiöiden toimesta
- Malminetsintälupa vaaditaan
- Uraaninetsintää ei tällä hetkellä harjoiteta Suomessa

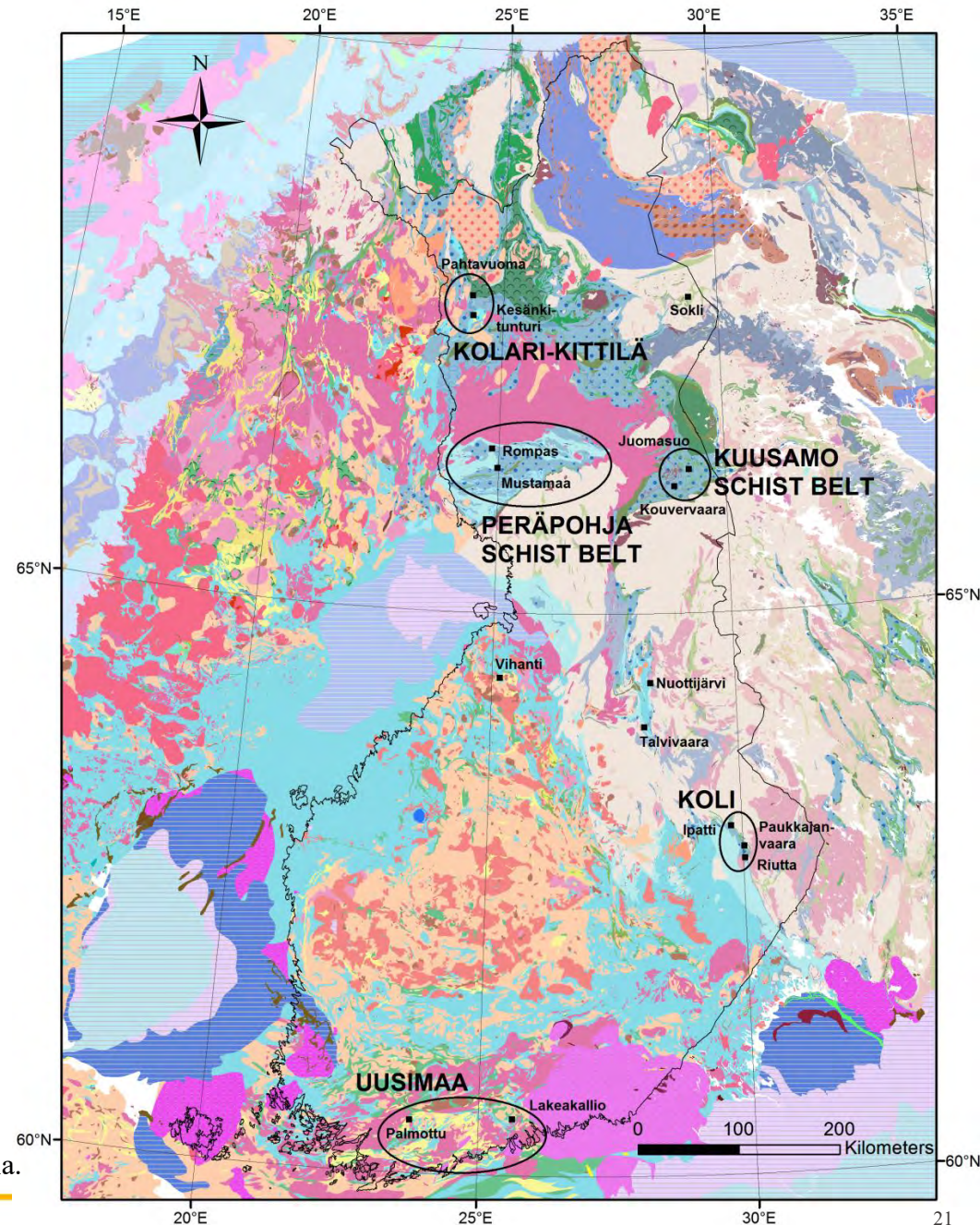


Koeluontoista uraanikaivostoimintaa harjoitettiin Enon Paukkajanvaarassa Atomienergia Oy:n koekaivoksella ja -rikastamolla vuosina 1958-1961. Paukkajanvaaran kaivosalue peitettiin 1990-luvun alussa.

# Suomen uraanipotentialiaali

- Malmipotentialialisia alueita uraanin suhteen ovat mm. Peräpohjan ja Kuusamon liuskealueet, Kolin alue, Uusimaa ja Kolari-Kittilän alue
- Suomesta ei tunneta yhtään kaupallisesti hyödynnettävissä olevaa uraaniesiintymää
  - Tunnetut esiintymät ovat pieniä ja niiden U-pitoisuudet matalia
- Taloudellisesti merkittävimpiä U-esiintymätyyppejä ei ole löydetty Suomesta (unconformity, sandstone, breccia complex)

Uraanipotentialialisia alueita ja merkittävimpiä Suomen uraaniesiintymiä Fennoskandian kilven geologisella kartalla.



# Uraanin tuotannon sääntely Suomessa

- Toiminnasta säädetään ydinenergialaissa ja -asetuksessa, säteilylaissa sekä STUKin määräyksissä
- Ydinenergialain mukaan kaivos- tai rikastustoimintaan, jonka tarkoituksena on uraanin tai toriumin tuottaminen, tarvitaan valtioneuvoston myöntämä lupa
- Ydinenergialain ja kaivoslain mukainen uraanikaivosta koskeva lupahakemus käsitellään yhdessä ja ratkaistaan samalla päätöksellä valtioneuvostossa
  - Luvan myöntäminen edellyttää, että kaivoshanke on yhteiskunnan kokonaisedun mukainen, asianomainen kunta on antanut suostumuksensa ja että turvallisuusvaatimukset on täytetty
- Ydinenergia-asetuksen mukaan uraania voidaan kuitenkin tuottaa enintään 10 tU/vuosi STUKin luvalla ilman valtioneuvoston lupaa
- Ydinenergialainsäädännössä uraanimalmilla tarkoitetaan malmia, jonka keskimääräinen uraanipitoisuus on yli 0,1 %
- Toiminnan harjoittajan on ilmoitettava STUKiin, mikäli hyödynnettävien luonnonvarojen uraani- tai toriumpitoisuus on suurempi kuin 0,1 kilogrammaa tonnissa (0,01 %)

# Uraani Talvivaaran malmissa

- Uraanin keskipitoisuus mustaliuskemalmissa n. 17 ppm (0,0017 %)
- Malmin uraani sisältyy pääosin uraniniittiin (UO<sub>2</sub>)
- Kasaliuotuksessa malmin sisältämää uraania liukenee muiden metallien ohella samaan prosessiliuokseen
- Terrafame Oy tuottaa nikkeliä, sinkkiä ja kobolttia Sotkamossa sijaitsevalla kaivoksellaan ja metallitehtaallaan
  - Terrafame osti vuonna 2015 Talvivaara Sotkamo Oy:n liiketoiminnan ja omaisuuserät Talvivaara Sotkamo Oy:n konkurssipesältä
- Terrafame omistaa lähes valmiin uraanin talteenottolaitoksen kaivosalueellaan ja kertoo kartoittavansa laitoksen mahdollista hyödyntämistä tulevaisuudessa
- Uraanin mahdollisen talteenoton todennäköiset vaikutukset:
  - Uraania päätyisi nykyistä vähemmän prosessijätteisiin (kipsisakka-  
altaisiin)
  - Uraania ei päätyisi enää merkittävässä määrin epäpuhtautena Ni-Co-  
sulfidirikasteeseen

# Uraanimalmit

- Uraanimalmi tarkoittaa luonnon mineraaliesiintymää, josta on taloudellisesti kannattavaa erottaa ja tuottaa uraania
- U-malmin louhinnan kannattavuus riippuu uraanin hinnan lisäksi tuotantokustannuksista
  - Kustannuksiin vaikuttavat mm. esiintymän laatu, syvyys, uraanipitoisuus, mineralogia, maantieteellinen sijainti sekä malmin louhinta- ja rikastustekniset ominaisuudet
- Esiintymätyypistä riippuen uraanimalmien keskipitoisuus (0,03 - 18 % U) vaihtelee paljon
- Uraniniitti ( $\text{UO}_2$ ) on yleisin uraanimalmineraali
  - Uraniniitti on kiteistä
  - Uraanioksidin amorfista muunnosta kutsutaan usein pikivälkkeeksi



Uraniniittia (pikivälkettä), Niederschlema-Alberoda, Saksa. Annosnopeus noin 520  $\mu\text{Sv/h}$  näytteestä kiinni mitattaessa.



# Uraanikaivosten tuotantomenetelmät

- Uraania saadaan sekä päätuotteena (uraanikaivokset) että muiden metallien (mm. kulta ja kupari) sivutuotteena
- Uraania tuotetaan neljällä eri menetelmällä: ISL-menetelmällä (48 %), maanalaisista kaivoksista (33 %), avolouhoksista (14 %) ja muiden metallien sivu- ja rinnakkaistuotteena (5 %)
- Australian Olympic Dam kaivoksessa uraania erotetaan kuparin rinnakkaistuotteena (kaivoksen osuus 5 % maailman uraanin tuotannosta)

## Tuotannoltaan maailman suurimmat uraanikaivokset:

Kaivos	Valtio	Pääomistaja	Tuotanto- menetelmä	Tuotanto (tonnia uraania, 2016)	Osuus maailman tuotannosta (%)
McArthur River	Kanada	Cameco	Maanalainen	6945	11
Cigar Lake	Kanada	Cameco	Maanalainen	6666	11
Tortkuduk/Myunkum	Kazakstan	Katco JV/AREVA	ISL	4002	6
Olympic Dam	Australia	BHP Billiton	Maanalainen	3233	5
Inkai	Kazakstan	Inkai JV/Cameco	ISL	2291	4

# Maanalaiset uraanikaivokset

- Jos malmi sijaitsee syväällä kalliossa, on sen U-pitoisuuden oltava korkea, jotta maanalainen louhinta on taloudellisesti kannattavaa
- Sivukiven louhintaa yleensä vähemmän kuin avolouhoksissa
- Radonkaasun torjunta tärkeää riittävän tuuletuksen avulla
- Rikkaiden U-malmien louhinnassa (McArthur River) voidaan käyttää kauko-ohjattavia kaivoskoneita työntekijöiden suojaamiseksi säteilyltä



© E. Pohjolainen

Nousuporakone 530 metrin syvyydessä McArthur Riverin uraanikaivoksessa. Saskatchewan, 2010.

# Avolouhokset

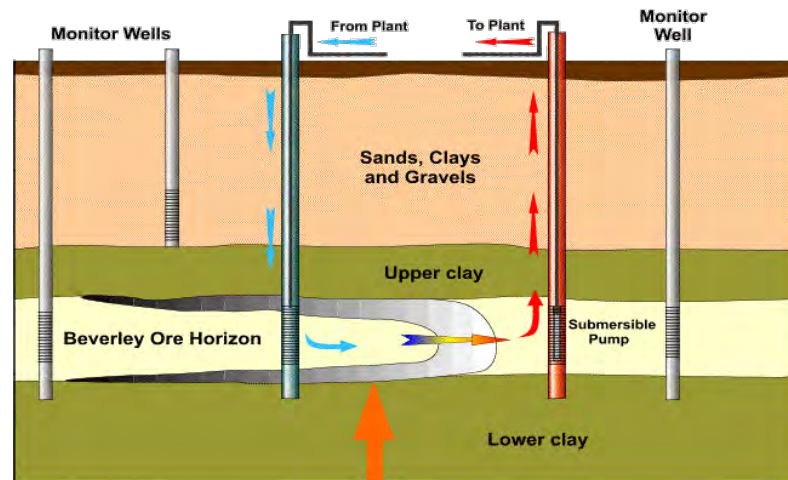
- Lähellä pintaa sijaitseva malmi voidaan hyödyntää avolouhoksena
- Avolouhinta halvempaa ja voidaan hyödyntää köyhempiäkin malmeja
- Louhintamäärät ovat suuria ja sivukiven louhinta voi olla runsasta
- Ulkoilmassa radon laimenee, kaivoskoneiden kopeissa työskentely vähentää säteilyaltistusta, pölyämistä voidaan estää kastelulla



Rangerin uraanikaivos Australian Pohjoisterritoriossa, avolouhoksen taustalla rikastamo (2013).

# ISL-menetelmä

- ISL-menetelmässä (in situ leaching) malmin U-pitoisuudet usein matalat
- Malmia ei louhita, vaan liuotin ja hapetin syötetään alas malmivyöhykkeeseen injektiokaivoja pitkin ja U-pitoinen liuos pumpataan ylös tuotantokaivoja pitkin maanpinnalle uraanin erottamista varten
- Kustannustehokas ja nopeasti käyttöön otettava tuotantomenetelmä, jonka yhteydessä ei synny sivukivijätettä
- Soveltuu vain hiekkakivityypin uraaniesiintymiin
- Ympäristövaikutukset selvittävää perusteellisesti, sillä U-esiintymään pumpatut liuokset eivät saa pilata kaivosaluetta ympäröiviä pohjavesiä



Poikkileikkaus Etelä-Australiassa sijaitsevan Beverleyn uraanikaivoksen ISL-menetelmästä (kuva: Heathgate Resources).

# Uraanin rikastus

- Uraanikaivosalue käsittää yleensä sekä kaivoksen että rikastamon
- Uraanin rikastus tarkoittaa uraanin erottamista malmista:
  - **Maanalaiset kaivokset ja avolouhokset:** Uraanimalmi murskataan, sekoitetaan veden kanssa ja jauhetaan hienojakoiseksi lietteeksi, josta uraani erotetaan liuottamalla. Liuennut uraani erotetaan, saostetaan ja kalsinoidaan. Lopputuotteena uraanirikaste ( $U_3O_8$ ).
  - **In situ leach:** Malmia ei louhita, liuotin syötetään alas malmivyöhykkeeseen injektiokaivoja pitkin, uraanipitoinen liuos pumpataan ylös tuotantokaivoja pitkin maanpinnalle. Liuennut uraani erotetaan ja saostetaan.
  - **Kasaliuotus:** louhittu (maanalainen/avolouhos) ja murskattu U-malmi liuotetaan kasoissa, liuennut uraani erotetaan ja saostetaan.

Uraanirikastetta ( $U_3O_8$ ) sisältäviä tynnyreitä  
Camecon Key Laken rikastamolla.  
Saskatchewan, Kanada, 2010.



# Uraanikaivosjätteet

- U-kaivokset eroavat muista kaivoksista lähinnä radioaktiivisuuden takia
- Uraanikaivosten kaivannaisjätteet koostuvat pääosin rikastushiekasta & louhitusta sivukivistä
- Uraanin erottaminen malmista tuottaa rikastushiekkaa
  - Jauhettua kiviainesta, josta uraani on liuotettu ja erotettu lähes kokonaan
- Uraanin hajoamissarjaan kuuluvat radionuklidit kuitenkin päätyvät rikastushiekkaan, jonka huolellinen hallinta tärkeää
  - Rikastushiekka sisältää tyypillisesti noin 85 % alkuperäisen uraanimalmin radioaktiivisuudesta
- Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) ja radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ovat yleensä haitallisimmat radionuklidit louhinnassa, rikastuksessa ja kaivosjätteiden hoidossa
- Kaivosjätteet sisältävät yleensä radionuklidien lisäksi raskasmetalleja, metalleja ja hapettuvia sulfidimineraaleja (hapan kaivosvaluma)
- Suuria eroja kaivosten välillä riippuen tuotanto- ja louhintamenetelmistä

# Uraanikaivosten rikastushiekan käsittely

- Rikastushiekka koostuu pääosin rikastamalla liukenematta jääneistä kiinteistä aineista. Lisäksi rikastushiekkojen käsittelyyn ohjataan prosessin jäämiä ja sakkoja, kuten raffinaattia (liuos, josta uraani on erotettu), nesteuuton orgaanisen liuoksen regenerointijätettä ja vesien käsittelyn sakkoja.
- Rikastushiekan ainevirrat ohjataan neutralointisäiliöihin, joihin lisätään mm. bariumkloridia, kalkkia, ferrisulfaattia ja vetyperoksidia, joiden avulla saostetaan mm. raskasmetalleja ja radiumia sekä neutraloidaan hapanta jätettä
- Neutralointisäiliöistä aines siirretään rikastushiekan sakeuttimiin, joissa neste ja kiinteä aines erotellaan
- Nesteet ohjataan vesien käsittelylaitokselle ja kiinteä aines loppusijoitetaan rikastushiekka-altaaseen

Avolouhoksesta tehty rikastushiekka-  
allas (tailings management facility)  
AREVA:n McClean Laken kaivoksella.  
Saskatchewan, Kanada, 2010.



# Uraanirikastamojen prosessivesien käsittely

- Prosessiveteen liuenneet radionuklidit, raskasmetallit ja metalloidit saostetaan sekä nesteeseen sekoittuneet hienojakoiset kiinteät aineet poistetaan
- Puhdistuksessa veteen lisätään mm. kalkkia ja eri kemikaaleja
  - Kalkin (lime) avulla nostetaan pH:ta eli neutraloidaan vesiä
  - Bariumkloridin avulla saostetaan radiumia bariumsulfaatin mukana
- Vedet ohjataan saostuksen jälkeen selkeyttimiin, joissa kiinteä aines ja sakat erotetaan siirrettäväksi rikastushiekan käsittelyyn
- Puhdistettu vesi siirretään monitorointialtaisiin vedenlaadun varmistamiseksi
  - Ennen vesien ohjaamista ympäristöön varmistetaan analyysien, etteivät haitta-aineiden pitoisuudet ylitä raja-arvoja

AREVA:n McClean Laken rikastamon prosessivesien käsittelylaitos.  
Saskatchewan, Kanada, 2010.



© E. Pohjolainen



# Uraanikaivosten ympäristöriskien hallinta

- Radioaktiivisen rikastushiekan hoito ja loppusijoitus on tehtävä ihmisten ja luonnon kannalta huolellisesti ja turvallisesti
- Kaivostoiminnan päästöille ympäristöön voidaan asettaa säteilyannoksen rajoitus, jolla suojellaan alueen väestöä ja ympäristöä
- Radionuklidien ja raskasmetallien leviäminen kaivannaisjätteistä veden mukana ympäröivään luontoon pitää estää
- Rikastushiekka pitää peittää radonin leviämisen estämiseksi ja ulkoisen gammasäteilyn vaimentamiseksi
- Rikastushiekka-altaana voidaan käyttää avolouhosta, josta malmi on louhittu tai erikseen rakennettua, padottua jäteallasta
- Avolouhoksen käyttäminen rikastushiekka-altaana edellyttää, että reunat ja pohja on tiivistetty
- Pölyn leviäminen pitää estää
- Kaivostoiminnan loputtua rikastushiekan loppusijoitus vaatii huolellisen peittämisen, jälkihoidon ja seurannan (suunniteltava jo ennen tuotannon aloittamista)

# Uraanikaivosten säteilyturvallisuus

- Työntekijöiden säteilyaltistus on peräisin sisäisestä altistuksesta ja ulkoisesta säteilystä
- **Sisäinen säteilyaltistus:**
  - Radon ja sen tytärynuklidit (polonium, lyijy ja vismutti)
    - Esim. radonin lyhytikäinen hajoamistuote lyijy-214 on yksi merkittävimmistä ihmisen säteilyaltistuksen aiheuttajista, joka käytännössä aiheuttaa suuren osan radonaltistuksesta
  - Radioaktiivinen pöly
- **Ulkoinen säteilyaltistus** johtuu gammasäteilystä
- Työntekijöiden säteilyaltistus voi olla peräisin eri lähteistä:
  - Uraanimalmin, rikastamon prosessiaineksen, rikastushiekan ja sivukiven suora ulkoinen gammasäteily
  - Radonpitoisen ilman hengittäminen
  - Radionuklideita sisältävän pölyn hengittäminen tai joutuminen suun kautta ruoansulatuselimistöön esim. suojaamattomien ja pesemättömien käsien kautta

# Uraanikaivosten säteilysuojelu

- Työntekijöiden säteilyannoksia seurataan henkilökohtaisten säteilymittareiden avulla, lisäksi rikastamoihin ja kaivoksiin on sijoitettu kiinteitä säteilymittareita
  - Esim. kansainvälisten suositusten mukaan työntekijän säteilyannos ei saa ylittää keskiarvoa 20 mSv/vuosi viiden vuoden aikana
- Työntekijöiden suojavaatetus ja hygieniasta huolehtiminen tärkeää
- Louhinnassa pölyämistä voidaan ehkäistä kastelulla
- Maanalaisissa kaivoksissa tuuletus tärkeässä roolissa radonin torjunnassa
- Hyvin rikkaiden malmien (McArthur River, Kanada) louhinnassa käytetään kauko-ohjattavia kaivoskoneita työntekijöiden suojaamiseksi säteilyltä
- Suurimmat ulkoisen gammasäteilyn annosnopeudet tavataan mm. rikastamon liuotussäiliöiden välittömässä läheisyydessä, missä ei työskennellä kuin poikkeuksellisesti
- Rikastamoilla käytetään työntekijöiden säteilysuojelussa hyväksi mm. etäisyyttä säteileviin aineisiin, säteilyä vaimentavia betoni- ja lyijyrakenteita sekä tuuletusta ja ilmanpaineistettuja työskentelytiloja mm. radonin leviämisen ehkäisemiseksi

# Ydinpolttoaineen valmistus

- Kaivoksilla tuotettavaa uraanirikastetta ( $U_3O_8$ ) ei voida sellaisenaan käyttää ydinpolttoaineena reaktoreissa, vaan se pitää jatkojalostaa:
- **1) Konversio:** Kevytvesireaktoreissa käytettävää polttoainetta varten uraanirikaste muutetaan uraaniheksafluoridiksi ( $U_3O_8 \rightarrow UF_6$ ) ennen väkevöimistä
- **2) Väkevöinti:** Ydinreaktorien sähköntuotanto pohjautuu indusoituun fission perustuvaan ketjureaktioon, jonka aikaansaamiseksi uraanin isotoopin  $^{235}U$  osuutta pitää nostaa (0,72 %  $\rightarrow$  3-5 %  $^{235}U$ ) eli uraani väkevöidään esim. kaasusentrifugitekniikalla (perustuu  $^{235}U$  ja  $^{238}U$  massaeroon). Väkevöinnin sivutuotteena syntyy runsaasti köyhdytettyä uraania, jota varastoidaan yleensä väkevöintilaitoksilla.
- **3) Ydinpolttoaineen valmistus:** Väkevöity uraaniheksafluoridi muunnetaan kiinteäksi uraanioksidiksi ( $UF_6 \rightarrow UO_2$ ), joka puristetaan pelleteiksi. Polttoainepelletit pinotaan zirkoniumsauvoihin, jotka hitsataan umpinaisiksi ja kootaan nipuiksi. Polttoaineniput toimitetaan voimalaitokseen käytettäviksi.



Tyhjä polttoainenippu TVO:n Olkiluodon vierailukeskuksessa. Nippu koostuu noin sadasta polttoainesauvasta.

# Uraanivarannot

- Maailman varannot (todetut, todennäköiset ja mahdolliset) ovat noin 5 700 000 tonnia uraania (kustannusluokassa <US\$130/kgU)
- Varannot jakautuneet epätasaisesti; lähes 90 % sijaitsee yhdeksän valtion alueella
- Australiassa on maailman suurimmat uraanivarannot (29 %) kustannusluokassa <US\$130/kgU
  - Suurin osa Australian varannoista sisältyy Olympic Damiin, joka on maailman suurin uraaniesiintymä
- Nykyiseen ydinvoimakapasiteettiin ja reaktoritekniikkaan perustuvassa sähköntuotannossa tunnettujen uraanivarantojen arvioidaan riittävän yli 100 vuodeksi
- Suomesta kansainvälisiin tilastoihin raportoidut varannot ovat vain 1500 tU (*In situ*)

# Uraanin tuotanto

- Globaali kaivostuotanto oli noin 62 000 tonnia uraania vuonna 2016
- Kazakstanin, Kanadan ja Australian yhteenlaskettu osuus maailman uraanin tuotannosta on 72 %
- Kazakstanissa tuotanto on viimeisen kymmenen vuoden aikana lähes nelinkertaistunut
  - Kazakstanin osuus koko maailman uraanin tuotannosta on 39 %
- ISL-menetelmän osuus tuotannosta kasvanut merkittävästi viime vuosina (päätuotantomenetelmä Kazakstanissa)
- Uraanikaivoksia on globaalisti toiminnassa noin 50

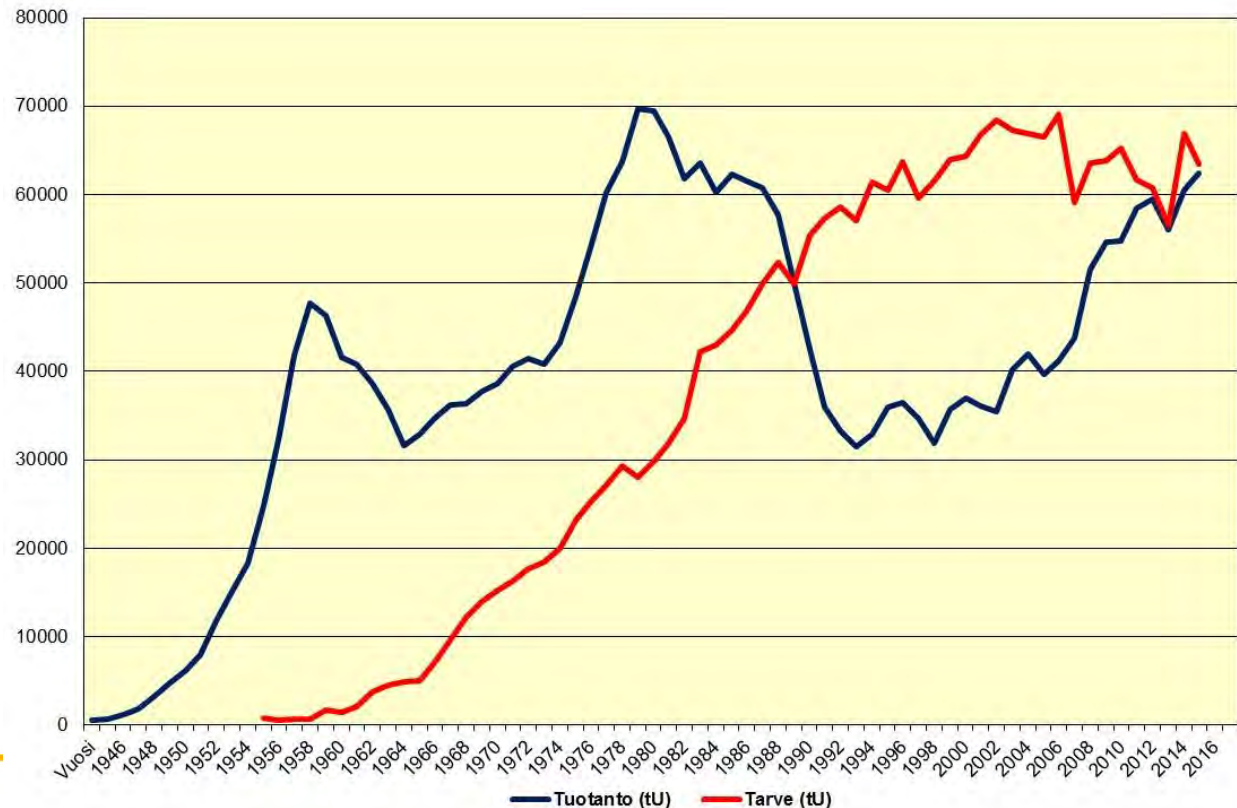
Globaali uraanin kaivostuotanto (2016)		
Valtio	Tonnia uraania	Osuus (%)
Kazakstan	24575	39
Kanada	14039	23
Australia	6315	10
Niger	3479	6
Namibia	3654	6
Venäjä	3004	5
Uzbekistan	2404	4
Kiina	1616	3
USA	1125	2
Ukraina	1005	2
Etelä-Afrikka	490	1
Intia	385	1
Tsekki	138	0,2
Romania	50	0,1
Pakistan	45	0,1
Brasilia	44	0,1
Ranska	0	0
Saksa	0	0
Malawi	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>62 366 tU</b>	

# Uraanin tarve

- Globaali ydinreaktoreiden tarve on noin 63 000 tonnia luonnonuraa (tU) vuodessa
- Suomen ydinvoimaloiden uraanin tarve nykyisin 450-500 tU/vuosi
- Maailmassa on 447 sähköntuotannossa olevaa ydinreaktoria 31 eri maassa
- Globaalisti tällä hetkellä yhteensä 58 reaktoria rakenteilla 14 eri maassa
  - Kiinassa 20 reaktoria rakenteilla
  - Maailmanlaajuisesti suunnitteilla yhteensä 162 reaktoria
- Sähköntuotannossa ydinenergian (10 g CO<sub>2</sub>/KWh) avulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita (549-991 g CO<sub>2</sub>/KWh) ja vähentää tehokkaasti kasvihuonekaasupäästöjä
- Tulevaisuudessa reaktoritekniikan kehittyminen saattaa mahdollistaa uraani- ja toriumvarojen tehokkaamman hyödyntämisen

# Uraanin tarjonnan ja kysynnän suhde

- Globaali uraanin tuotanto on tällä hetkellä noin 62 000 tU/vuosi ja ydinvoimaloiden uraanin tarve noin 63 000 tU/vuosi
- Uraanin tarve on ylittänyt kaivosten tuotannon vuodesta 1990 lähtien, mutta tällä hetkellä uraanin tarjonta kattaa lähes täysin kysynnän
- Uraanin tarpeen ja tuotannon välinen erotus on katettu sekundäärisistä lähteistä, joita ovat varastot, aseuraanin laimentaminen ja käytetyn ydinpolttoaineen uudelleen käsittely
- Kaivostuotanto kattaa tällä hetkellä 98 % ja sekundääriset lähteet 2 % uraanin tarpeesta



Maailman vuotuinen uraanin tuotanto ja tarve (tU/v), 1945-2016



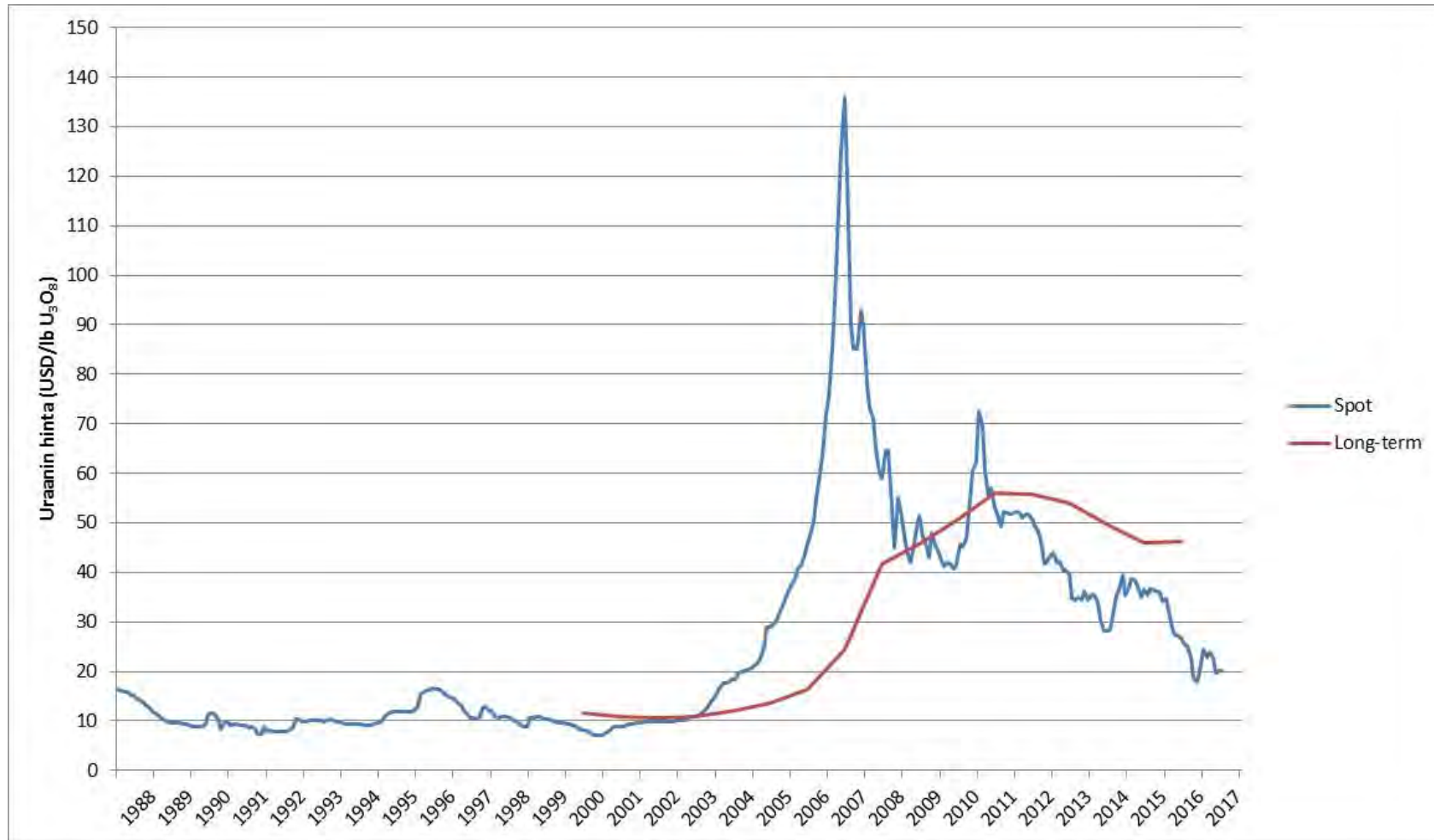
# Uraanin tuottajat ja käyttäjät

- Suurimmista uraanin tuottajamaista Kazakstan, Australia, Niger ja Namibia eivät hyödynnä ydinvoimaa
- Ydinvoimalat ovat keskittyneet Länsi-Eurooppaan, USA:n itäosiin ja Japaniin, jotka ovat riippuvaisia uraanin tuonnista
- Suurimmat ydinenergian tuottajamaat ovat USA, Ranska ja Japani
  - Näissä kolmessa maassa sijaitsee lähes puolet ydinreaktoreista ja yhteenlaskettuna ne ovat tuottaneet viime vuosina noin puolet maailman ydinenergiasta
- Ranskassa yli 70 % sähköstä tuotetaan ydinenergialla
- USA on maailman suurin ydinpolttoaineen käyttäjä (99 reaktoria) ja sen osuus globaalista uraanin tarpeesta on yli neljäsosa
- Ydinenergian osuus maailman sähköntuotannosta on noin 11 %

# Uraanimarkkinat

- Uraanin hinnat vaikuttavat merkittävästi malminetsinnän houkuttelevuuteen ja uraani-kaivostoiminnan kannattavuuteen
  - Nykyinen spot-hinta (20 USD/lb  $U_3O_8$ ) ei kannusta yhtiöitä aktiiviseen etsintään ja uusien kaivoshankkeiden kehittämiseen
- Ydinvoimayhtiöt ostavat tuottajilta uraania joko pitkäaikaisilla toimitussopimuksilla tai spot-hintaan perustuvilla kaupoilla
- Uraanin spot-hinnalla käydyn kaupan osuus on noin 20 %, kun taas pitkäaikaisten sopimusten hinnat muodostavat noin 80 % koko kaupankäynnin volyymista
- Pitkäaikaissopimukset vähemmän volatiileja kuin spot-hinnat
- Viime vuosina pitkäaikaissopimukset ovat tuoneet uraanintuottajille vakautta ja kaivostoiminnan parempaa kannattavuutta suhteessa spot-sopimukseen

# Uraanin hintakehitys



Uraanin spot-hintojen ja pitkäaikaissopimusten hintojen vaihtelu viime vuosien aikana. Spot-hinnat pohjautuvat Camecon laskemiin keskihintoihin, jotka perustuvat Ux Consultingin ja TradeTechin julkaisemiin kuukauden lopun hintoihin (lähde: Camecon verkkosivut). Pitkäaikaissopimusten hinnat (long-term) perustuvat Yhdysvaltain energiaministeriön julkaisemiin tietoihin (lähde: U.S. Energy Information Administration, 2016 Uranium Marketing Annual Report). Hinta 50 USD/lb U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> vastaa uraanin hintaa 130 USD/kgU.

# Fukushiman vaikutukset

- Fukushiman ydinvoimalaonnettomuudella (maaliskuu 2011) oli iso vaikutus ydinenergia-alan kehitykseen ja näkymiin:
  - Ydinturvallisuuden parantamiseen on panostettu entistä enemmän
  - Kiinnostus uraanivaroja kohtaan on hieman pienentynyt
    - Rahoituksen hankkiminen uraaninetsinnän ja kaivosprojektien investointeihin on ollut monessa tapauksessa haastavaa
- Fukushiman jälkeinen tilanne ollut kaksijakoinen:
  - Euroopassa ja Japanissa ydinenergia ollut vastatuulella
    - Ydinvoimapolitiikkaan tullut muutoksia: Saksa, Italia, Sveitsi, Belgia, Japani
    - Saksa on ilmoittanut aikovansa sulkea ydinvoimalansa vuoteen 2022 mennessä
    - Länsimaissa (mm. Iso-Britanniassa) nykyiset ydinvoimalaitokset ovat tulossa käyttöikänsä päähän; investointipäätökset ydinvoiman korvaus- ja lisärakentamisesta pääosin auki
  - Toisaalta Aasiassa (mm. Kiina ja Intia) panostetaan edelleen ydinvoiman merkittävään lisärakentamiseen

# Uraanimarkkinoiden näkymät

- Uutta ydinvoimakapasiteettia rakennetaan tulevina vuosina varsinkin Kiinassa, Venäjällä, Intiassa ja Etelä-Koreassa
- Uraanin kysynnän odotetaan kasvavan Fukushima onnettomuudesta huolimatta
- Globaalin ydinvoimakapasiteetin odotetaan lisääntyvän nykyisestä tasosta vuoteen 2035 mennessä:
  - 377 GW vuonna 2014 → 418-683 GW vuonna 2035
  - Vastaavasti uraanin tarpeen odotetaan kasvavan nykyisestä (63 000 tU/v) tasolle 66 995 - 104 740 tU/v vuoteen 2035 mennessä
  - Uraanin tuotantokapasiteetin on lisäännyttävä, jotta kasvava kysyntä voidaan kattaa
  - Lisäksi sekundääristen lähteiden suhteellinen osuus on pienentymässä uraanin kysynnän kattamisessa