
Tulevaisuuden ydinpolttoainekierrot

Markku Anttila

ATS-syysseminaari 26.10.2007



Sisällysluettelo

Johdanto	3
Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen	5
Korkea-aktiivisen ydinjätteen määrän vähentäminen	15
Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyky ja fyysinen suojele (PR&PP)	21
Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys	25
Nopeat reaktorit vuonna 2007 (tiedoksi)	30
Johtopäätöksiä	35

Ydinpolttoainekierron vaihtoehdot

Avoin kierto	tai	Suljettu kierto
Suora loppusijoitus	tai	Jälleenkäsittely + loppusijoitus
Varastointi ja sen kesto		
Reaktorityypit:		Termiset Kriittiset nopeat Alikriittiset nopeat reaktorit (esim. ADS)
Polttoainetyypit:		Oksidi, metallinen, karbidi, nitridi, IMF, säteilytyskohtiot

Lukemattomia muunnelmia, joista todennäköisesti vain muutama on kaupallisesti toteutettavissa

Tulevaisuuden ydinpolttoainekierroilta edellytetään:

- turvallisuutta, luotettavuutta ja taloudellisuutta
- mahdollisimman vähäisiä kasvihuonekaasujen päästöjä
- luonnonvarojen (= uraanin ja mahdollisesti toriumin) mahdollisimman tehokasta hyödyntämistä
- mahdollisimman vähäistä ydinjätteen tuottoa
- mahdollisimman hyvää kykyä estää ydinaseiden leviämistä ja ydinterrorismia

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen I

Uraanitase vuoteen 2003 (lähde: OECD/NEA & IAEA, Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective. OECD 2006)

Arvioitu tuotanto 1945 - 2003	2 200 000 tU
Arvioitu kulutus kaupallisissa reaktoreissa 1956 - 2003	1 500 000 tU
Ylijäämä	n. 650 000 tU

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen II

Varastoituna vuoden 2005 lopussa (lähde: OECD/NEA Nuclear Development, Management of Recyclable Fissile and Fertile Materials. OECD 2007)

		<u>luonnonuraani- sisältö (t)</u>
Köyhdytettyä uraania	1 600 000 t	450 000
Siviilijälleenkäsittelyssä erotettua		
* uraania	45 000 t	50 000
* plutoniumia	320 t	60 000
Entistä asemateriaalia (mukana edellisen kalvon ylijäämässä)		
* HEU	230 t	70 000
* plutoniumia	70 t	15 000

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen III

Uraanivarat vuonna 2005 (lähde: OECD/NEA, Uranium 2005 - Resources, Production and Demand. Executive summary.
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf>)

Tunnetut uraanivarat (tuotantokustannus < 130 USD/kgU)	4 700 000 tU
'Löytämättömät' uraanivarat	10 000 000 tU
Uraania fosforiesiintymissä	22 000 000 tU
Uraania merivedessä	0,003 ppm

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen IV

Arvio uraanin riittävydestä kevytvesireaktoreiden avoimessa kierrossa

1 000 MWe:n LWR tarvitsee

- * noin 24 tonnia väkevöityä uraania vuodessa
- * eli noin 150 - 200 tonnia luonnonuraania vuodessa
- * eli 9 000 - 12 000 tonnia luonnonuraania 60 vuoden käyttöiän aikana

Maailman tunnetut ja 'löytämättömät' uraanivarat riittävät tyydyttämään 1 000 - 1 500 kevytvesireaktorin polttoaineen tarpeen, jos niissä sovelletaan avointa kiertoa.

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen V

**Tunnetut uraanivarat v. 2005
(tuotantokustannus
< 130 USD/kgU)**

Peruslähde: OECD NEA & IAEA,
*Uranium 2005: Resources,
Production and Demand* ("Red Book");

Taulukko: Uranium Information
Centre Ltd.,
<http://www.uic.com.au/nip75.htm>
(22.10.2007)

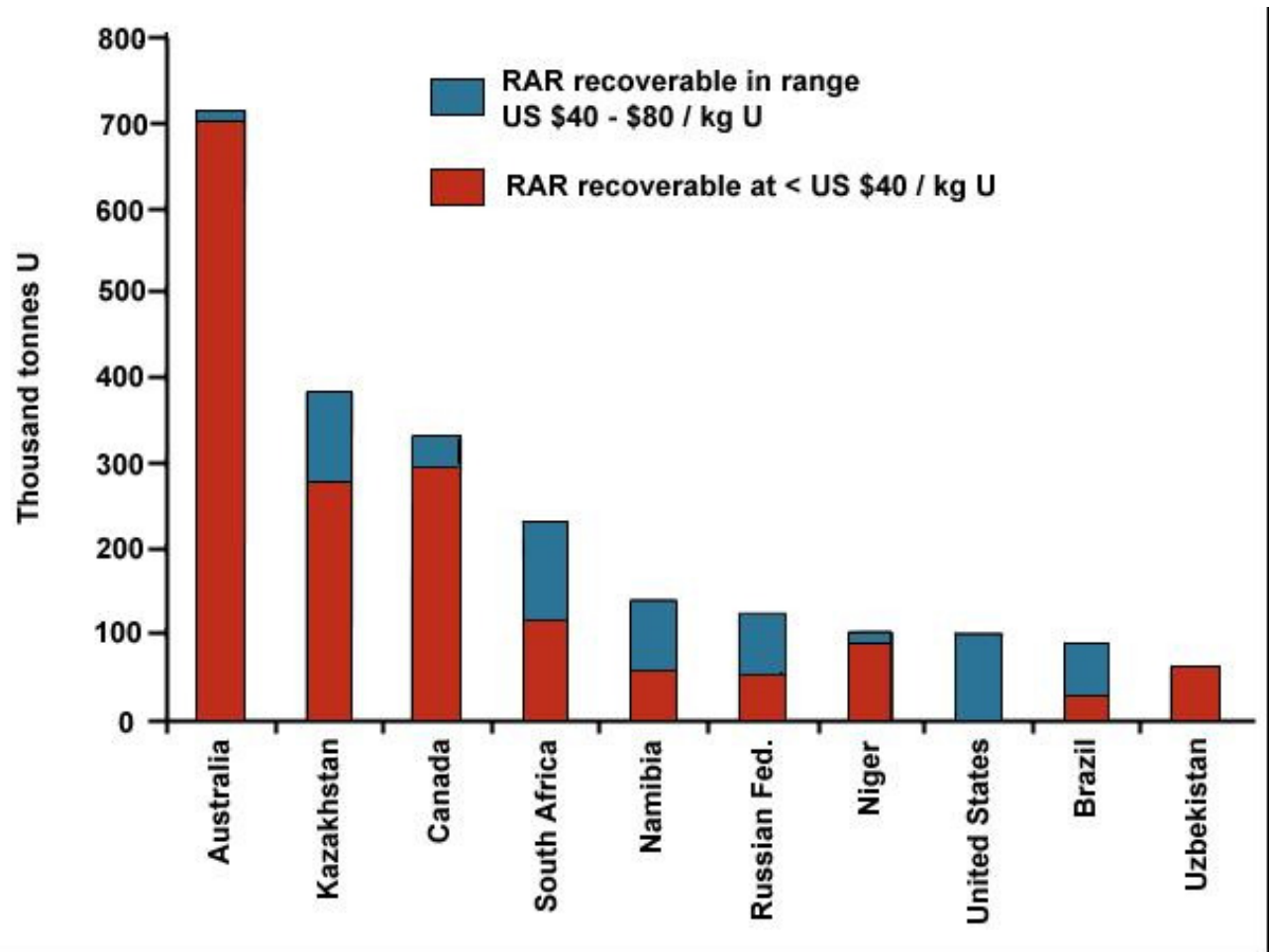
	Tonnes U	% of world
Australia	1,143,000	24%
Kazakhstan	816,000	17%
Canada	444,000	9%
USA	342,000	7%
South Africa	341,000	7%
Namibia	282,000	6%
Brazil	279,000	6%
Niger	225,000	5%
Russian Fed.	172,000	4%
Uzbekistan	116,000	2%
Ukraine	90,000	2%
Jordan	79,000	2%
India	67,000	1%
China	60,000	1%
Other	287,000	6%
World total	4,743,000	

Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen VI

Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources, to US\$ 80/kg U, 1/1/05,

from OECD NEA & IAEA, *Uranium 2005: Resources, Production and Demand* ("Red Book")

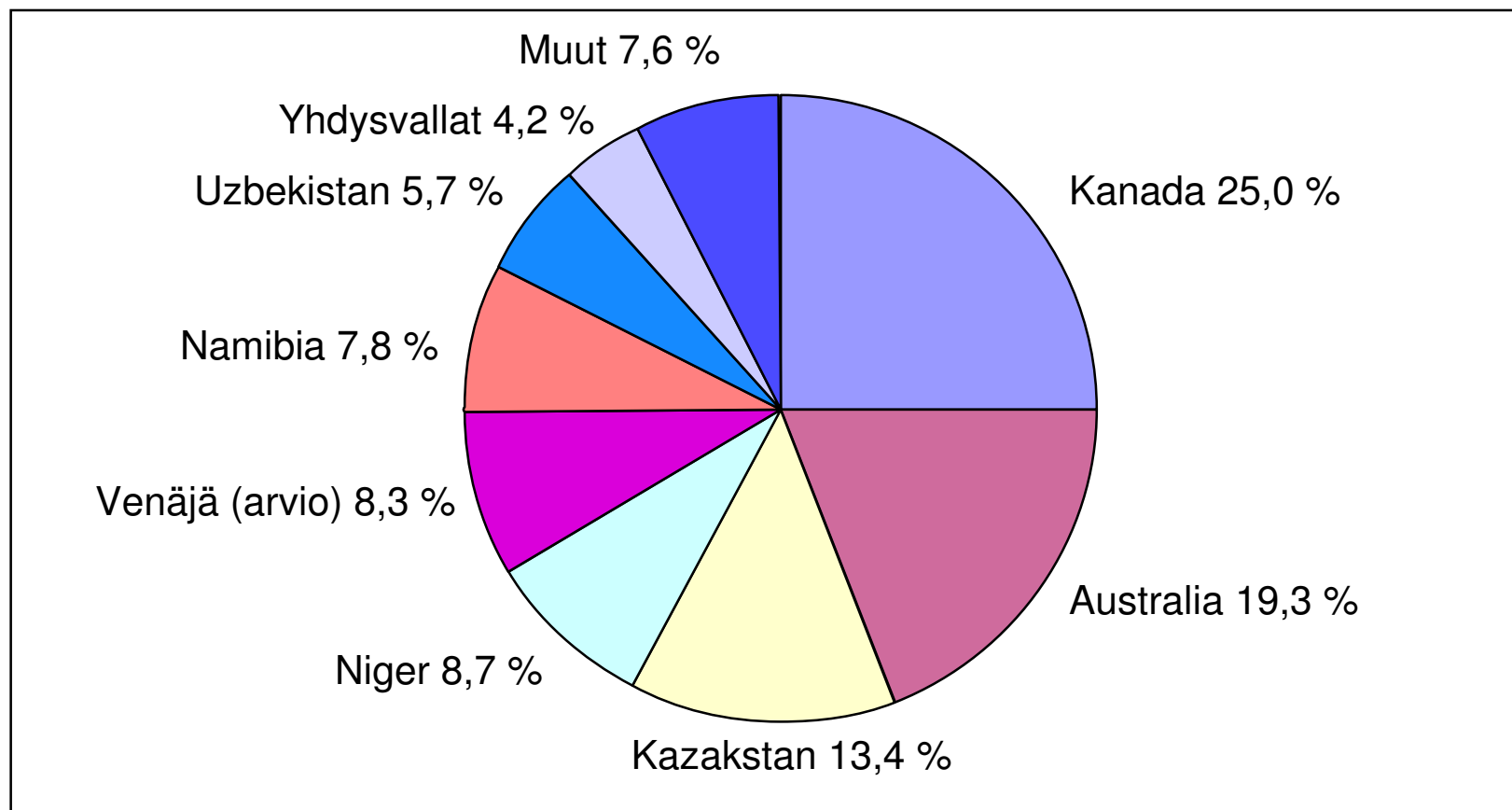
Uranium Information Centre Ltd., <http://www.uic.com.au/nip75.htm> (22.10.2007)



Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen VII

Uraanin tuotanto v. 2006 maittäin (yhteensä 39 429 tU)

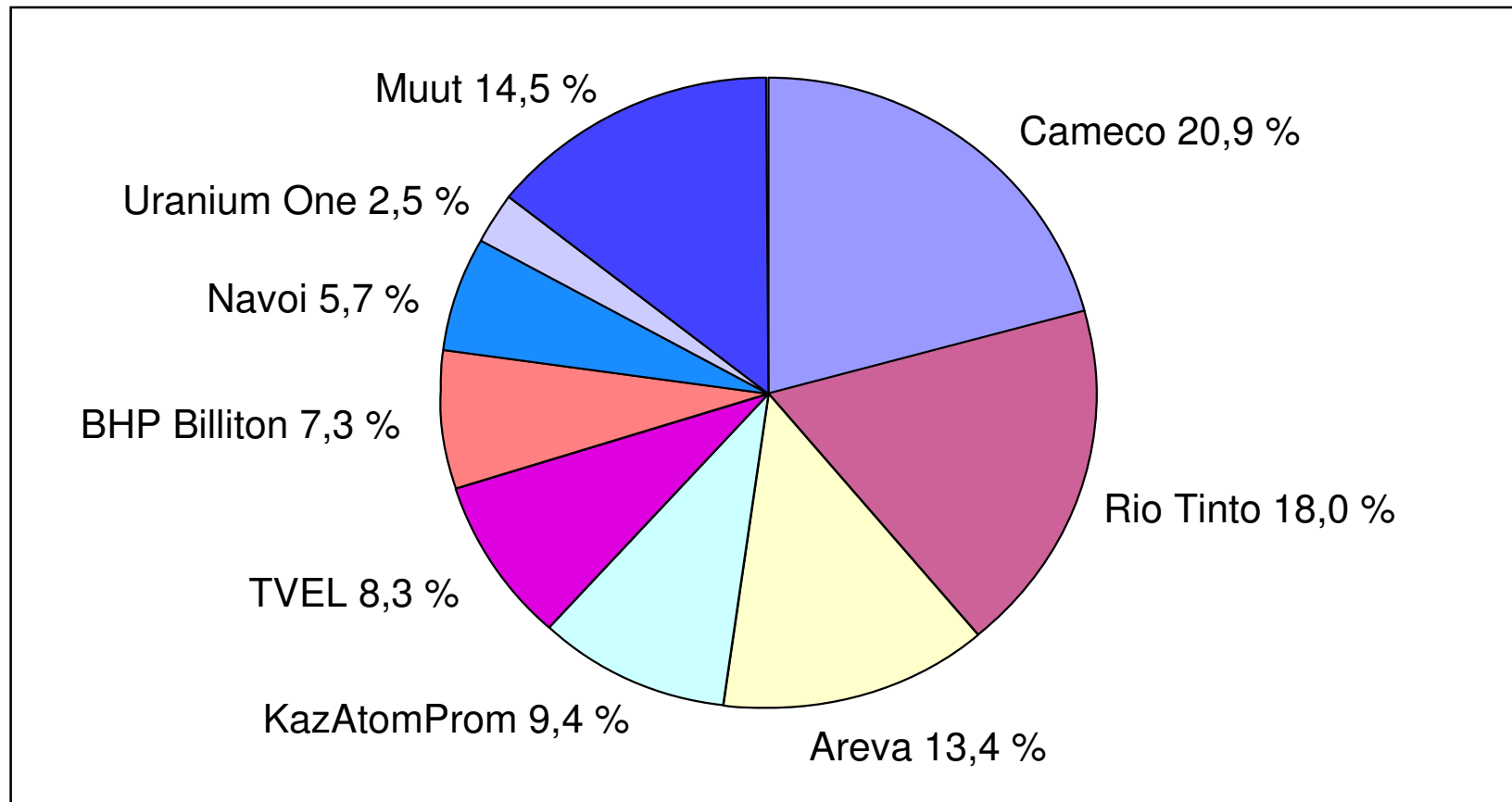
Lähde: World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>



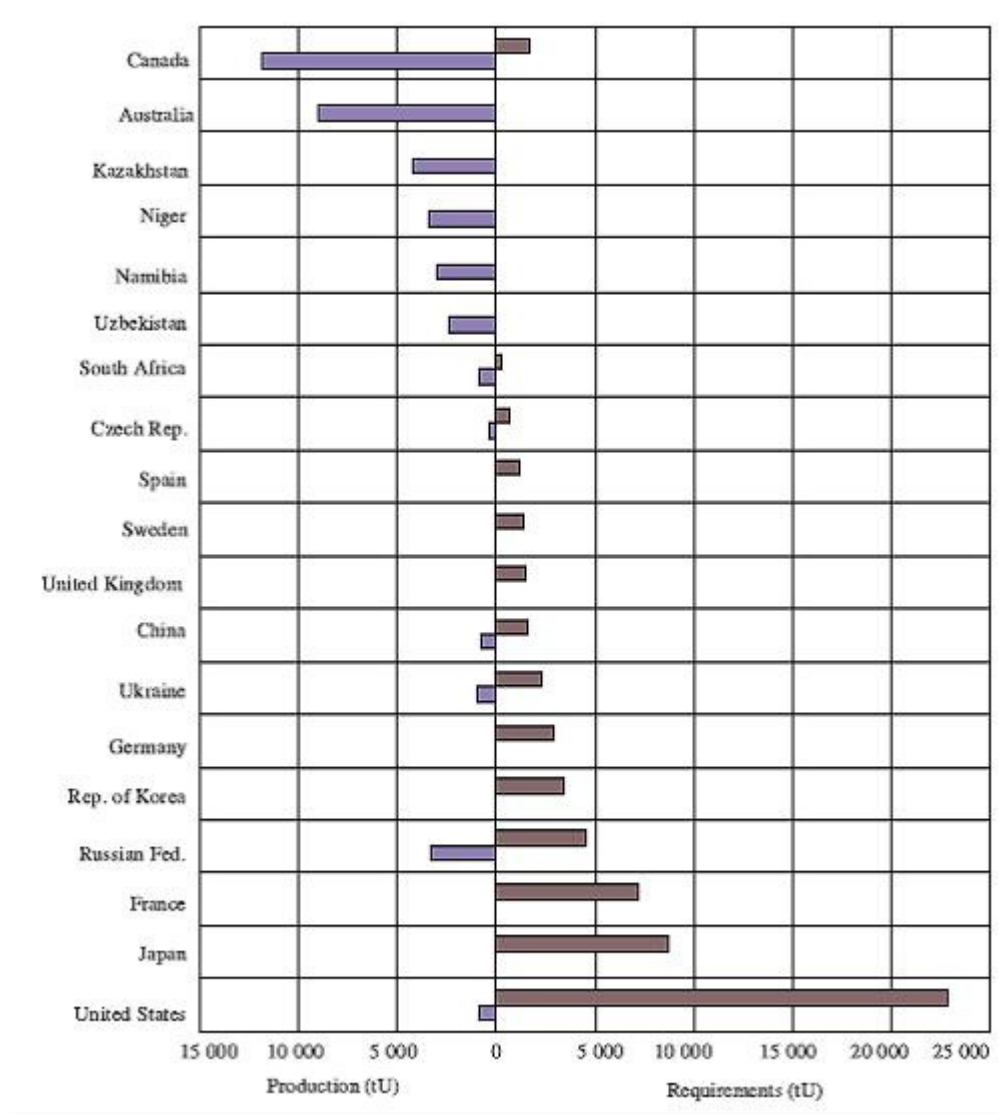
Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen VIII

Uraanin tuotanto v. 2006 yhtiöittäin (yhteensä 39 429 tU)

Lähde: World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>



Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen IX



Luonnonvarojen (uraanin) tehokas hyödyntäminen X

Uraanin kulutus eri polttoainekiertoissa (lähde: NEA. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. OECD 2006)

<u>Reaktorityyppi / polttoainekierto</u>	<u>Uraanin suhteellinen kulutus</u>
PWR / avoin uraanikierto	1
PWR / jälleenkäsittelyplutonium käytetään kerran MOX-polttoaineena	0,89
PWR / jälleenkäsittelyplutoniumia kierrätetään jatkuvasti	0,87
(Kaasujäähdytteinen) nopea reaktori / täydellinen aktinidikierto	0,004

Korkea-aktiivisen ydinjätteen määrän vähentäminen I

Keinot:

- Polttoaineen käytön tehostaminen
 - reaktorifysikaalinen ja virtaustekninen optimointi
 - poistopalaman korottaminen → pitempi varastointiaika ennen loppusijoitusta
 - vaikutus joitakin kymmeniä prosentteja
- Erotus- ja transmutaatiotekniikka (Partitioning and Transmutation, P&T)

Korkea-aktiivisen ydinjätteen määrän vähentäminen II

- Erotustekniikka = jälleenkäsittelytekniikka
 - käytetty ydinpolttoaine jaotellaan haluttuihin alkuaineryhmiin
 - kukin ryhmä jatkokäsitellään sille parhaiten soveltuvalla tavalla
 - käytetään transmutaatiolaitoksen polttoaineen valmistamiseen
 - varastoidaan (uraani)
 - varastoidaan, lasitetaan ja loppusijoitetaan korkea-aktiivisena ydinjätteenä
 - varastoidaan ja loppusijoitetaan (Cs, Sr)
 - varastoidaan ja käytetään polttoaineen valmistukseen (Cm)

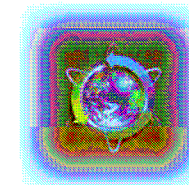
Lähde: James J. Laidler, D.Sc., Argonne National Laboratory, GNEP National Technical Director, Separations. Advanced Spent Fuel Processing Technologies for the Global Nuclear Energy Partnership. 9th IEM on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Nimes, France, 27 September 2006.

Suite of UREX+ Processes

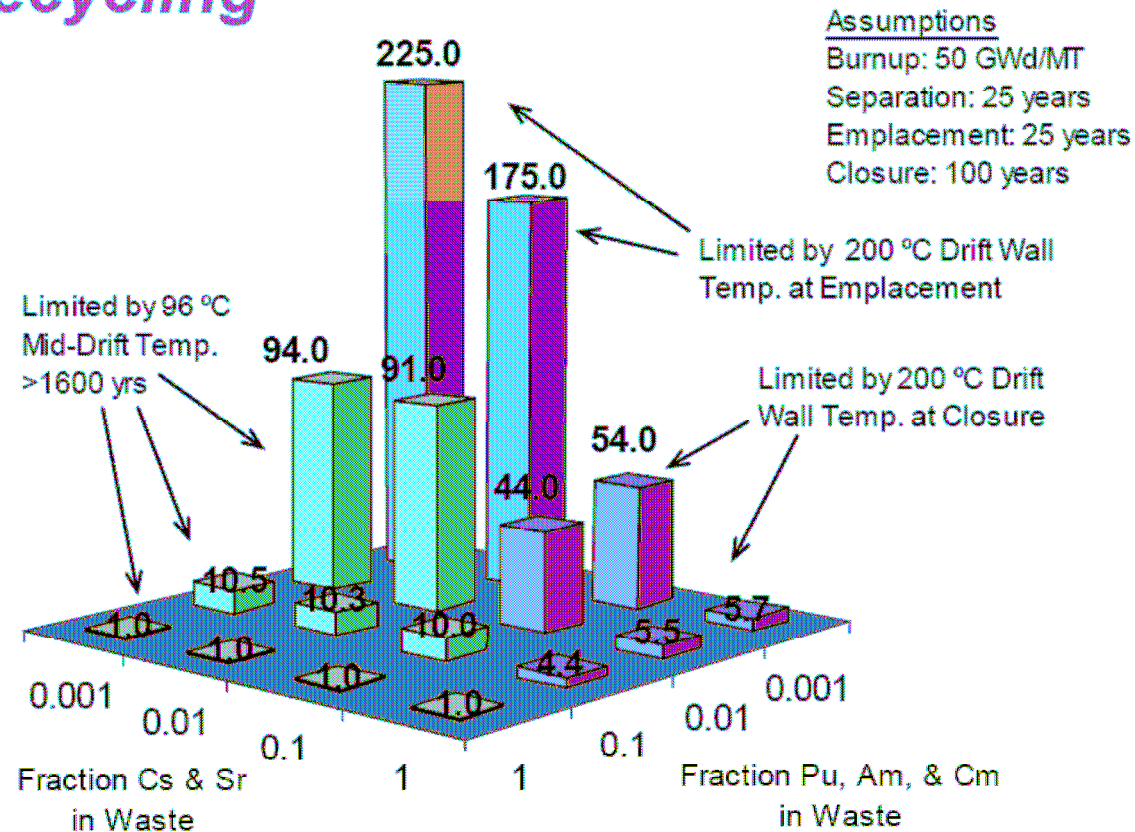
Process	Prod #1	Prod #2	Prod #3	Prod #4	Prod #5	Prod #6	Prod #7
UREX+1	U	Tc	Cs/Sr	TRU+Ln	FP		
UREX+1a	U	Tc	Cs/Sr	TRU	All FP		
UREX+2	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am+Cm+Ln	FP	
UREX+3	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am+Cm	All FP	
UREX+4	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am	Cm	All FP

Notes: (1) in all cases, iodine is removed as an off-gas from the dissolution process.
 (2) processes are designed for the generation of no liquid high-level wastes

U: uranium (removed in order to reduce the mass and volume of high-level waste)
 Tc: technetium (long-lived fission product, prime contributor to long-term dose at Yucca Mountain)
 Cs/Sr: cesium and strontium (primary short-term heat generators; repository impact)
 TRU: transuranic elements (Pu: plutonium, Np: neptunium, Am: americium, Cm: curium)
 Ln: lanthanide (rare earth) fission products
 FP: fission products other than cesium, strontium, technetium, iodine, and the lanthanides



Relative Increase in Repository Capacity by Recycling



Reference: R. A. Wigeland et al., Nuclear Technology, 154 (April 2006), pp 95-106.

Korkea-aktiivisen ydinjätteen määrän vähentäminen III

- Transmutaatiotekniikka
 - radioaktiivisen nuklidin (aktinidin) muuttaminen lyhytikäisemmäksi nuklidiksi (fission tuotteeksi)
 - fission tuotteiden transmutaatio ei ole riittävän tehokasta
- Transmutaatiolaitos
 - tavanomainen terminen tai nopea kriittinen reaktori
 - alikriittinen terminen tai nopea reaktori
 - neutronivuo pidetään yllä ulkoisen lähteen avulla (Accelerator-driven System, ADS)
 - termisillä vaihtoehdoilla ei voida käsitellä kaikkia sivuaktinideja (curium)

Korkea-aktiivisen ydinjätteen määrän vähentäminen IV

Nopeiden transmutaatiolaitosten vertailu (lähde: OECD/NEA Nuclear Development, Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. OECD 2002. 314p + Annexes.)

- Kriittinen ja alikriittinen nopea reaktori ovat suunnilleen yhtä hyviä aktinidien transmutaatiolaitoksia.
- ADS voi olla hyvä täydennys joissakin olosuhteissa tehokkaana sivuaktinidien (Np, Am, Cm) polttolaitoksena.

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyky ja fyysinen suojele (PR&PP) I

Lähtökohta:

- Ydinenergian rauhanomainen ja sotilaallinen hyväksikäyttö perustuvat osittain samaan osaamiseen ja tekniikkaan
 - kriittiset teknologiat: uraanin väkevöinti ja jälleenkäsittely
- Ydinreaktorit käyttävät ja tuottavat ydinmateriaaleja, jotka ovat erilaisia kuin ydinaseteollisuuden raaka-aineet, mutta joita voi käyttää ydinaseen valmistamiseen
 - reaktoriluokan plutonium
- Ydinreaktorit ja polttoainekiertolaitokset tuottavat ydinterrorismin (ns. likaisen pommin) raaka-aineita
- Ydinreaktoreita ja polttoainekiertolaitoksia voidaan käyttää sabotaasiin, kiristykseen yms.

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyky ja fyysinen suojele (PR&PP) II

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyvyn ja turvajärjestelyjen vertailusta useita kansallisia ja kansainvälisiä selvityksiä ja suosituksia viime vuosina:

U.S. Department of Energy, Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC 2000), Annex: Attributes of Proliferation Resistance for Civilian Nuclear Power Systems (TOPS-selvityksen liite).

International Atomic Energy Agency, Department of Safeguards (IAEA/DS 2002), Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems. IAEA/DS, Report STR-332.

U.S. Department of Energy (USDoE), Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC 2004), An Evaluation of the Proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuel with the Potential for Recycle in the United States.

The Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group of the Generation IV International Forum, Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems, revision 5, November 30, 2006, GIF/PRPPWG/2006/005.

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyky ja fyysinen suojele (PR&PP) III

Proliferaation vastustuskyvyn ja turvajärjestelyjen arviointiprosessi:

Uhkien ja niiden aiheuttajien luokittelu ja arviointi → Uhkien toteutumispolkujen ja niiden esteiden määrittely ja arviointi, mitoitusmuuttujien ja -yksiköiden määrittely → Tulos ja sen arviointi

Proliferaatioesteet (TOPS-selvitys)

1. Materiaaliset esteet

- isotooppikoostumus; kemiallinen koostumus; radioaktiiviset ominaisuudet / radiotoksisuus; määrä ja pitoisuus; havaittavuus

2. Tekniset esteet

- laitoksen houkuttelevuus; laitoksen saavutettavuus; kokonaisuudessa; väärinkäytön havaittavuus; laitoksen henkilökunnan ammattitaito ja osaaminen; aika

3. Hallinnolliset/institutionaaliset esteet

- safeguards-järjestelmä; pääsyn valvonta ja turvallisuus; sijainti

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyky ja fyysinen suojele (PR&PP) IV

Ydinpolttoainekiertojen proliferaation vastustuskyvyn vertailun ongelmia:

- sopivien laskentamuuttujien ja mittayksiköiden määrittely
- asekelpoisen fissiilin materiaalin vaikutuksen arviointi
- aikamuuttujan huomioonottaminen (esim. suora loppusijoitus)

Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys I

Kansainväliset tutkimusohjelmat:

GIF (Generation IV International Forum)

- kahdeksan valtiota ja Euratom aktiivisia jäseniä (Kiinan ja Venäjän liittyminen meneillään)
- neljä perustajavaltiota nyt ei-aktiivisia jäseniä
- neljä reaktorisysteemisopimusta (GFR, SFR, VHTR ja SCWR)
- yksi projektisopimus (SFR-polttoaine)
- Yhdysvaltain ja Ranskan presidentit v. 2006: GFN IV -demonstraatiolaitos käytössä 2020 - 2025

IAEA / INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles)

- alunperin Venäjän vastine GIF-yhteistyölle
- nyt 28 valtiota, myös Yhdysvallat, mukana
- vaihe II aloitettiin heinäkuussa 2006
- 14 tutkimusprojektia

Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys II

Kehittyneiden ydinpolttoainekiertojen t&k-toiminnan ja ydinaseiden leviämisen estämisyhtymien yhdistämiseksi useita aloitteita viime vuosina

Tärkein (?) Yhdysvaltain Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) -aloite

- julkistettiin 6.2.2006
- kansallisena tavoitteena kehittää neljännen sukupolven ydinreaktori ja sitä tukevat polttoainekiertolaitokset nopeutetusti (noin 15 vuodessa)
- kansainvälisenä tavoitteena estää ydinaseiden valmistuksessa tarvittavan teknologian leviäminen ja luoda tavoitetta tukevia teknisiä ratkaisuja ja järjestelyjä

Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys III

GNEP kansallisena projektina:

- kolme polttoainekiertolaitosta seuraavan 15 vuoden aikana
 - Advanced Burner Reactor (ABR) Prototype
 - natriumjäähdytteinen nopea transmutaatioreaktori
 - lähtökohtana aiemmat IFR- ja ALMR-konseptit (?)
 - Consolidated Fuel Treatment Center (CFTC)
 - (teollinen) jälleenkäsittelylaitos
 - (teollinen) transmutaatiopolttoaineen valmistuslaitos
 - Advanced Fuel Cycle Facility (AFCF)
 - polttoainekiertotekniikan t&k-keskus
 - ABR ja CFTC teollisuusvetoisia hankkeita; AFCF valtiollinen

Perusteelliset suunnitelmat, mutta rahoitus puuttuu

Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys IV

GNEP kansainvälisenä hankkeena:

- Ensimmäinen ministeritason kokous Washingtonissa 21.5.2007
 - Yhdysvallat, Japani, Kiina, Ranska ja Venäjä + IAEA
- Toinen ministeritason kokous Wienissä 16.9.2007
 - 38 valtion edustajia paikalla
 - 11 uutta jäsenvaltiota (mm. Australia ja Kazakstan)
- Etelä-Afrikka on julkisesti kieltäytynyt osallistumasta

Tulevaisuuden ydinpolttoainekiertojen tutkimus ja kehitys V

GNEP kansainvälisenä hankkeena:

Tavoite: Ydinenergian hyödyntämisen maailmanlaajuinen turvallinen laajentaminen

- valtiot jaetaan kahteen ryhmään: polttoaineen toimittajiin ja polttoaineen käyttäjiin
- vain toimittajavaltioissa väkevöinti- ja jälleenkäsittelylaitoksia
 - kansainväliset polttoainekeskukset (Venäjä aktiivinen)
- käyttäjävaltioille turvataan polttoaineen saanti
 - polttoainepankki; polttoaineen vuokraus
- käyttäjävaltioille proliferaation vastustuskyvyltään parannettuja reaktoreita
 - modulaarisia reaktoreita, kasettisydän (?)
- IAEA:n safeguards-järjestelmää tehostetaan

Nopeat reaktorit vuonna 2007 I

Huom: Kaikki yksiköt natriumjähdytteisiä nopeita reaktoreita, jollei muuta todeta

Etelä-Korea

- KALIMER-600
 - perussuunnittelu päättyi helmikuussa 2007
 - 1 500 MWth / 600 MWe, metallinen polttoaine
 - hyötösuhde 1

Intia

- Fast Breeder Test Reactor (FBTR)
 - 17 MWth
 - kriittisyys 1985
- Prototype Fast Breeder Reactor (PFBR)
 - 500 MWe
 - rakenteilla (Kalpakkam); käyttöönotto 2010
 - neljä vastaavaa yksikköä vuoden 2020 tavoitteena

Nopeat reaktorit vuonna 2007 II

Japani

- JOYO
 - kriittisyys 1977
 - 140 MWth (lokakuusta 2003 alkaen)
 - polttoaine- ja rakennemateriaalien testauslaitos
- MONJU
 - 714 MWth / 280 MWe
 - kriittisyys 1994
 - natriumvuoto joulukuussa 1995
 - uudelleenkäynnistys koe- ja testauslaitoksena 2008 (?)
- Fast Reactor Cycle Technology Development Project
 - kesällä 2007 sopimus JAEA:n ja Mitsubishi Heavy Industries -yhtiön välillä
 - demonstraatiolaitos 2025 (kaupallinen käyttö 2050)

Nopeat reaktorit vuonna 2007 III

Kiina

- China Experimental Fast Reactor (CEFR)
 - 65 MWth / 25 MWe
 - rakenteilla; kriittisyys kesällä 2009; verkkoon 2010
- Prototype Fast Reactor
 - 600 MWe; suunnitteilla

Nopeat reaktorit vuonna 2007 IV

Ranska

- Phenix
 - 250 MWe
 - käytössä vuodesta 1973; suljetaan 2009 (polttoaine loppuu)
 - materiaalitutkimuslaitos
- Gen IV demonstration reactor
 - presidentti Chiracin asettama tavoite: käytössä vuonna 2020 → SFR
- Experimental Test and Demonstration Reactor
 - 20 – 50 MWth
 - **olisi ensimmäinen kaasujäähdytteinen nopea reaktori**

Nopeat reaktorit vuonna 2007 V

Venäjä

- Bor-60
 - käytössä vuodesta 1969; käyttö jatkunee vuoteen 2015
- BN-600
 - kriittisyys 1980
 - 600 (560) MWe
- BN-800
 - rakenteilla; käyttöön vuonna 2012 (?)
- BREST-300
 - lyijyjäähdytteinen

Yhdysvallat

- Advanced Burner Reactor (ABR) Prototype
 - perussuunnittelu valmis kesällä 2009
 - lopullinen turvallisuusarvio keväällä 2015
 - rakennuslupa kesällä 2017; valmis kesällä 2023

Johtopäätöksiä

Lähitulevaisuudessa (vuoteen 2050 mennessä) pääasiassa kevytvesireaktoreita

- lähinnä uraani- ja jonkin verran MOX-polttoainetta
- käytetty polttoaine varastoidaan
- joissakin maissa aloitetaan käytetyn polttoaineen ja korkea-aktiivisen jälleenkäsittelyjätteen geologinen loppusijoitus

Joitakin natriumjähdytteisiä nopeita reaktoreita rakennetaan vuoteen 2020 - 2025 mennessä

- lähinnä koe- tai prototyyppilaitoksia
- oksidi- tai metallipolttoaine
- jälleenkäsittelytekniikkaa tutkitaan; ehkä muutama pienehkö demolaitos
- käyttökokemusten perusteella päätös nopeiden reaktorien kaupallisesta rakentamisohjelmasta 2030 - 2050

Korkealämpötilareaktorit (VHTR, GFR)

- koelaitoksia rakennetaan seuraavan 10 - 15 vuoden aikana