

RADIOAKTIVNI OTPAD (GZO09)

Dr.sc. Igor Felja

Predavanja iz kolegija Geologija zaštite okoliša
(44087)

RADIOAKTIVNI OTPAD

- Posebna kategorija industrijskog ili opasnog otpada o kojoj se puno govori jest **radioaktivni otpad**.
- Nastaje prilikom rudarenja, pripreme goriva, *reprocessinga*, a otpad su i otpaci nastali u postrojenjima te, posebno važno, **istrošeno gorivo**.
- Osim u nuklearnoj energetici radioaktivni otpaci nastaju i u medicini, pri istraživanjima, ali i u industriji (ne zaboraviti i vojsku!).

RADIOAKTIVNI OTPAD

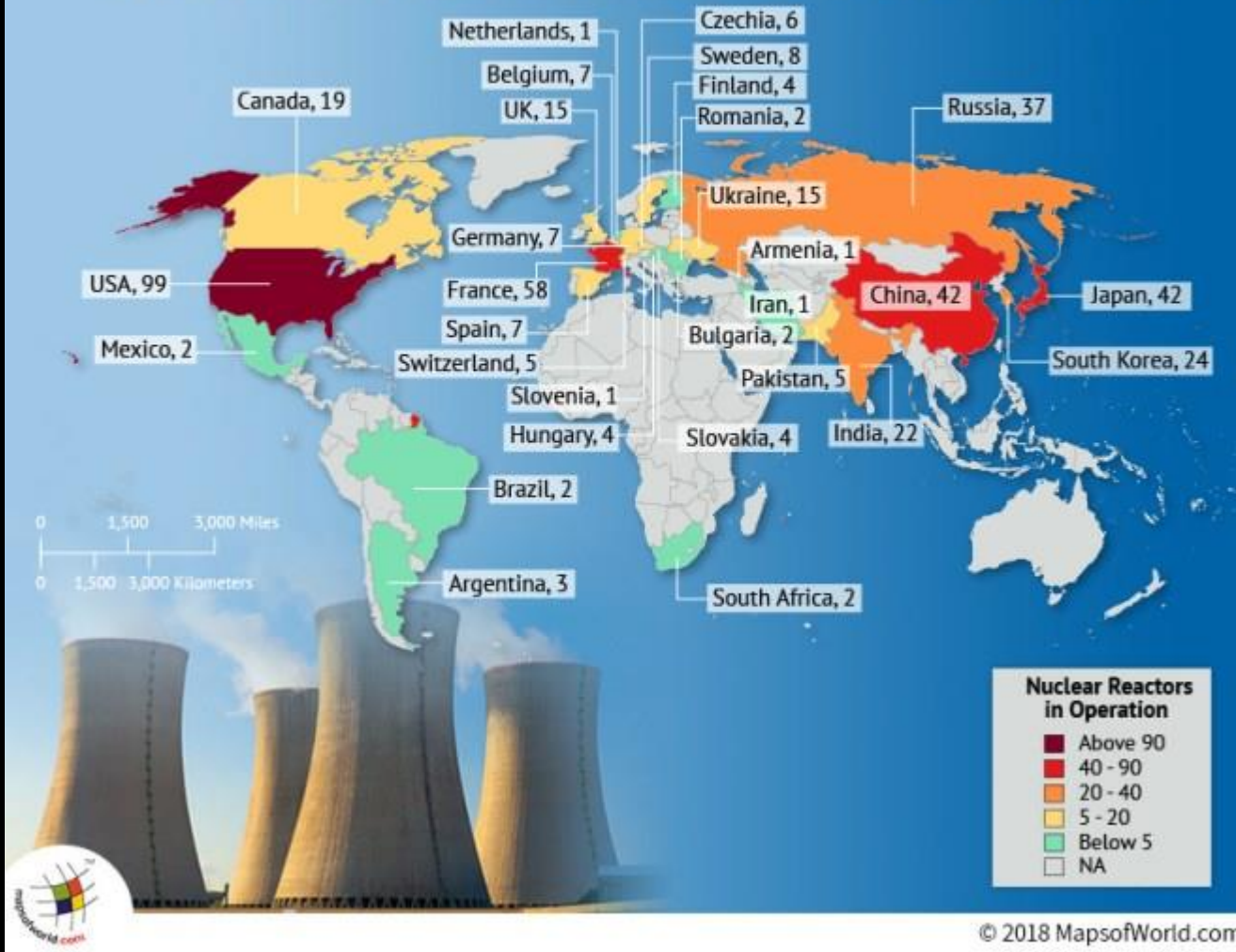
- produkt proizvodnje nuklearne energije (rudarenje, proizvodnja i obrade goriva)
- otpad u istraživanjima, bolnicama, vojsci...
- Prema **Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju**:
 - „bilo koji materijal koji sadrži ili je onečišćen radionuklidima u koncentracijama ili pri razini radioaktivnosti većoj od one minimalne dozvoljene od strane nadležnih tijela i za koji ne postoji nikakva predviđena upotreba”
- **najveći proizvođač(?)**
- nuklearne elektrane (NE)
- pr.: prosječna proizvodnja NE od 1000 MW: 100 t nuklearnog goriva u 3 godine
- nuklearno gorivo...(?)
- ...uranij obogaćen ^{235}U ; dobiva se iz uranijeve rudače
- 100 t nuklearnog goriva ima radioaktivnost 10^{12} Bq
- u reaktorima se goriva dodatno obogaćuju aktivnijim radionuklidima
- radioaktivnost „potrošenog” goriva je veća od ulaznog: 10^{21} Bq

NUKLEARNE ELEKTRANE

- Važno je znati da je u više od 1500 eksplozija (pokusnih) nuklearnog oružja od 1945. do 1985. bilo ispušteno u okoliš sveukupne radioaktivnosti oko 20 puta više od radioaktivnosti koju sadrže nuklearne elektrane!
- Na sreću, od trenutka vađenja nuklearnog goriva iz reaktora (ili kod prestanka rada reaktora), radioaktivnost mu se smanji nekoliko puta već prvog dana!, te više od 100 puta u prvoj godini. I još oko 20 puta u slijedećih 100 godina.

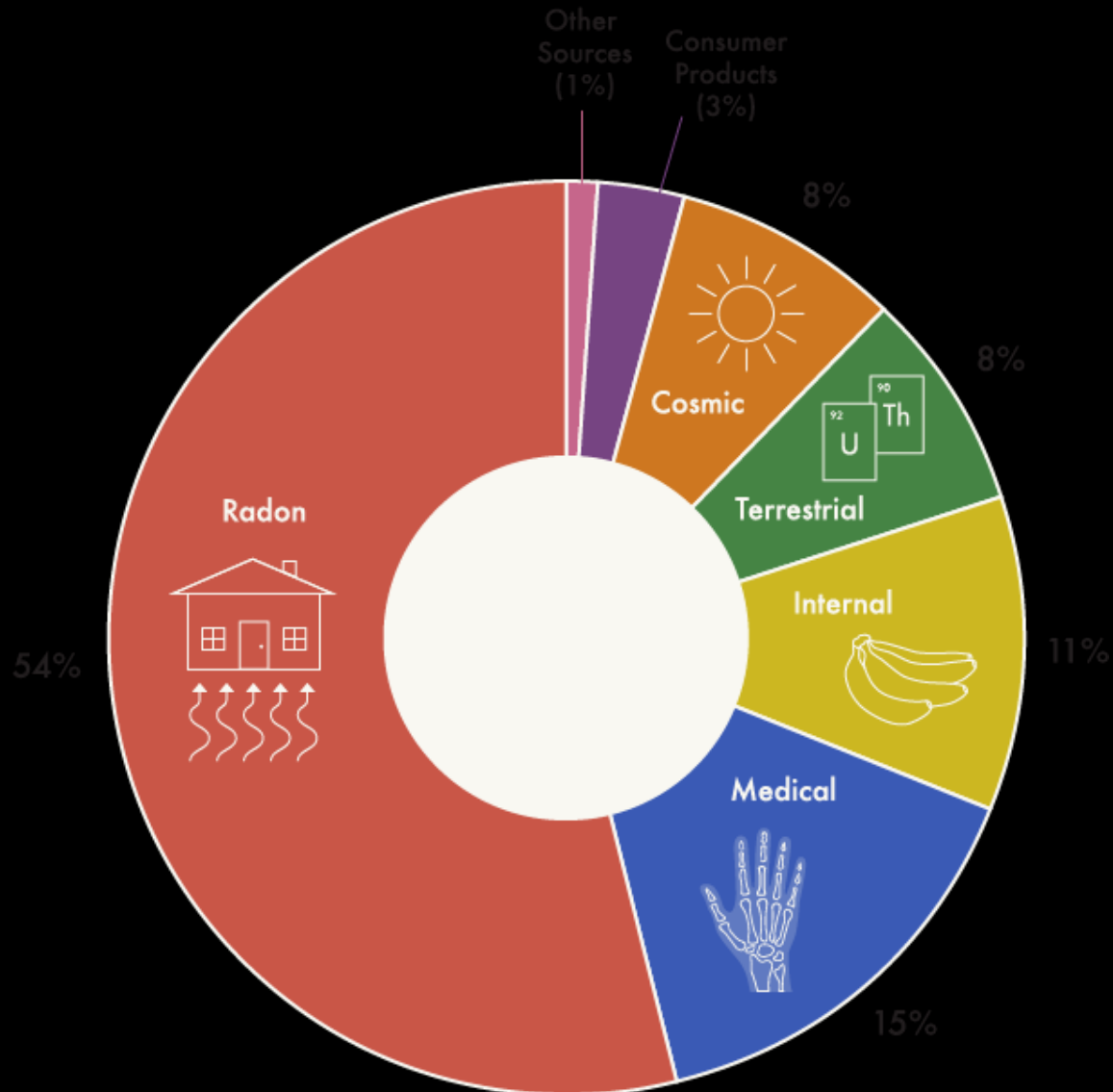
Nuklearni reaktori u svijetu

COUNTRIES WITH THE MOST NUCLEAR REACTORS IN OPERATION



POZADINSKO ZRAČENJE

- Pozadinsko zračenje – svaki čovjek prima određenu količinu zračenja
- U prosjeku 2-4mSv na godinu



Radiation exposure How does it compare?

Exposure measured in mSv

10,000
Fatal within weeks

6,000
Typical dosage recorded in those Chernobyl workers who died within a month

5,000
Single dose which would kill half of those exposed to it within a month

1,000
Single dose which could cause radiation sickness, nausea, but not death

400
Max radiation levels recorded at Fukushima plant 14 March, per hour

350
Exposure of Chernobyl residents who were relocated

100
Recommended limit for radiation workers every five years

10
Dose in full-body CT scan

9
Airline crew NYC -Tokyo polar route, annual

2
Natural radiation we're all exposed to, per year

1.02
Radiation per hour detected Fukushima site, 12 March

0.4
Mammogram breast x-ray

0.1
Chest x-ray

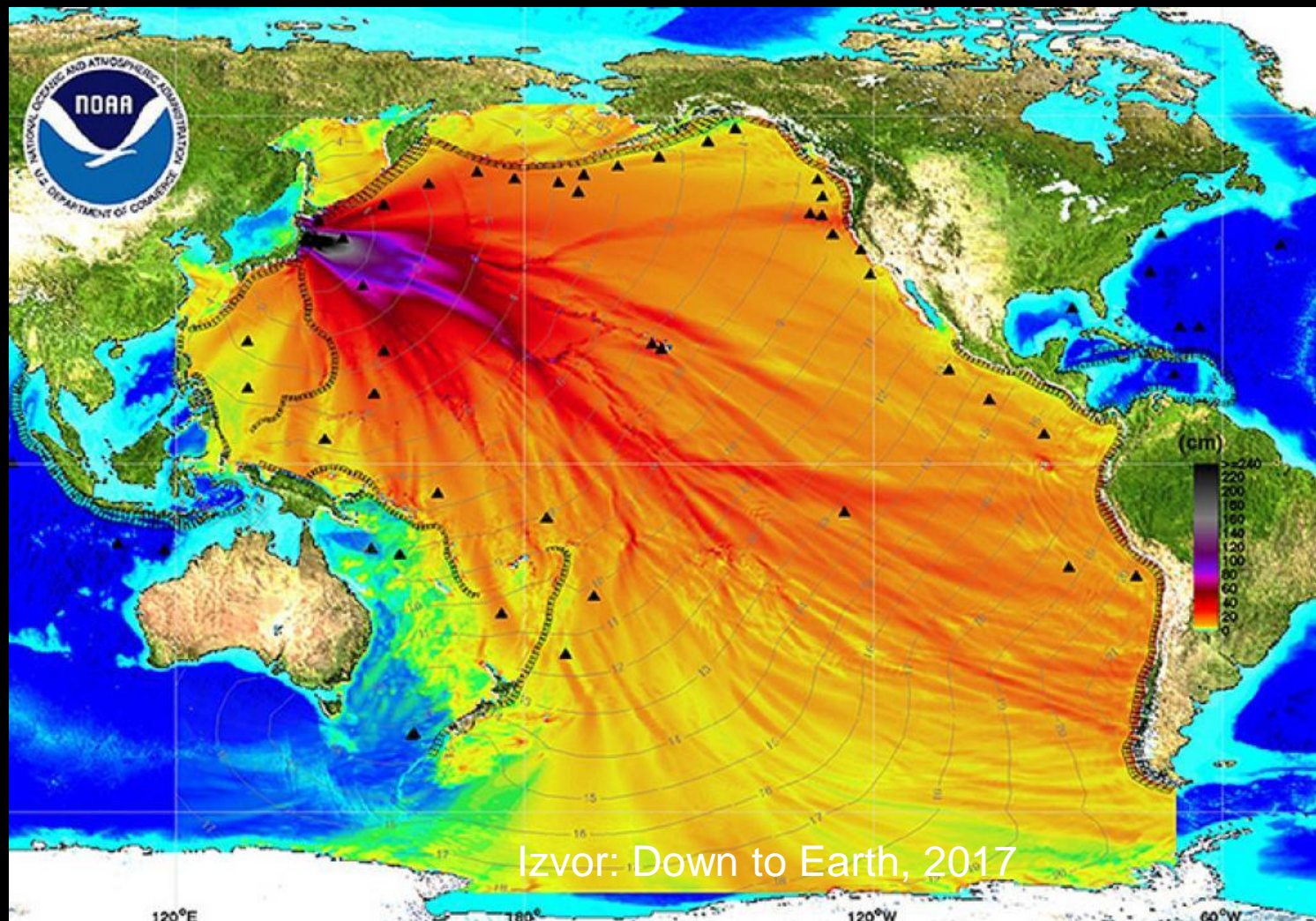
0.01
Dental x-ray

SOURCE: WNA, RADIOLOGYINFO.ORG, REUTERS

RADIOAKTIVNI OTPAD

- **kraj 20. st:**
- **radioaktivnost svih NE na Zemlji** bila je oko 10 x viša od ukupne radioaktivnosti oceana i oko 1/100 radioaktivnosti zemljine kore
- **do 1990.** bilo je preko 2000 nuklearnih pokusa u svijetu; mnogi jači od bombe u Hirošimi 1945.
- **2004.** – 440 NE u 31 zemlji; 17% potreba el. energije
- **2050.** – do 50% (želja)
- problem nesreća u NE (Černobil, Otok 3 milje)
- **Fukushima, Japan, 11.03.2011.**
- domino efekt
- podmorski potres (nije ošteti NE)
- tsunami – potopljeni spremnici goriva i dizelske agregati za proizvodnju el. energije u slučaju nesreće
- neadekvatno hlađenje; nizovi eksplozija
- u ocean ispušteno 27,5 PBq (10^{15} Bq) ^{137}Cs (8,4 kg Cs)
- najveće zagađenje mora radionuklidima ikad

POSLEDICE DOMINO EFEKTA (POTRES, TSUNAMI I OŠTEĆENJE U FUKUSHIMI)



RADIOAKTIVNI OTPAD

- RAO se dijeli na:
 - **1. Visokoradioaktivni – V-RAO**
 - 3% volumena, ali 95% emisije
 - gorivo iz NE
 - ispušta puno topline i mora biti hlađen prije skladištenja
 - mora biti potpuno uklonjen iz okoliša
 - godišnje proizvodnja oko 10 000m³
 - opasan do narednih 500 000 godina
 - velik rizik za okoliš
 - **2. Srednje radioaktivni – S-RAO**
 - 7% volumena, 4% emisije
 - tekući RAO
 - opasan 30 – x 100 godina
 - zatvara se u nepropusne spremnike sve dok postoji emisija
 - **3. Niskoradioaktivni – N-RAO**
 - 90% volumena, 1% emisije
 - obuća, oprema i sl., iz NE, bolnica itd.
 - malo se razlikuje od prirodnih doza zračenja
 - **4. Vrlo niskoradioaktivni (VN-RAO)**
 - građevinski otpad iz NE

RADIOAKTIVNI OTPAD

- **VRAO** (HLW - *high level waste*) je istrošeno gorivo koje se može reprocessirati (La Hague, F; Windscale/Selafiel, UK).
- Sadrži visoke koncentracije dugoživućih izotopa i alfa emitera (>4 gBq/toni tj. 4000 Bq/g) i razvija velike količine topline (toplinska snaga mu je veća od 2 kW/m³).
- Opasan je tisuće godina (100.000-500.000 godina) te je veliki rizik za okoliš!
- VRAO je potrebno kompletno ukloniti iz okoliša (mora biti nedostupan biosferi).
- Relativno male količine, a pravi način trajnog odlaganja nije još riješen.
- Za sada se nalazi u privremenim aktivno hlađenim skladištima/odlagalištima.
- Godišnje u nuklearnim elektranama cijelog svijeta nastaje oko 10 000 m³.
- U državnim skladištima ima i oko 400 000 m³ VRAO nastalog u proizvodnji nuklearnog oružja!

RADIOAKTIVNI OTPAD

- **NRAO** (LLW - *low level waste*) su ostali radioaktivni tekući i kruti otpaci koji su radioaktivni nekoliko stotina godina i potom nestaje opasnost za okoliš.
- Ne sadrže alfa emitere, a stvaraju se u znatno većim količinama.
- Postoji i međukategorija **SRAO** (ILW Intermediate Level Waste).

RADIOAKTIVNI OTPAD

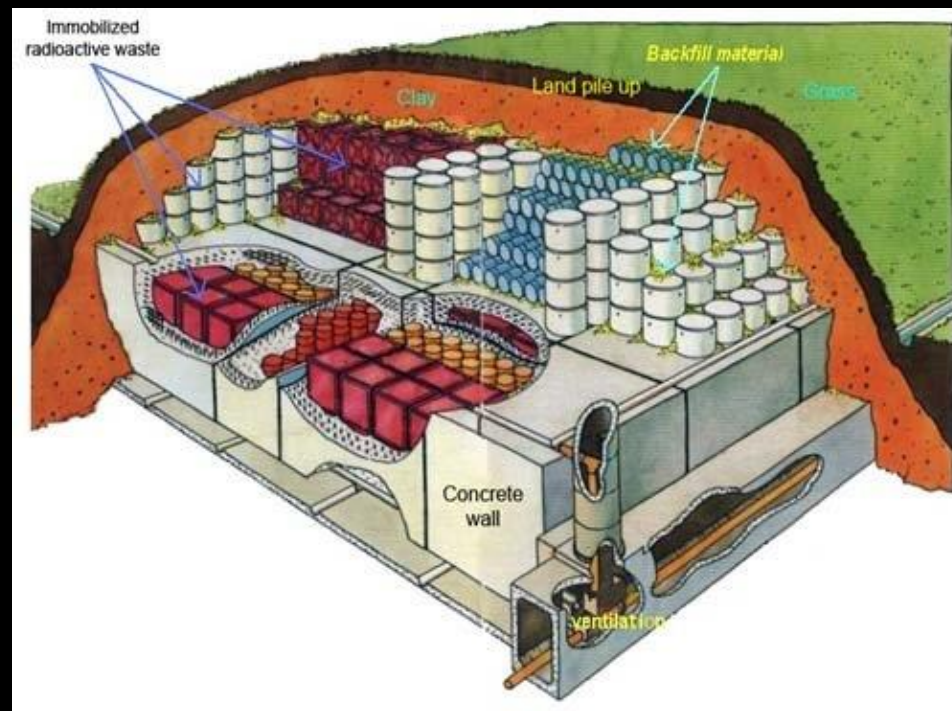
- Postoji i podjela na kratkovječni i dugovječni otpad.
- Postoji i kategorija **izuzetog otpada** koji je bio, a više nije radioaktivan ($< 10^7$ Bq/m³ alfa emitera) te se može odlagati bez radioloških ograničenja.
- Za dugovječni srednje radioaktivni otpad predviđa se odlaganje jednako kao i za VRAO.

RADIOAKTIVNI OTPAD - SKLADIŠTENJE

- 2 koncepta skladištenja:
 - **1. na jednom mjestu** (uglavnom primjenjivo)
 - **princip skladištenja na jednom mjestu:**
 - **Potpuna izolacija**
 - uglavnom za VRAO
 - nema mogućnosti vađenja, reprocesiranja, i sl.
 - **Aktivno ograđivanje**
 - odlaganje u objekte; omogućen pristup, nadzor, ali i (zlo)upotreba
 - **2. raspršivanjem na većem području** - *dilution is solution for pollution* (napušta se ta koncepcija)
 - do polovice 1970-ih se tekući RAO raspršivao u rijeke, PV...!
 - danas manje količine završavaju u prirodnim vodama

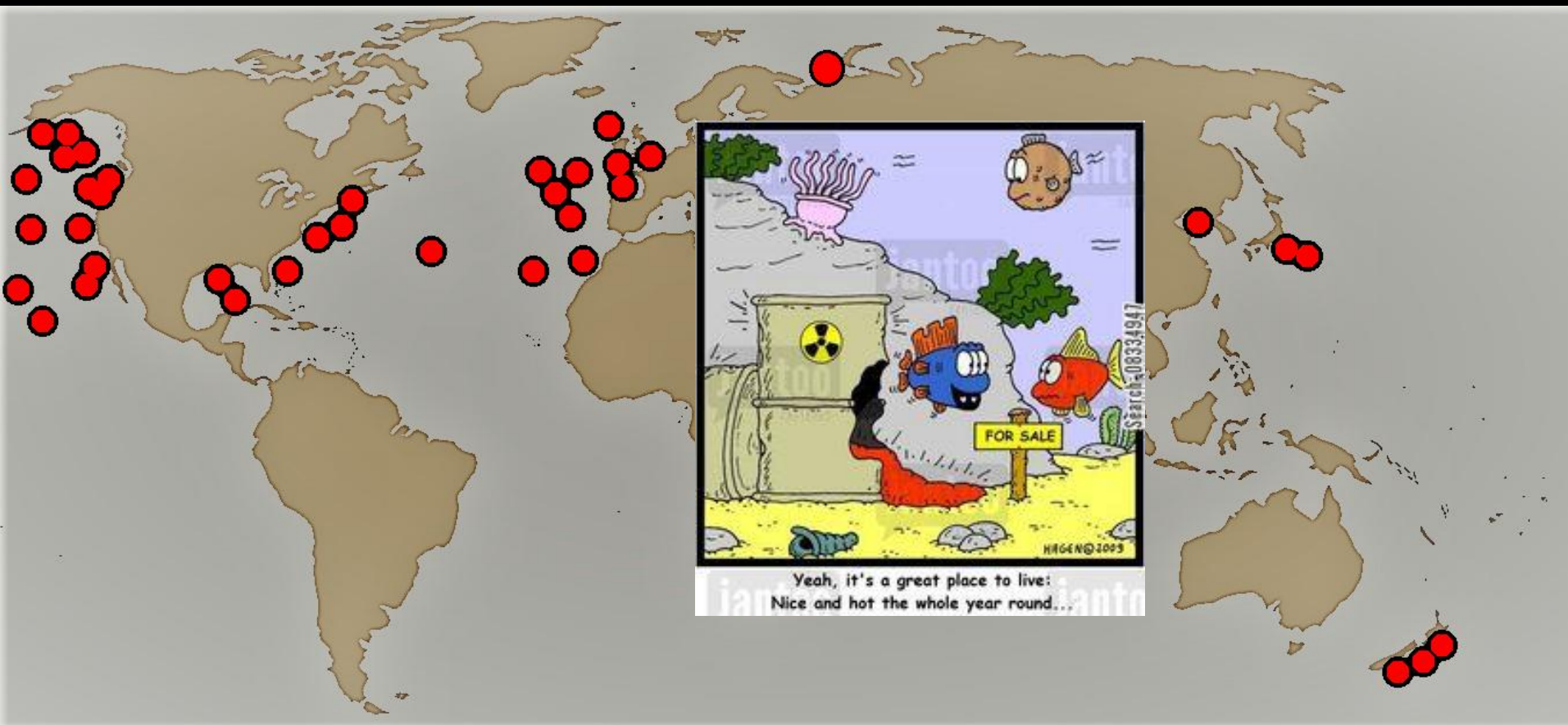
ODLAGANJE NRAO I SRAO

- tekući otpad se **očvršćava**
- **pakira** i brtvi (inertne bačve)
- **cementira** u čvrsti matriks i **odlaže**
- 1980-ih. - odlaganje na morsko dno
- ...oko 100 000 t na dubinama 4-5 km



Koncept odlaganja N-RAO i S-RAO (Poernomo, 2010)

LOKACIJE ODLAGANJA RAO U OCEANIMA

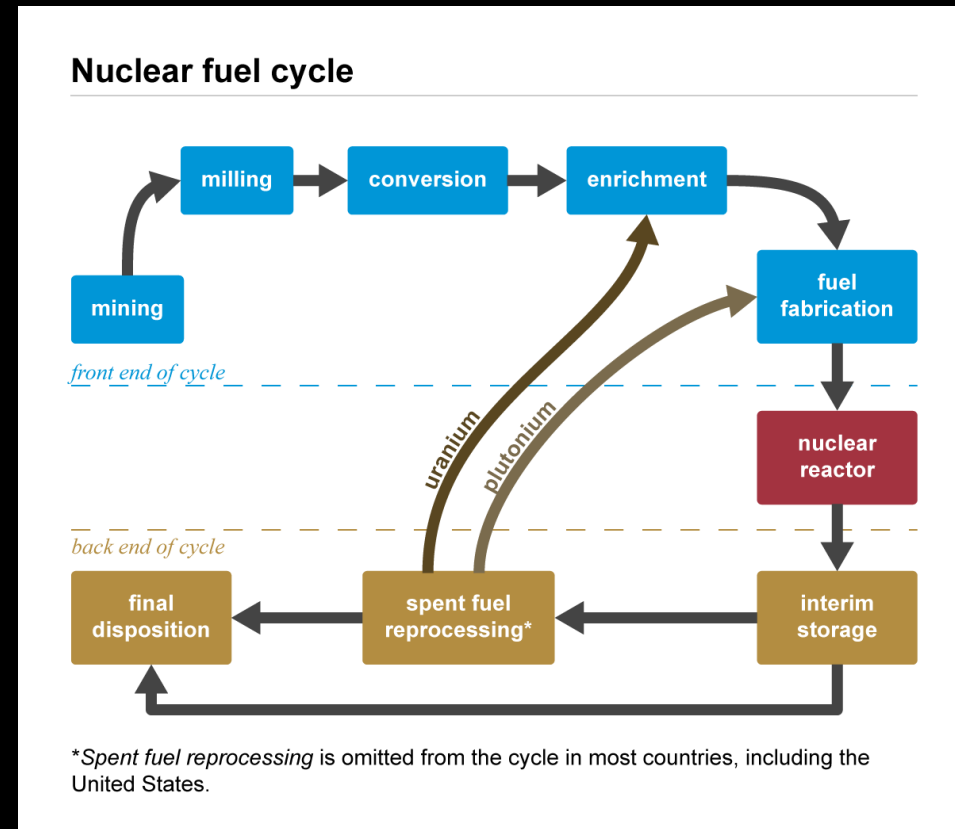


ODLAGANJE NRAO I SRAO

- Odlaganje danas:
- **1 - plitko odlaganje** – u konstruiranim odlagalištima
- predispozicije odlagališta: glinoviti materijal, ravni tereni, niska razina PV
- **2 - poluduboko odlaganje** – u izbušene šupljine (tuneli) ili prirodne šupljine (napušteni suhi rudnici)
- vrste stijena: soli, šejlovi, graniti
- općenito se teži skladištenju blizu mjesta nastanka otpada

ODLAGANJE VRAO

- osim radioaktivnog materijala sadrži i značajne koncentracije teških metala
- većina VRAO u svijetu se skladišti blizu NE
- postupak VRAO goriva prije skladištenja:
 1. **hlađenje** – produljuje vrijeme skladištenja
 2. **reprocesiranje** (kemijsko izdvajanje plutonija... koji se također hladi i kasnije koristi kao gorivo)
 3. **odlaganje izoliranjem**
- **Kuda „sigurno” odložiti VRAO?**



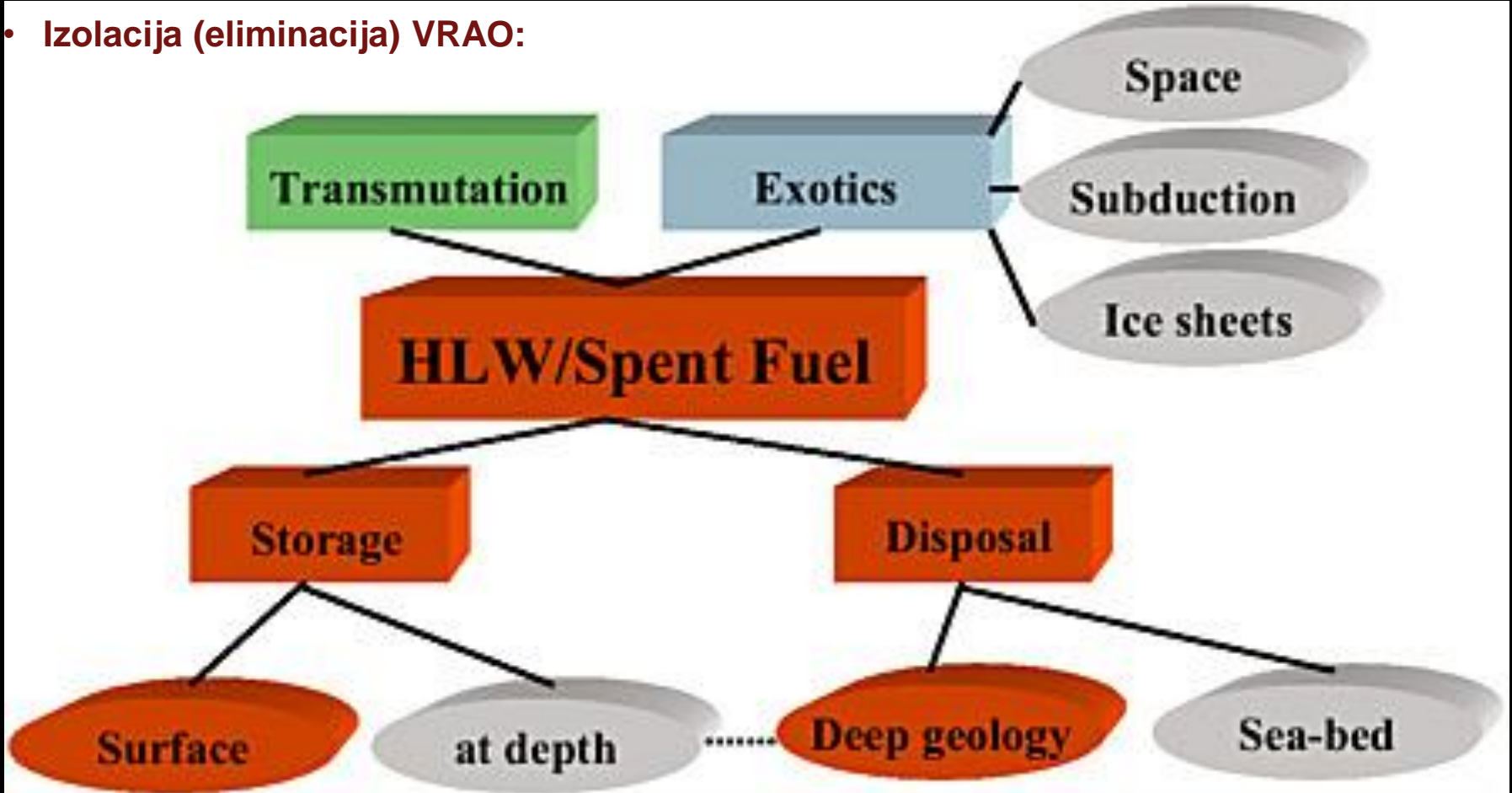
Ciklus nuklearnog goriva od eksploatacije preko korištenja do odlaganja (www.eia.gov)

ODLAGANJE VRAO

- nužna obrada VRAO prije odlaganja s glavnom idejom **izolacije i imobilizacije**
- **nije moguće 100%**
- **Imobilizacija VRAO:**
 - **1. Ekstrakcija i koncentracija** – taloženje iz tekućina, pretvaranje u prah, zbijanje, spaljivanje
 - **2. Fiksacija** – u inertni materijal
 - pr. nastanak radioaktivnog stakla
 - **3. Zatvaranje** – inkapsulacija u višeslojne spremnike inertnih materijala (olovo, čelik)
 - **4. Puferiranje** – polaganje kapsula u materijale s visokim stupnjem adsorpcije radi usporavanja prodora

ODLAGANJE VRAO

- Izolacija (eliminacija) VRAO:



ODLAGANJE VRAO

- **Izolacija (eliminacija) VRAO:**

- **1. Raketama u svemir (prema Suncu)**

- opasnost od teškoća pri polijetanju i vraćanja na Zemlju
- cijena lansiranja?

- **2. U zone subdukcije**

- rizik od potresa, vulkanskih erupcija i oslobađanja topline
- sporo ugrađivanje u koru
- preblizu naseljenom kopnu

- **3. U ledeni pokrov**

- dugotrajan i kompliciran transport osjetljivog materijala
- internacionalna autorizacija (?)
- a što ako (kad) se led otopi?

- **4. Na i pod morsko dno**

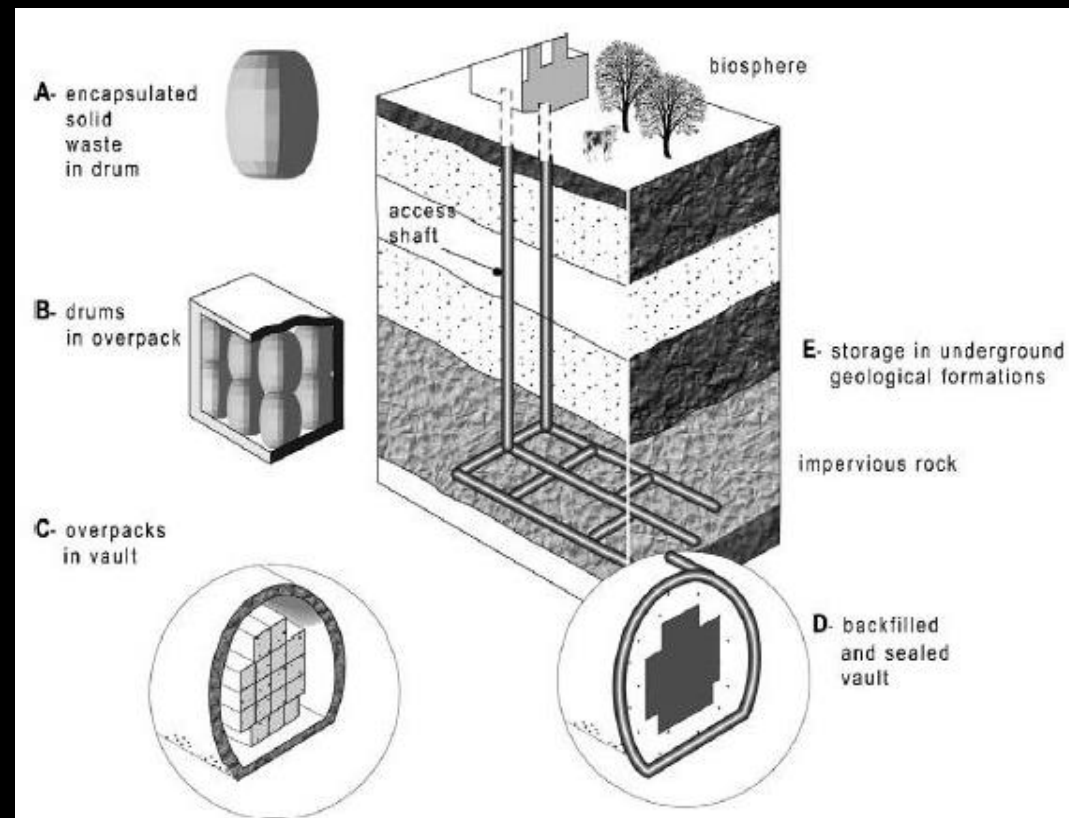
- tehnika odlaganja(?)
- cijena potencijalne štete u okolišu
- legislativa (UN Kovencija u pravu mora)

- **5. Odlaganje u duboke šupljine u stijenama**

- danas preferiran prijedlog načina odlaganja

ODLAGANJE VRAO U DUBOKE ŠUPLJINE

- dubine 300-1500 m
- bez PV
- seizmički i vulkanski izolirana područja
- ispitivanje lokacija dubokih geoloških mjesta odlaganja:
- dva u Njemačkoj i jedno u USA u evaporitima
- u Belgiji i Italiji u glinama i šejlovima
- u Švedskoj, Finskoj i Kanadi u metamorfitima i intruzivima

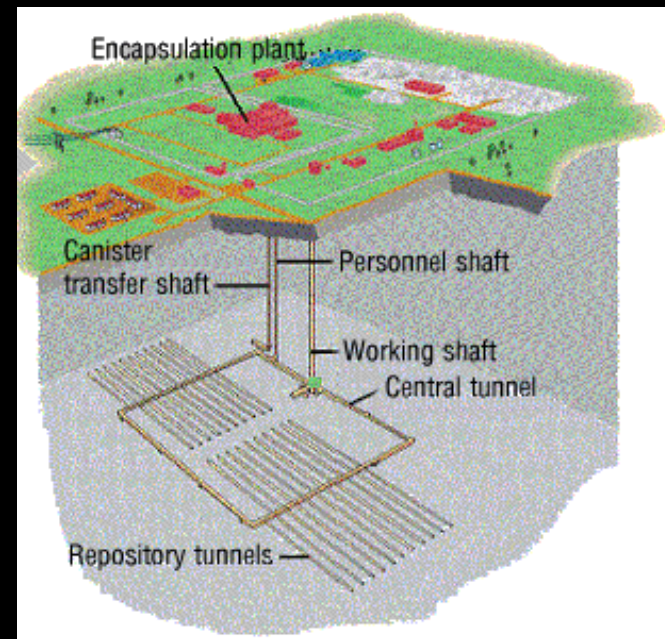
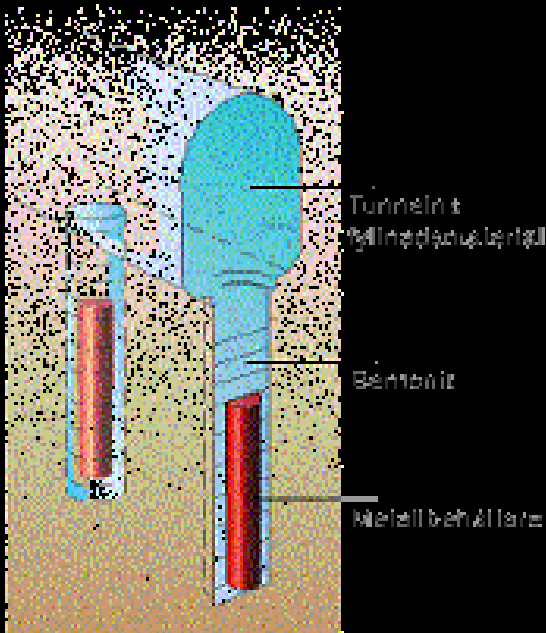


Shematski primjer multi-barijernog sustava odlaganja VRAO za duboka geološka odlaganja (prema Bradshaw i dr., 1992)

ONKALO, FINSKA (POKRAJ NUKLEARNI OLKILUOTO)



- <http://www.posiva.fi/en>
- Metalni spremnici od željeza i bakra
- Reduktivni uvjeti usporavat će koroziju vanjskog bakrenog spremnika
- Bentonit predstavlja dodatnu tehnološku barijeru
- U **granitu**
- 2020. g.



OKLO, GABON - GEOLOŠKA IZOLACIJA - PRIRODNI NUKLEARNI REAKTOR



- Proizvedeno oko 5 tona produkata fisije, među kojima neodmij i rutenij
- 'Otpad' nije migrirao dalje od mjesta reaktora u prošlih 1,7 milijardi godina

<https://nuclear.duke-energy.com/2012/11/06/natural-nuclear-reactors-two-billion-years-old>. Photo US DOE.

ODLAGALIŠTE RAO U HRVATSKOJ

- Postoji hitna potreba za odlagalištem **NSRAO!**
- Pitanje je vrlo politizirano (sa ili bez Slovenaca).
- Studije se rade dosta studiozno, i uključuju stručnjake iz vrlo različitih područja.
- Osnovni element je svakako geologija (hidrogeologija-podzemne vode, a uz to idu biolozi, građevinari, ekonomisti, sociolozi (jer odlagalište mora biti društveno prihvaćeno!).
- Bila su izdvojena 4 područja, a predviđeni volumen potpovršinskog odlagališta je 18.000 m³. Trgovska gora, Papuk, Moslavačka gora, Petrova gora.
- Postoji li i gdje je danas odlagalište RAO u Hrvatskoj?