

# ENERGIA DAL NUCLEARE

## Rifiuti radioattivi

Saverio Altieri

DIPARTIMENTO DI FISICA NUCLEARE E TEORICA  
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE (INFN)  
SEZIONE DI PAVIA

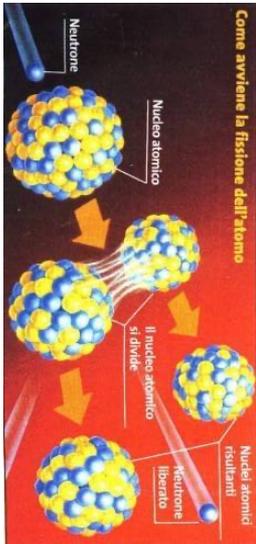


# ORIGINE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

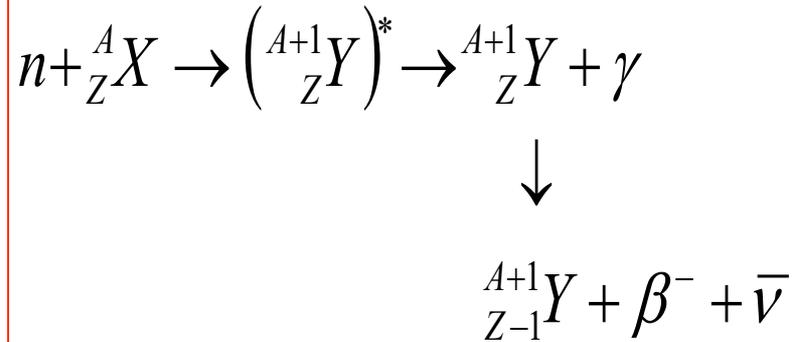
## DALLA FISSIONE

### prodotti di fissione

Nuclide	Half-life
$^{33}\text{Xe}$	5.3 d
$^{131}\text{I}$	8.0 d
$^{134}\text{Cs}$	2.0 y
$^{137}\text{Cs}$	30.0 y
$^{132}\text{Te}$	78.0 h
$^{89}\text{Sr}$	52.0 d
$^{90}\text{Sr}$	28.0 y
$^{140}\text{Ba}$	12.8 d
$^{95}\text{Zr}$	1.4 h
$^{99}\text{Mo}$	67.0 h
$^{103}\text{Ru}$	39.6 d
$^{106}\text{Ru}$	1.0 y
$^{141}\text{Ce}$	33.0 d
$^{144}\text{Ce}$	285.0 d



## DALLE REAZIONI DI CATTURA NEUTRONICA



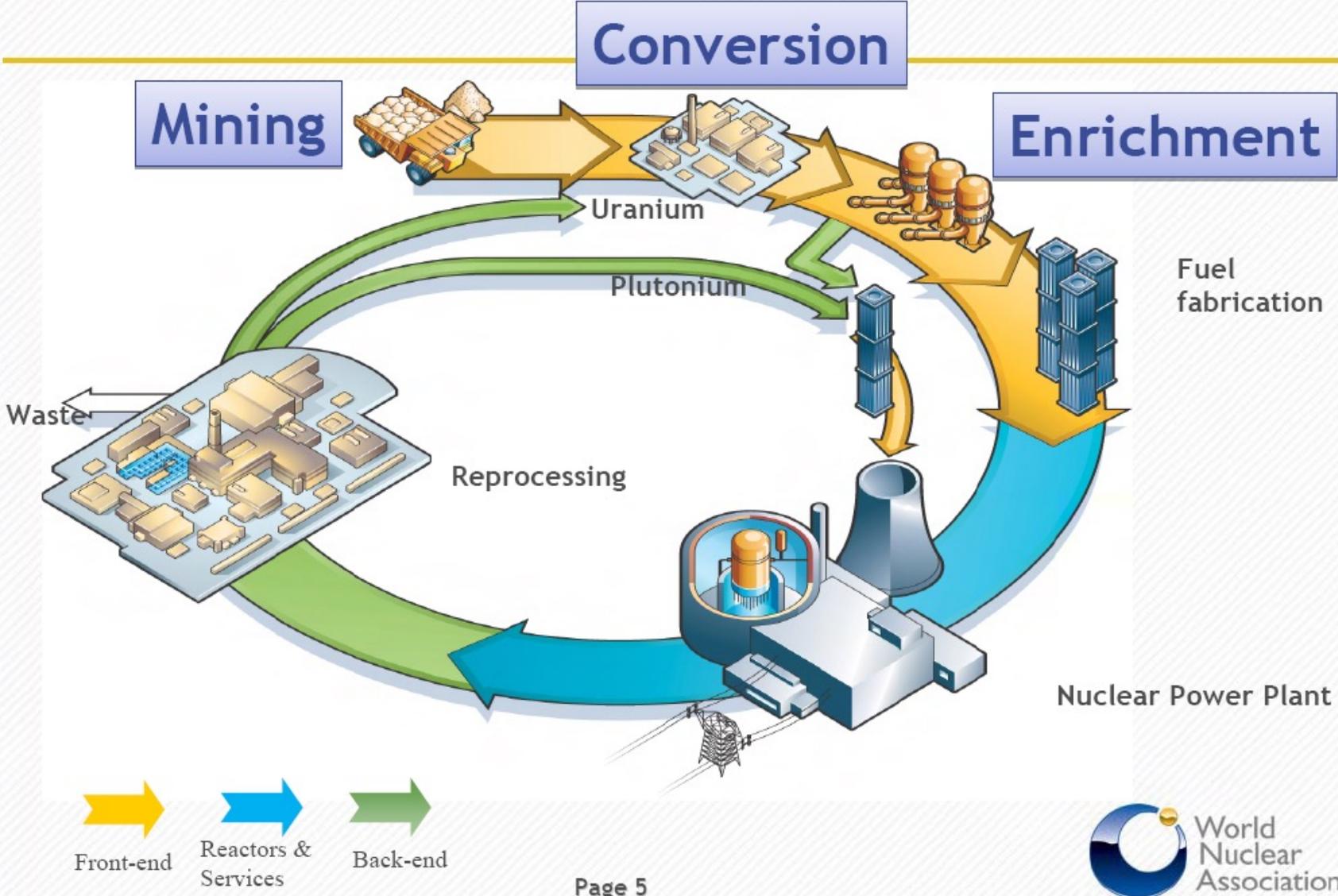
Tutti i materiali immersi nel reattore in un campo neutronico diventano radioattivi

### attinidi

$^{239}\text{Np}$	2.4 d
$^{238}\text{Pu}$	86.0 y
$^{239}\text{Pu}$	24 400.0 y
$^{240}\text{Pu}$	6 580.0 y
$^{241}\text{Pu}$	13.2 y
$^{242}\text{Cm}$	163.0 d

Le catture neutroniche successive su elementi pesanti a partire da U-238 portano alla formazione dei transuranici (**attinidi**) con tempi di dimezzamento di migliaia

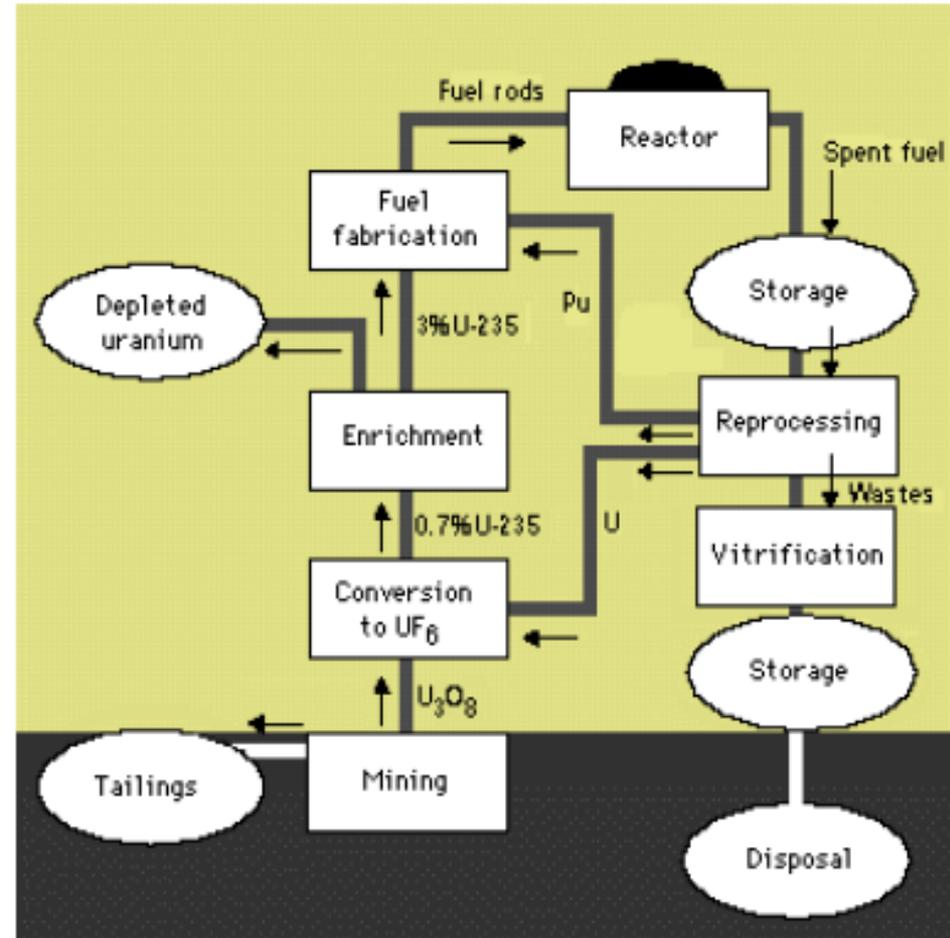
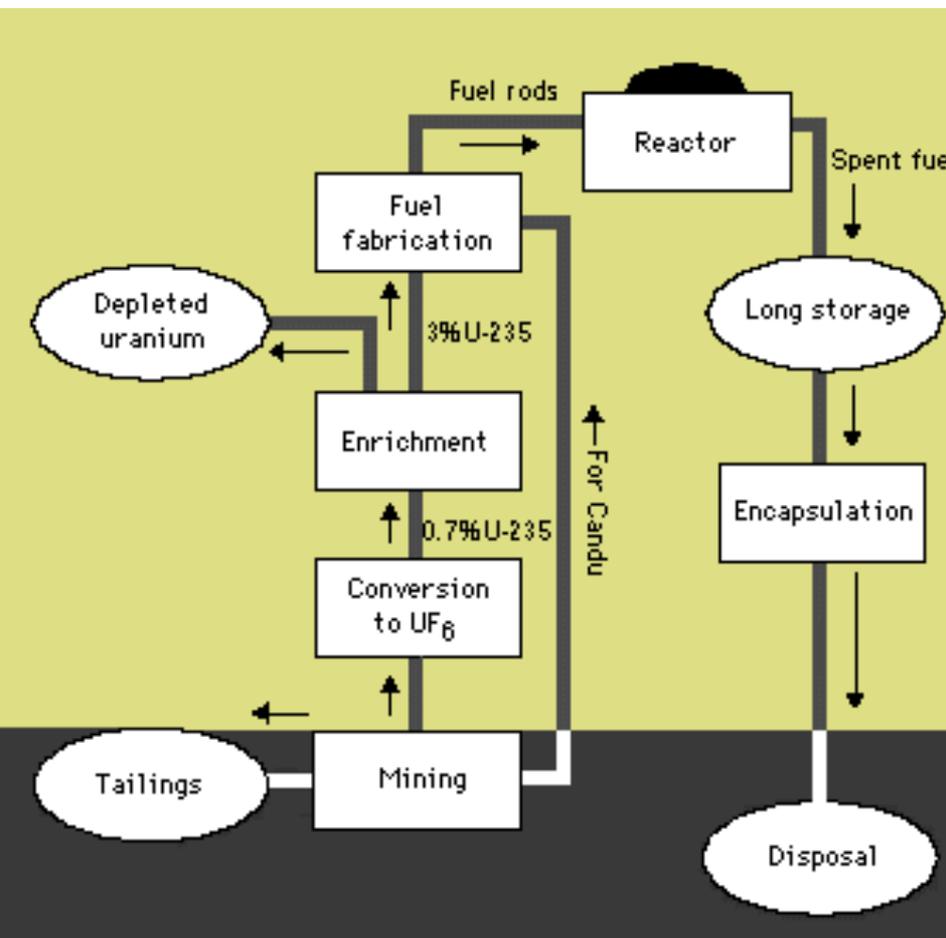
# The Nuclear Fuel Cycle



# IL CICLO DEL COMBUSTIBILE

ciclo aperto

ciclo chiuso



Rifiuti radioattivi vengono prodotti in ogni fase del ciclo del combustibile che comprende:

1. Estrazione e raffinazione del minerale grezzo,
2. La sua lavorazione e la fabbricazione del combustibile nucleare (UF<sub>6</sub> e arricchimento),
3. Uso nel reattore,
4. Stoccaggio del combustibile esaurito, come rifiuto o riprocessamento ed estrazione del materiale fissile

# CLASSIFICAZIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

I rifiuti radioattivi, a seconda dei nuclidi che contengono possono essere:

- $\alpha$  - emettitori
- $\beta$  - emettitori
- $\gamma$  - emettitori

Ognuna di queste radiazioni ha un diverso potere di penetrazione nella materia e, quindi, richiede l'uso di un opportuno materiale di schermo per proteggere l'uomo e l'ambiente.

Normalmente sono classificati in base alla loro attività come rifiuti :

- 1. A bassa attività** (low-level waste LLW),
- 2. A media attività** (intermediate-level waste ILW)
- 3. Ad alta attività** (high-level wastes HLW)

## Rifiuti a bassa attività Low-Level Waste

Sono costituiti da **carta, stracci, attrezzi, tute, guanti ...** che contengono piccole quantità di rifiuti radioattivi a breve tempo di dimezzamento; rifiuti analoghi sono prodotti anche negli ospedali, nei laboratori di ricerca e nell'industria

Non sono particolarmente pericolosi da maneggiare, ma devono essere eliminati con una cura maggiore rispetto ai rifiuti normali non radioattivi.

**Di solito sono seppelliti in trincee superficiali.** Per ridurre il loro volume vengono compattati o inceneriti (in contenitori chiusi) prima di essere eliminati.

Rappresentano **il 90% del volume** di tutti i rifiuti radioattivi; ma contengono solo **l'1% di tutta la loro radioattività.**

## Rifiuti a media attività Intermediate Level Waste

Contengono alte quantità di radioattività e possono richiedere l'uso di schermature.

Si tratta di **resine, fanghi chimici, componenti del reattore**, come pure materiali contaminati derivanti dal decommissioning di un reattore.

Rappresentano **il 7% del volume** e contengono **il 4% della radioattività** di tutti i rifiuti radioattivi.

**Possono essere solidificati nel cemento o nel bitume prima di essere eliminati.**

Generalmente i rifiuti di questa classe con **nuclidi a breve tempo di dimezzamento** (derivanti principalmente dai reattori) **sono seppelliti a bassa profondità.**

## Rifiuti ad alta attività High Level Waste

DERIVANO DAL COMBUSTIBILE NUCLEARE ESAURITO

può

1. Essere riprocessato per estrarre l'U residuo e il Pu (ciclo aperto)
2. Essere considerato tutto come rifiuto (ciclo chiuso)

Rappresentano il 3% del volume totale, ma contengono il 95% di tutta la radioattività.  
Contengono prodotti di fissione ed elementi pesanti a lunghissima vita media (attinidi)

Tipo di rifiuto	Volume (%)	Radioattività (%)
LLW	90	1
ILW	7	4
HLW	3	95

La maggior parte della radioattività è contenuta in un volume esiguo; una piccola parte del volume totale prodotto

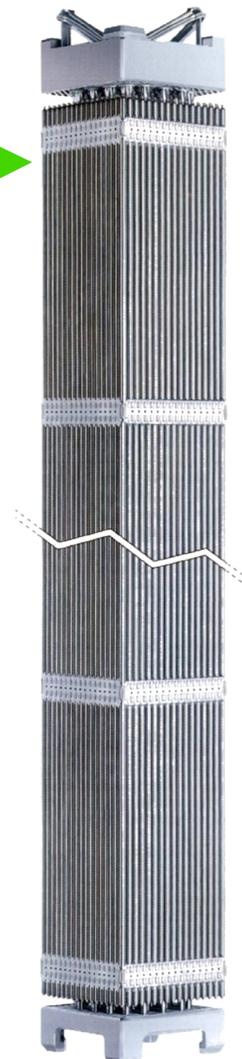
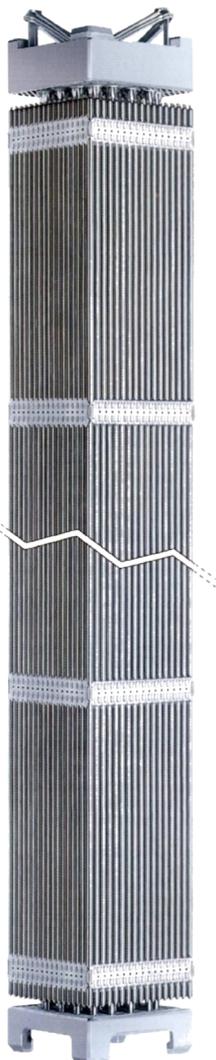
## Rifiuti ad alta attività High Level Waste

### ■ Composizione del combustibile nucleare esaurito:

	95%	uranio 238	(riciclabile)	} →
	1%	uranio 235	(riciclabile)	
	1%	plutonio	(riciclabile)	
	3%	prodotti di fissione e attinidi	(scorie ad alta attività)	

■ Il ritrattamento consente il **recupero e il riciclo del 97% del combustibile nucleare esaurito.**

■ Le **scorie ad alta attività** rappresentano solo **il 3%** del combustibile nucleare esaurito.



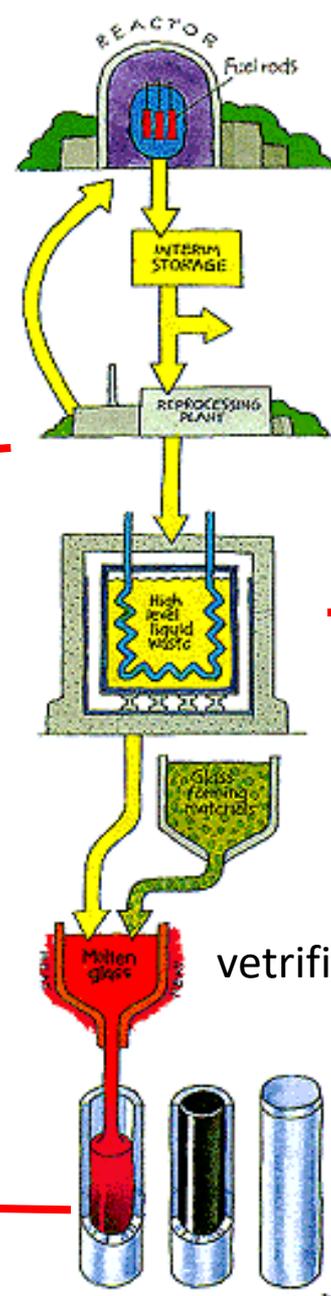
## RIPROCESSAMENTO (ciclo chiuso)

Gli elementi di combustibile irraggiato generano una grande quantità di calore e vengono raffreddati per un certo tempo in apposite piscine.



Vasca di stoccaggio combustibile esaurito  
in un impianto di riprocessamento in UK

# RIPROCESSAMENTO (ciclo chiuso)



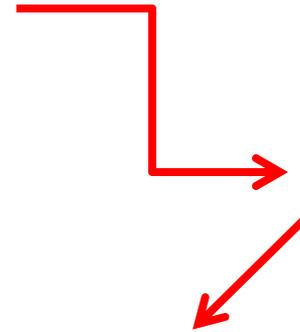
Dissoluzione chimica  
separazione rifiuti  
altamente  
radioattivi

Da 1 anno di  
reattore a  
1000MWe  
700 Kg

vetrificazione

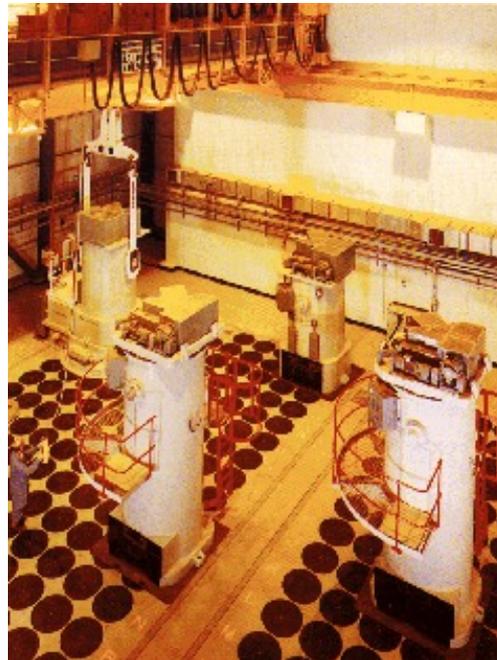
contenitore di acciaio

Estrazione  
U e Pu 97%

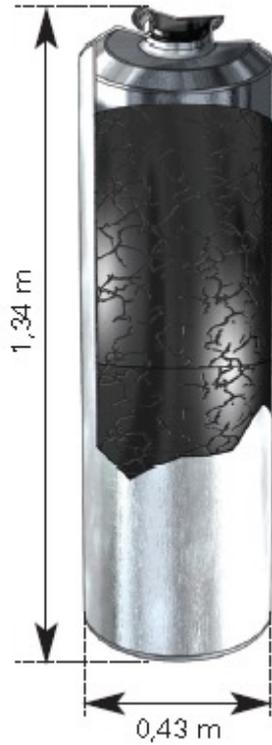


Da 1 anno di  
reattore a 1000MWe  
230 Kg di Pu (MOX)  
da usare come  
combustibile

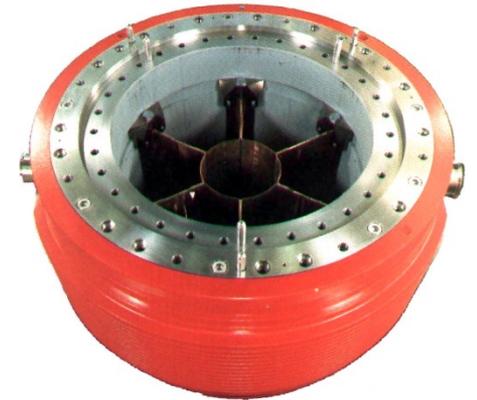
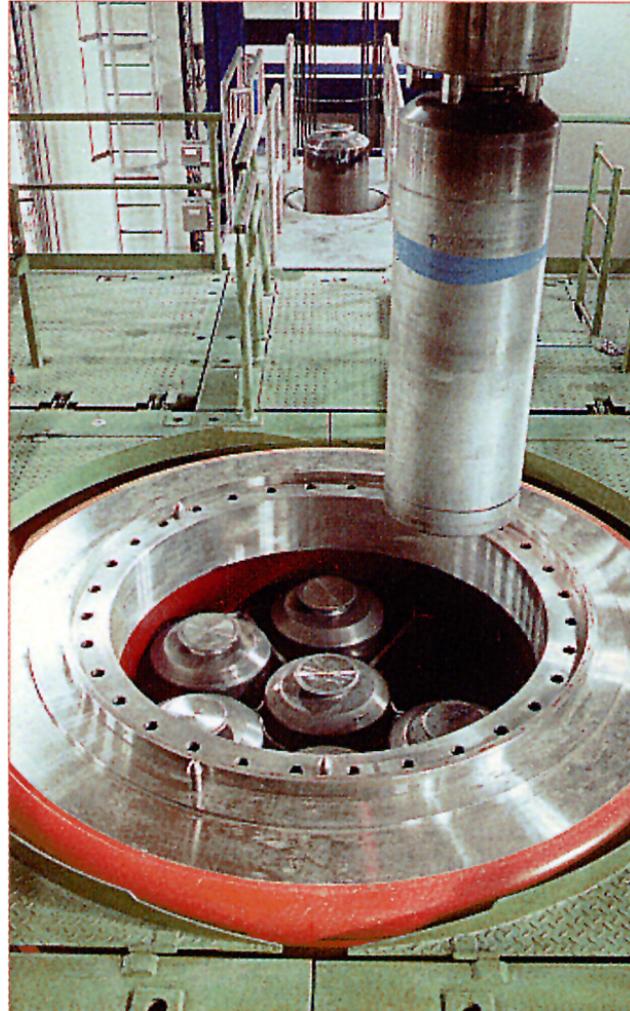
Da 1 anno di  
reattore a  
1000MWe  
12 canister  
1.3mx0.4m  
con 400 Kg di  
vetro **circa 3**  
**m<sup>3</sup>/anno**



# RIFIUTI VETRIFICATI IN STOCCAGGIO TEMPORANEO



## RIFIUTI VETRIFICATI IN STOCCAGGIO TEMPORANEO



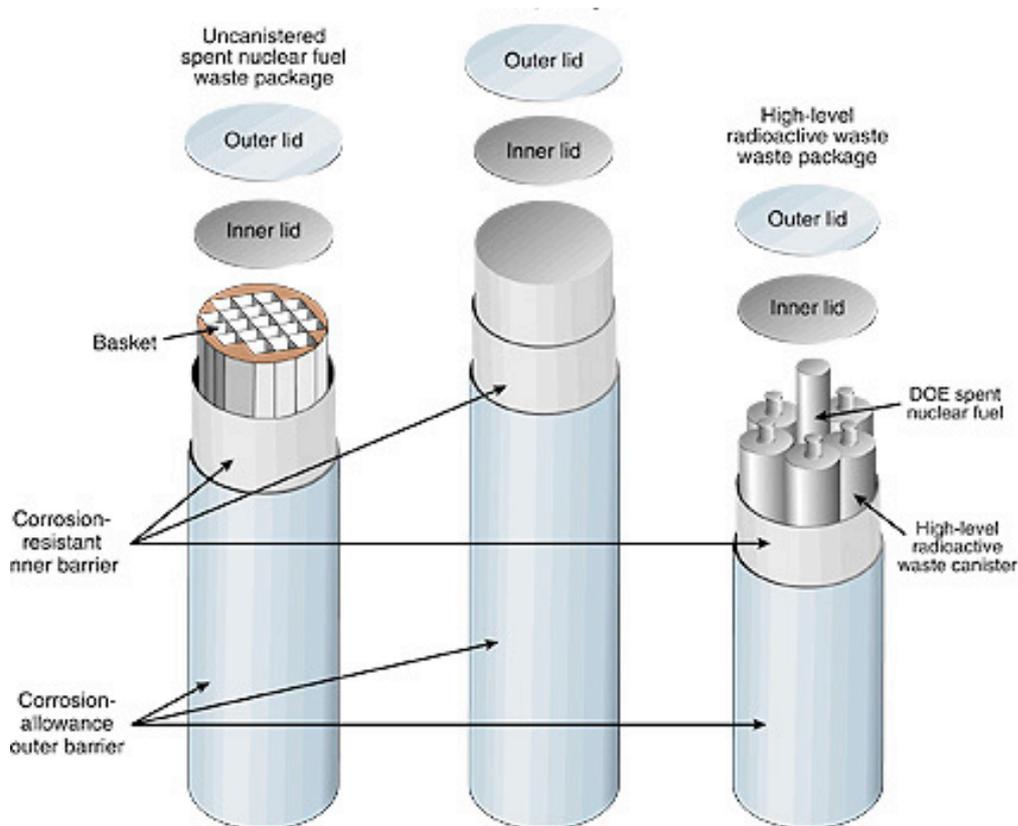
**Struttura del cask e inserimento dei flask contenenti le scorie vetrificate.**



# NO RIPROCESSAMENTO (ciclo aperto)

Il combustibile esaurito se non viene riprocessato è considerato tutto rifiuto.

Viene incapsulato per uno stoccaggio temporaneo in attesa di uno stoccaggio a lungo termine.



Il volume  
risultante è circa  
10 volte quello in  
caso di  
riprocessamento

Da 1 anno di  
reattore a  
1000MWe  
circa 25-30  
tonnellate  
circa 20 m<sup>3</sup>/anno

# VOLUMI DI RIFIUTI PRODOTTI

Una centrale LWR da 1000 MWe in 1 anno produce circa:

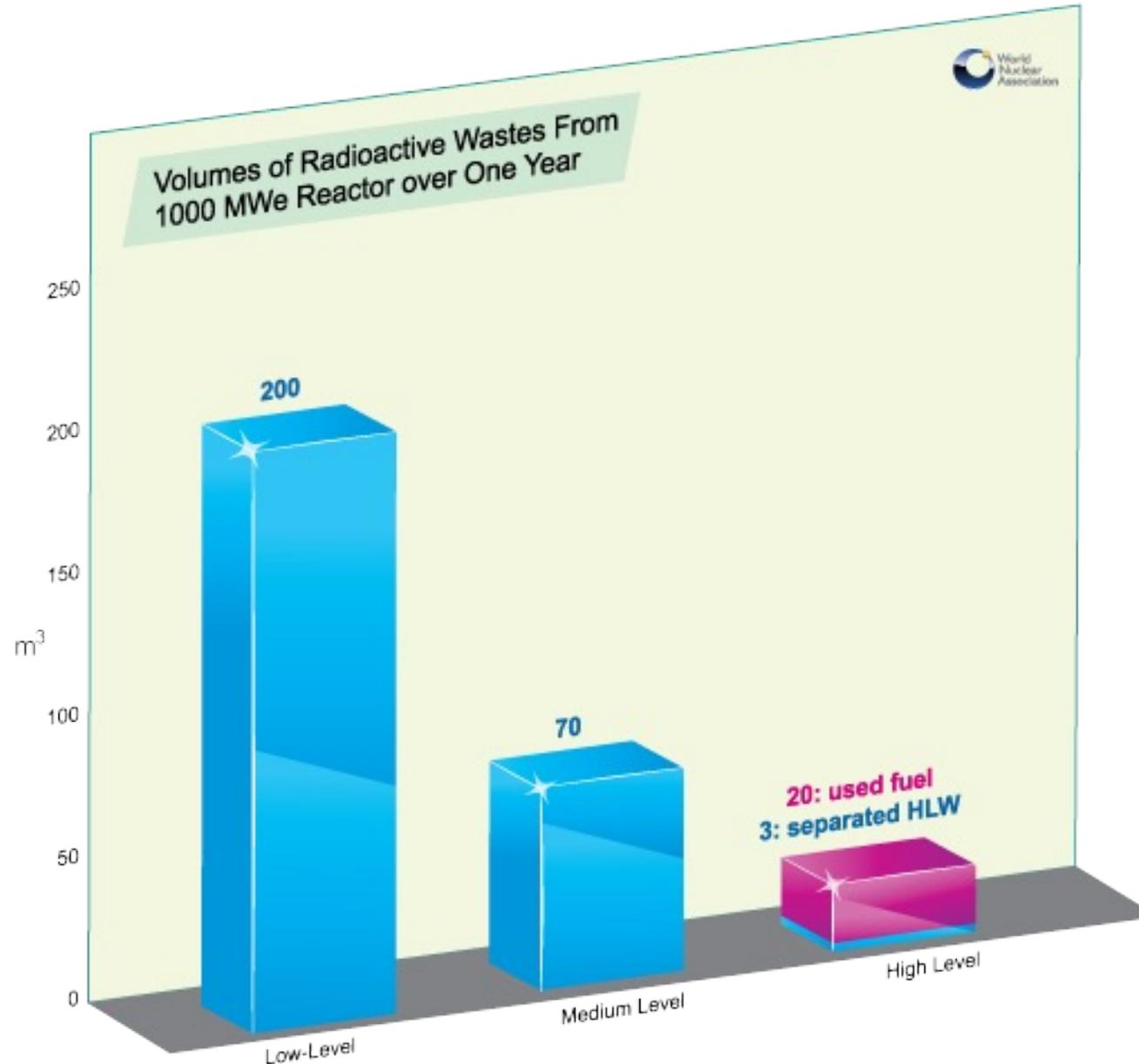
- 200-350 m<sup>3</sup> di LLW e ILW

## no riprocessamento

- 20 m<sup>3</sup> (27 t) di HLW come combustibile esaurito (75 m<sup>3</sup> per lo stoccaggio)

## si riprocessamento

- 3 m<sup>3</sup> di HLW vetrificati (riprocessamento) (28 m<sup>3</sup> per lo stoccaggio)



## Solo per confronto

### ■ Centrale termoelettrica (gas, olio combustibile, carbone) da 1.000 MWe:

combustibile movimentato	da	1	a	2	Mt
CO <sub>2</sub>	da	4	a	7	Mt
CO	da	600	a	2.000	t
ossidi di zolfo	da	4.500	a	120.000	t
ossidi di azoto	da	4.000	a	27.000	t
particolati in atmosfera	da	1.500	a	5.000	t
ceneri	da	25.000	a	100.000	t
metalli pesanti nelle ceneri	da	1	a	400	t

## Rifiuti a bassa e media attività LLW e ILW CONDIZIONAMENTO

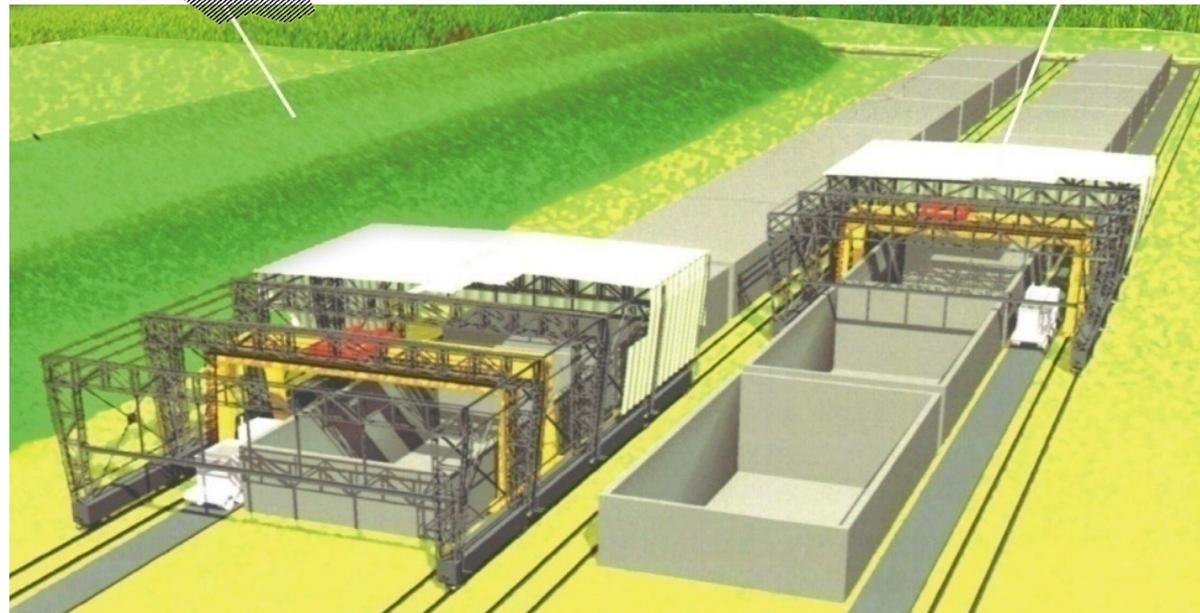
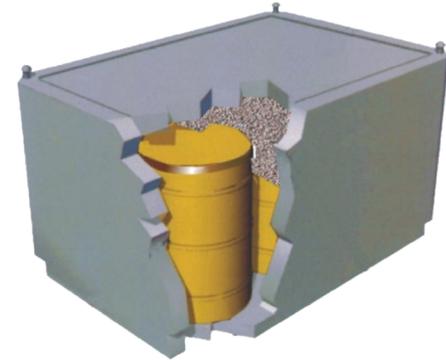
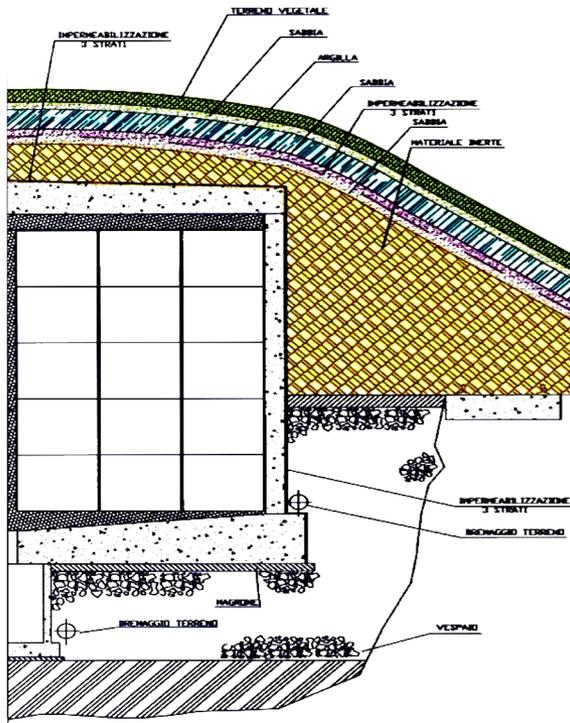
Generalmente i rifiuti di questa classe con **nuclidi a breve tempo di dimezzamento** perdono la loro radioattività in un periodo massimo di 300 anni.

**Possono essere solidificati nel cemento o nel bitume prima di essere eliminati.**

**sono seppelliti a bassa profondità.**



**Rifiuti a bassa e media attività  
LLW e ILW  
STOCCAGGIO DEFINITIVO**



**Rifiuti a bassa e media attività  
LLW e ILW  
STOCCAGGIO DEFINITIVO**



Forsmark (Svezia)



Oskarshamn (Svezia)



Gorleben (Germania)



Konrad (Germania)



Morsleben (Germania)



L'Aube (Francia)



El Cabril (Spagna)

**Depositi definitivi per materiali a bassa e media attività (il 95% dei materiali radioattivi prodotti negli impianti nucleari) sono in esercizio in quasi tutti i paesi industriali (in Italia no).**

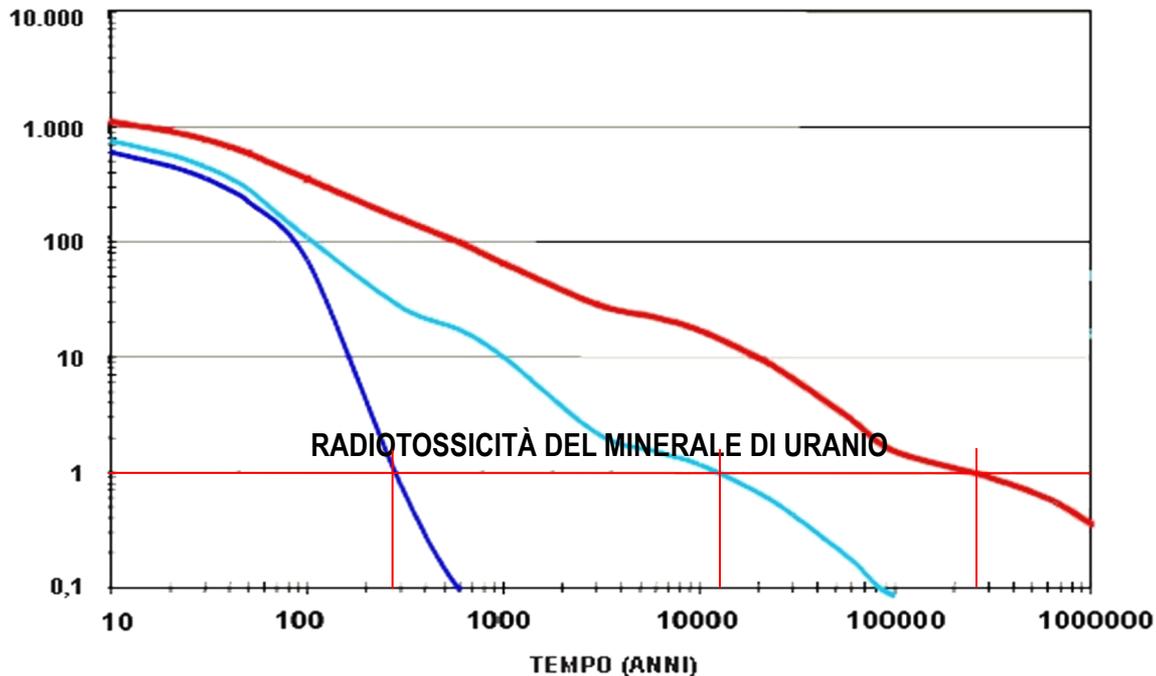


La Manche (Francia)

## Rifiuti ad alta attività High Level Waste

- Il problema delle scorie ad alta attività è in via di soluzione sistematica attraverso le ricerche sulla separazione e sulla trasmutazione delle componenti ad alta attività e a lunga vita.

RADIOTOSSICITÀ RELATIVA



- COMBUSTIBILE IRRAGGIATO (U + PU + ATTINIDI MINORI + PRODOTTI DI FISSIONE)
- ATTINIDI MINORI + PRODOTTI DI FISSIONE
- PRODOTTI DI FISSIONE

- Il riciclo di uranio e plutonio (MOX) riduce il periodo di decadimento di un fattore 20.
- La trasmutazione degli attinidi minori riduce ancora il periodo di decadimento di un fattore 1000.
- La fattibilità del processo di trasmutazione è stata già dimostrata nell'ambito del programma di ricerca francese Atalante.
- Le tecniche in fase di sviluppo in Francia, Regno Unito, Stati Uniti, Russia e Giappone consentiranno di ridurre il tempo di decadimento a circa 300 anni (come per i materiali a bassa e media attività).

## Rifiuti ad alta attività High Level Waste

- Il deposito finale delle scorie vetrificate o degli elementi di combustibile irraggiati non riprocessati richiede il loro isolamento dall'ambiente per un periodo di tempo molto lungo
- Il modo migliore per la conservazione è la loro sepoltura in formazioni geologiche stabili e secche a circa 500 metri di profondità.
- Dopo circa 10.000 anni, la maggior parte degli isotopi radioattivi contenuti nelle scorie è decaduta. La radioattività totale delle scorie sarebbe paragonabile alla radioattività naturale del minerale di uranio scavato in miniera.

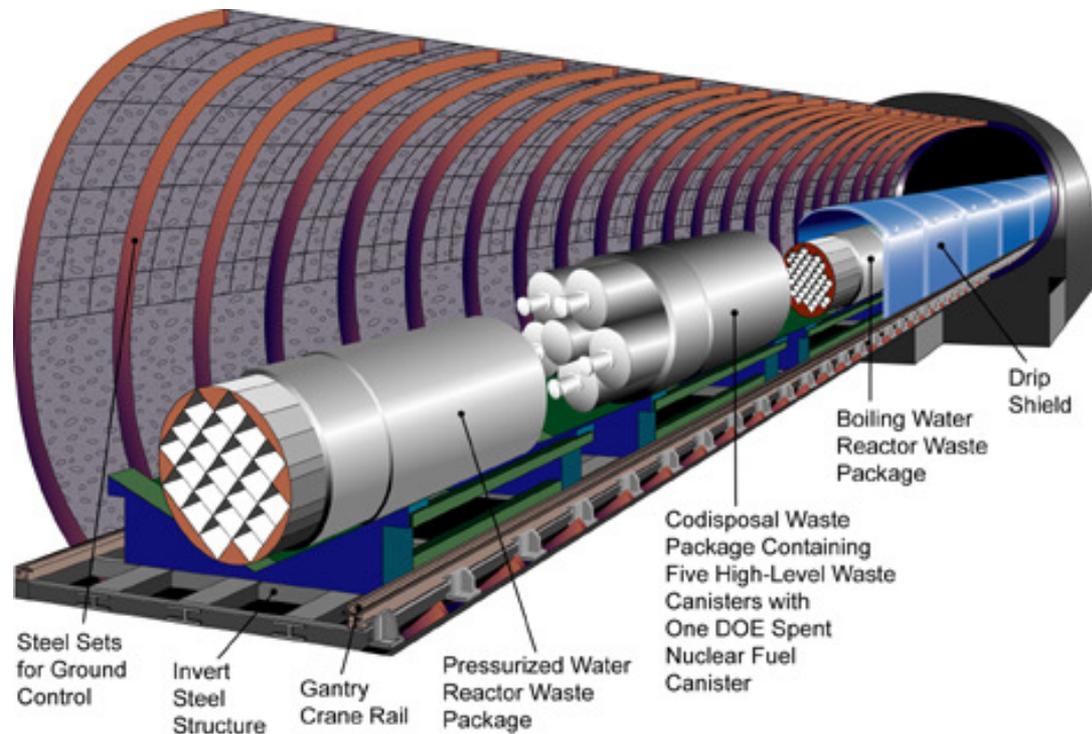
## Rifiuti ad alta attività High Level Waste

- Per assicurare che per un tale lungo periodo di tempo non vi siano rilasci significativi di radioattività nell'ambiente, la protezione delle scorie è pensata secondo il principio delle “barriere multiple”, ossia:
  - Immobilizzazione delle scorie in una matrice insolubile (es. vetri borosilicati, rocce sintetiche, matrici ceramiche);
  - Incorporazione in contenitori sigillati resistenti alla corrosione (es. contenitori in acciaio inox);
  - Incorporazione dei contenitori sigillati in matrici di argilla e bentonite per impedire il contatto con l'umidità dell'aria;
  - Sepoltura delle scorie in depositi profondi ricavati in formazioni geologiche stabili da decine di milioni di anni.

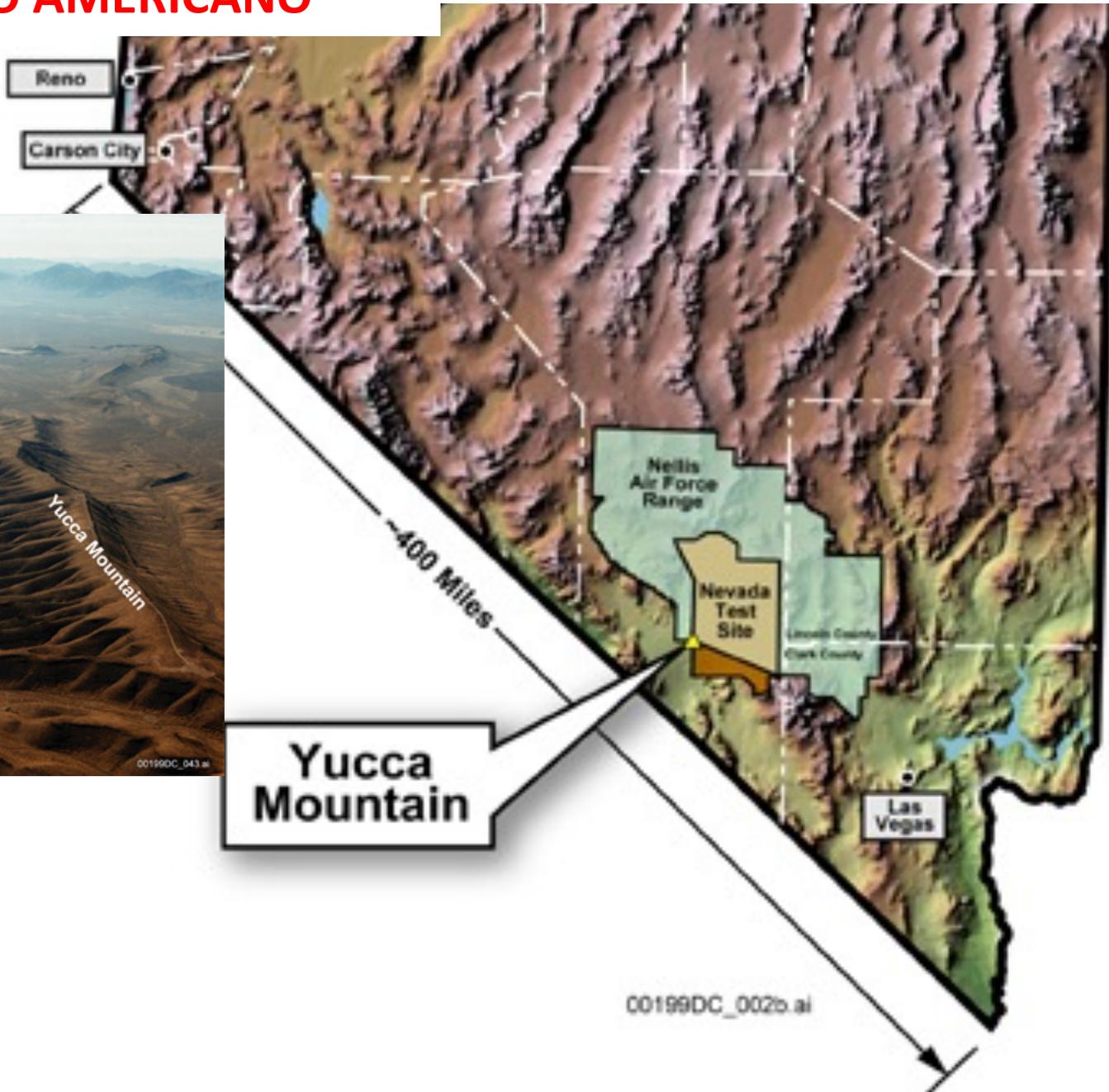
Per arrivare in contatto con l'uomo e l'ambiente tutte queste barriere dovrebbero essere superate e la probabilità che questo avvenga è infinitesima.

## I Depositi Definitivi

- **Negli USA** le scorie di alto livello prodotte dall'industria nucleare civile vengono trattenute in deposito temporaneo presso gli impianti. Il programma americano prevede di incapsulare questi elementi di combustibile irraggiati e di depositarli permanentemente nel deposito finale sotterraneo di Yucca Mountain, nel Nevada. Negli USA esistono già due depositi definitivi: quello di Carlsbad, nel New Mexico, e quello di Savannah River, nella Carolina del Sud, che ospitano, all'interno di una formazione salina, scorie nucleari militari.

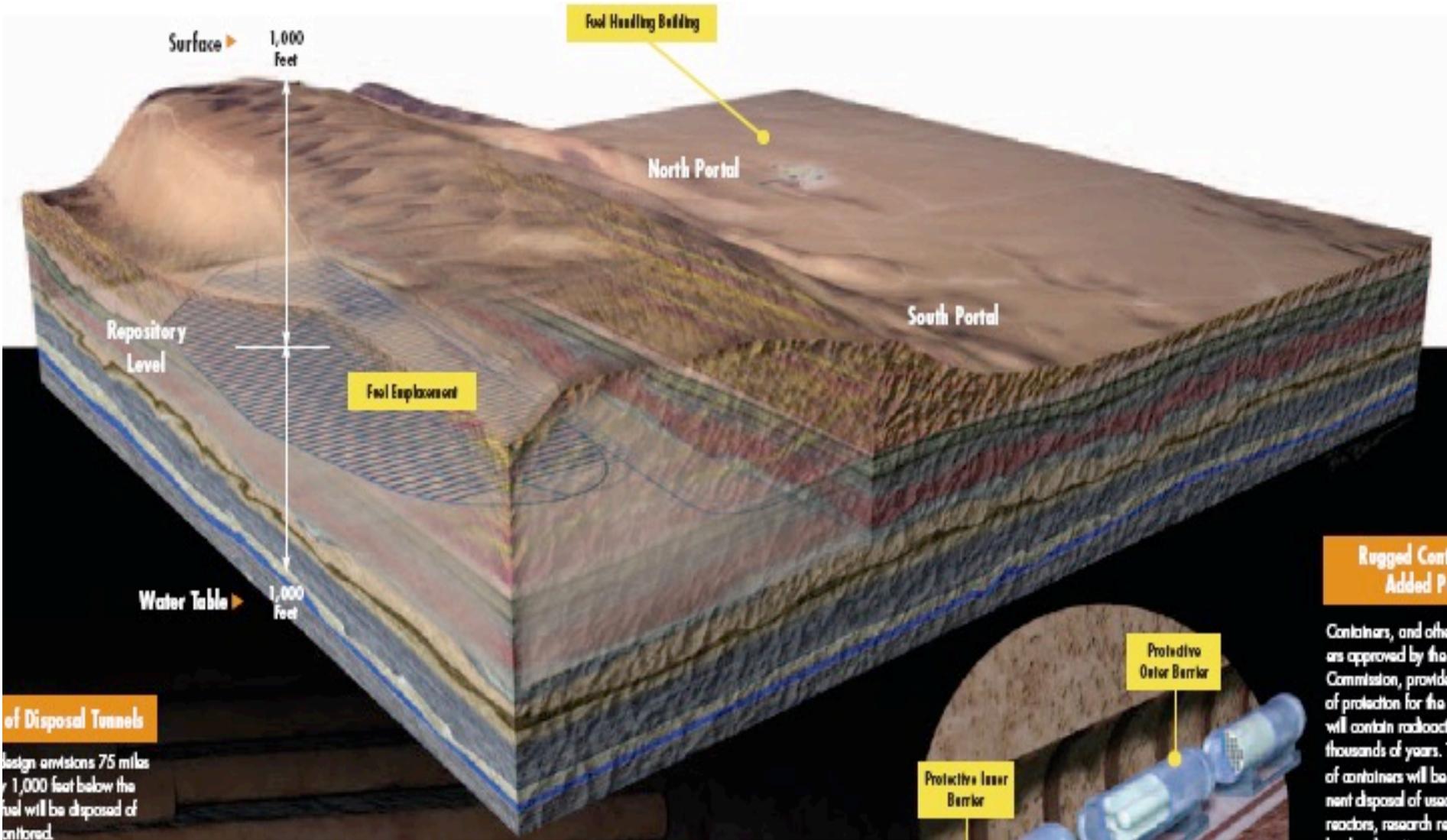


# PROGETTO AMERICANO



00199DC\_002b.ai

# PROGETTO AMERICANO



## of Disposal Tunnels

Design consists 75 miles  
1,000 feet below the  
fuel will be disposed of  
entire.

## Rugged Concrete Added Protection

Containers, and other  
as approved by the N  
Commission, provide  
of protection for the  
will contain radioactivity  
thousands of years. Th  
of containers will be u  
nent disposal of used  
reactors, research re

# Waste Management for Spent Fuel from Nuclear Power Reactors

Country	Policy	Facilities and progress towards final repositories
Belgium	Reprocessing	Central waste storage & underground laboratory established Construction of repository to begin about 2035
Canada	Direct Disposal	Underground repository laboratory established Repository planned for use 2025
China	Reprocessing	Central spent fuel storage in LanZhou
Finland	Direct Disposal	Spent fuel storages in operation Low & intermediate-level repositories in operation since 1992 Site near Olkiluoto selected for deep repository for spent fuel, from 2020
France	Reprocessing	Two facilities for storage of short-lived wastes Site selection studies underway for deep repository for commissioning 2020

Germany	Reprocessing but moving to direct disposal	<p>Low-level waste sites in use since 1975</p> <p>Intermediate-level wastes stored at Ahaus</p> <p>Spent fuel storage at Ahaus and Gorleben</p> <p>High-level repository to be operational after 2010</p>
India	Reprocessing	<p>Research on deep geological disposal for HLW</p> <p>Low-level waste repository in operation</p> <p>High-level waste storage facility at Rokkasho-mura since 1995</p> <p>Investigations for deep geological repository site begun, operation from 2035</p>
Japan	Reprocessing	<p>Sites for final disposal under investigation</p> <p>Central repository for low and intermediate-level wastes planned from 2008</p>
Russia	Reprocessing	<p>Central interim HLW store planned for 2016</p> <p>Central low- &amp; ILW repository planned from 2008</p> <p>Investigating deep HLW repository sites</p>
South Korea	Direct Disposal	<p>Low &amp; intermediate-level waste repository in operation</p> <p>Final HLW repository site selection program for commissioning 2020.</p>
Spain	Direct Disposal	

Sweden

Direct  
Disposal

Central spent fuel storage facility in operation since 1985  
Final repository for low to intermediate waste in operation since 1988  
Underground research laboratory for HLW repository  
Site selection for repository in two volunteered locations

Switzerland

Reprocessing

Central interim storage for high-level wastes at Zwiilag since 2001  
Central low and intermediate-level storages operating since 1993  
Underground research laboratory for high-level waste repository, with deep repository to be finished by 2020.

United  
Kingdom

Reprocessing

Low-level waste repository in operation since 1959.  
High-level waste is vitrified and stored at Sellafield  
Underground HLW repository planned.

USA

Direct  
Disposal

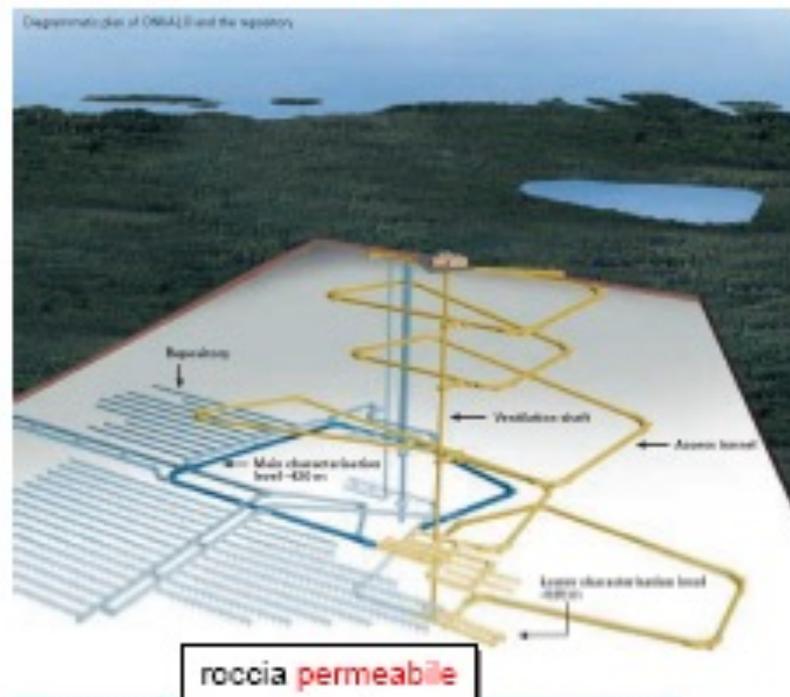
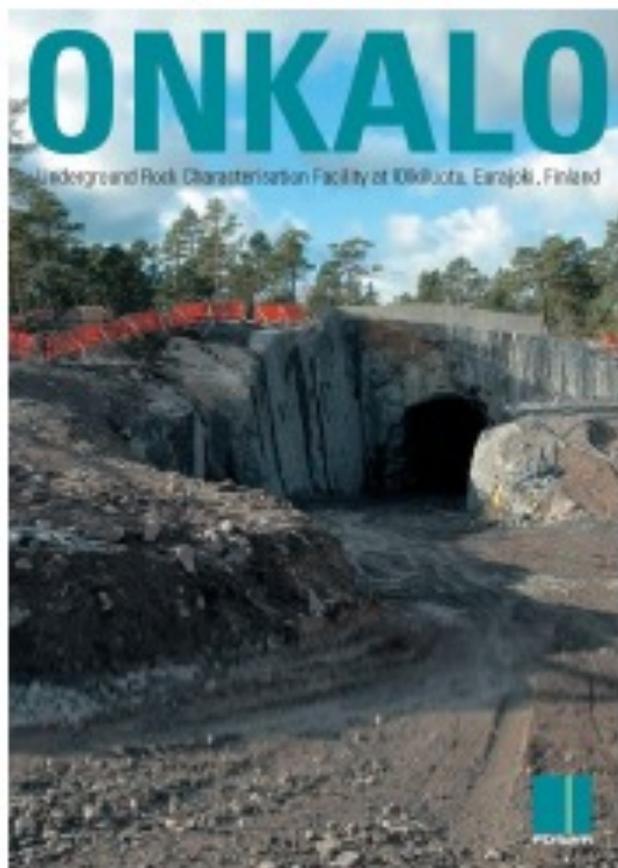
Three low-level waste sites in operation  
2002 decision to proceed with geological repository at Yucca Mountain

## In Europa

- una parte del combustibile irraggiato è tenuto in deposito presso gli impianti nell'attesa del deposito definitivo.
- La restante parte viene riprocessata o presso l'impianto di Sellafield nel Regno Unito o presso l'impianto di La Hague in Francia.
- L'uranio e il plutonio recuperati dal riprocessamento sono restituiti ai proprietari del combustibile (il plutonio sotto forma di combustibile MOX) mentre i prodotti di fissione sono vetrificati, sigillati in contenitori di acciaio inossidabile e raccolti in depositi temporanei o restituiti ai legittimi proprietari con l'obiettivo di conservarli poi nei depositi definitivi sotterranei nazionali.

- **La Svezia** possiede un deposito temporaneo unico per il combustibile irraggiato (a CLAB, vicino alla città di Oskarshamn) e ha in programma di condizionare il combustibile senza riprocessarlo e di raccoglierlo in un deposito geologico definitivo entro il 2015.
- **La Finlandia** sta costruendo un deposito geologico definitivo a Olkiluoto, nei pressi del nuovo impianto nucleare EPR.
- **La Francia**, nella regione della Meuse, a 445 metri di profondità, sta predisponendo gallerie sperimentali in una formazione di argille stabile da 155 milioni di anni.
- **Svizzera, il Canada e il Giappone** stanno approntando depositi definitivi.

## Il deposito di scorie di Olkiluoto in Finlandia (ONKALO)



### ISOLATION PRINCIPLE



Scavo e costruzione dei pozzi 2004-2010  
 Studi e verifiche geologiche 2004 →  
 Costruzione del deposito scorie 2015 →  
 Collocazione definitiva scorie 2020 →

FEATURES



Science

## Final resting place

Sedeer El-Showk

*Science*, 375 (6583), • DOI: 10.1126/science.ada1392

View the article online

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.ada1392>

Permissions

<https://www.science.org/help/reprints-and-permissions>

# FINAL RESTING PLACE

Finland is set to open the world's first permanent repository for high-level nuclear waste. How did it succeed when other countries stumbled?

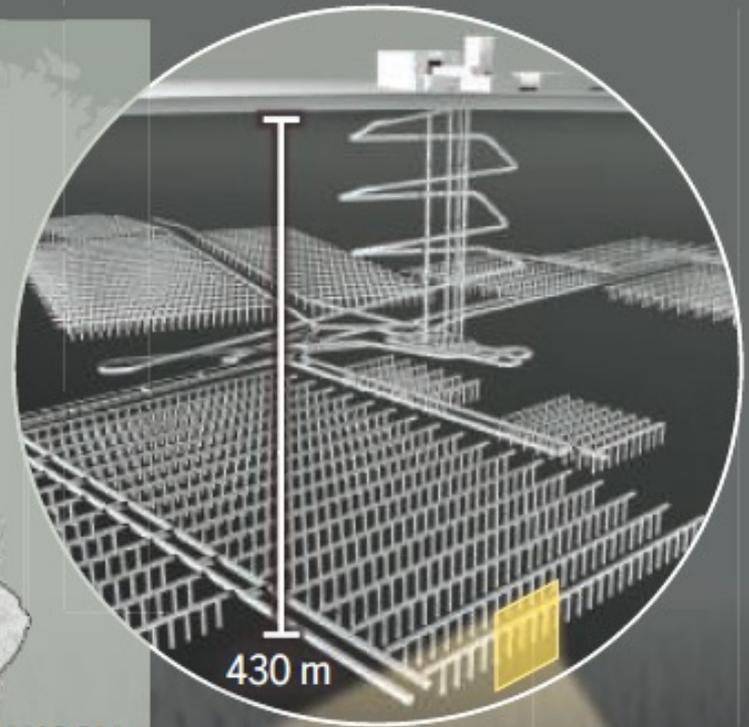
By Sedeer El-Showk



Onkalo's encapsulation plant (white) sits atop an ant's nest of underground tunnels in this August 2021 photo. Olkiluoto's nuclear power plants can be seen in the distance.

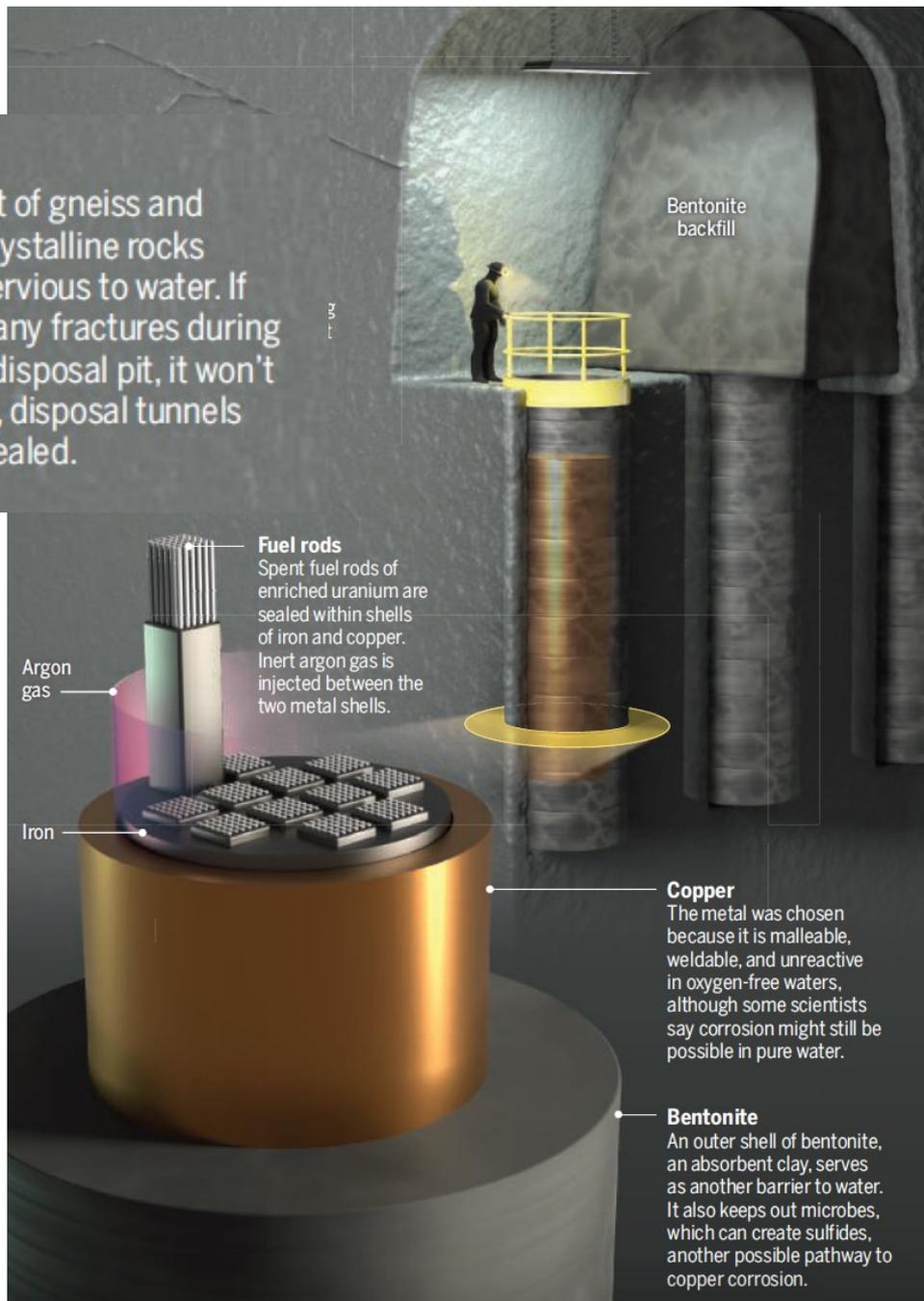
## Nuclear necropolis

In just a few years, workers plan to entomb high-level nuclear waste at Onkalo, a repository on the Finnish island of Olkiluoto that is meant to store spent fuel rods for 100,000 years. The waste will be buried in about 100 tunnels 430 meters belowground. Onkalo relies on multiple barriers to prevent water from reaching the rods and carrying radionuclides to the surface.



## Time capsules

Onkalo is carved out of gneiss and granite, two hard, crystalline rocks that are nearly impervious to water. If workers encounter any fractures during the excavation of a disposal pit, it won't be used. Once filled, disposal tunnels are backfilled and sealed.



If getting the operating license goes smoothly, Posiva is on track to begin to bury nuclear waste deep in the Finnish bedrock in 2024 or 2025. Excavation will continue over the next century as new disposal tunnels are added. When the repository is filled to capacity, sometime around 2120, the entrance tunnel will be sealed shut. The encapsulation plant and other surface structures will be demolished. Nothing above will remain, not even a warning sign. Deep below the dismantled site, 6500 tons of spent fuel rods will lie in their tombs, quiet but still warm from radioactive decay.

## In Italia sono in deposito

- circa 55.000 m<sup>3</sup> di LLW e ILW 38m
- circa 8.500 m<sup>3</sup> di HLW.
- Entro il 2025 dovranno rientrare in Italia anche 235 tonnellate di combustibile esausto proveniente dagli impianti nucleari italiani (Caorso 190 tonnellate, Trino 32 tonnellate e Garigliano 13 tonnellate) attualmente in Francia per il trattamento e il condizionamento.