



GEORISORSE 2

Petrolio

Il petrolio è costituito da vari composti di idrocarburi e si rinviene nella crosta terrestre in forma liquida e gassosa e può manifestarsi spontaneamente in superficie sotto forma di infiltrazioni, sabbie bituminose, bitume solido (gilsonite) e scisti bituminosi.

Origine ed accumulo di depositi di idrocarburi

I composti che si rinvencono nel petrolio derivano sia dalla clorofilla che dall'emoglobina. Per la formazione ed accumulo del petrolio sono necessarie quattro condizioni:

- 1- Una roccia madre
- 2- Una roccia serbatoio in cui possa conservarsi
- 3- Una copertura rocciosa che lo possa confinare
- 4- Una struttura geologica o livelli litostratigrafici favorevoli per intrappolarlo

Una roccia madre è un qualsiasi volume di roccia capace di generare ed espellere quantità commerciali di petrolio o gas. Si tratta di rocce sedimentarie solitamente di origine marina e a volte di origine lacustre. Al tempo della deposizione vi doveva essere una gran quantità disponibile di biomassa mentre le acque del fondo dovevano essere in condizioni anaerobiche. Man mano che vengono sepolte le rocce si riscaldano. Nel range di temperatura compreso tra 50 e 200°C ci potrà essere la trasformazione da materiale organico a petrolio. Idealmente le temperature migliori sono tra 100 e 120°C.

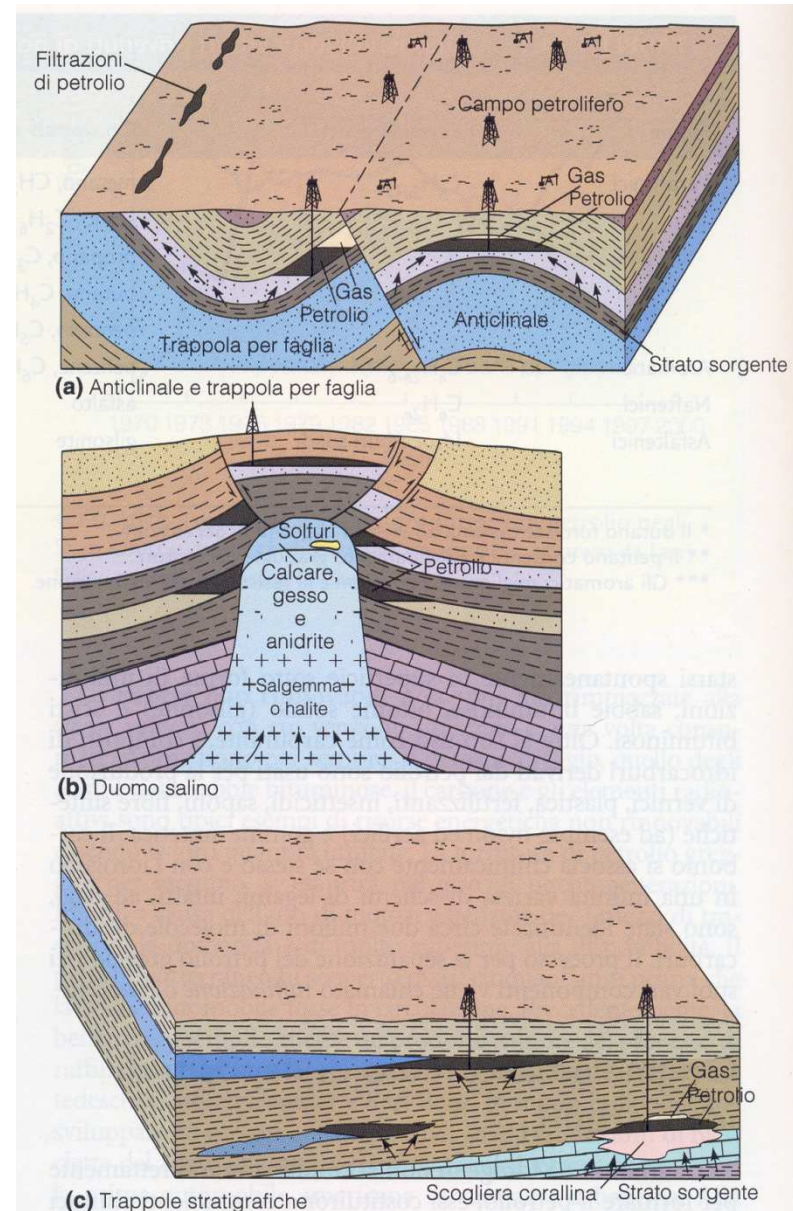
Successivamente il petrolio viene spremuto e migra verso una roccia serbatoio. Tali rocce sono porose e permeabili. La porosità varia dal 20 al 50% e questo significa che per ogni metro cubo di roccia serbatoio si trovano da 200 a 500 litri di petrolio. L'unità di volume è il barile che corrisponde a 10 litri.

La copertura rocciosa impermeabile impedisce la filtrazione verso l'alto del petrolio o il formarsi di depositi di catrame in superficie.

Trappole geologiche

Strutturali: un'anticlinale è una struttura perfetta per intrappolare gas e petrolio così come i domi salini.

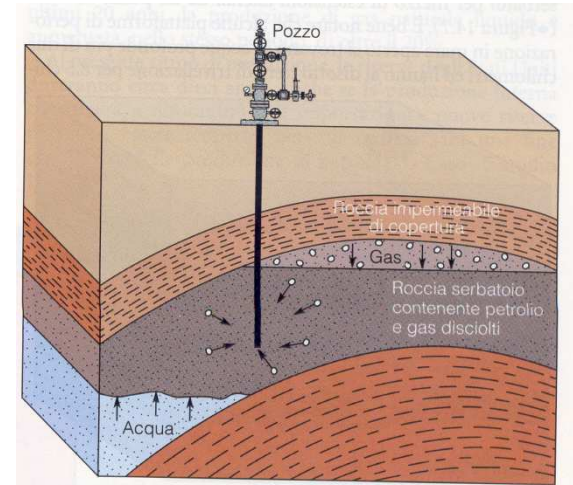
Stratigrafiche: ossia ogni cambiamento nelle caratteristiche litologiche delle rocce sedimentarie che permette l'accumularsi del petrolio.



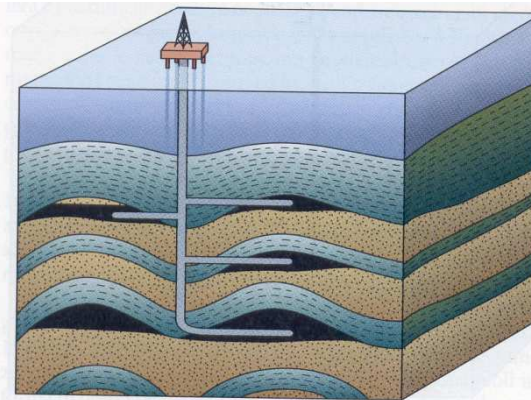
♦ FIGURA 14.2 (a e b) Frequenti trappole petrolifere di tipo strutturale; (c) trappole petrolifere di tipo stratigrafico.

Produzione petrolifera

Il primo pozzo di petrolio fu trivellato con successo nel 1859. I pozzi con maggiore produttività richiedono pompaggio, anche se la pressione dell'acqua e del gas potrebbero essere sufficienti a far fluire il petrolio verso l'esterno. È possibile perforare un pozzo in modo tale che il foro di trivellazione si inclini sulla verticale per penetrare rocce serbatoio lontane dal luogo della trivellazione stessa (trivellazione inclinata). Negli anni '90 è stata anche perfezionata la perforazione orizzontale e successivamente le perforazioni multilaterali.



♦ FIGURA 14.5 In una struttura anticlinale, il petrolio è costretto a fuoriuscire per la concomitante azione della pressione del gas agente dall'alto e dell'effetto di galleggiamento dell'acqua dal basso.



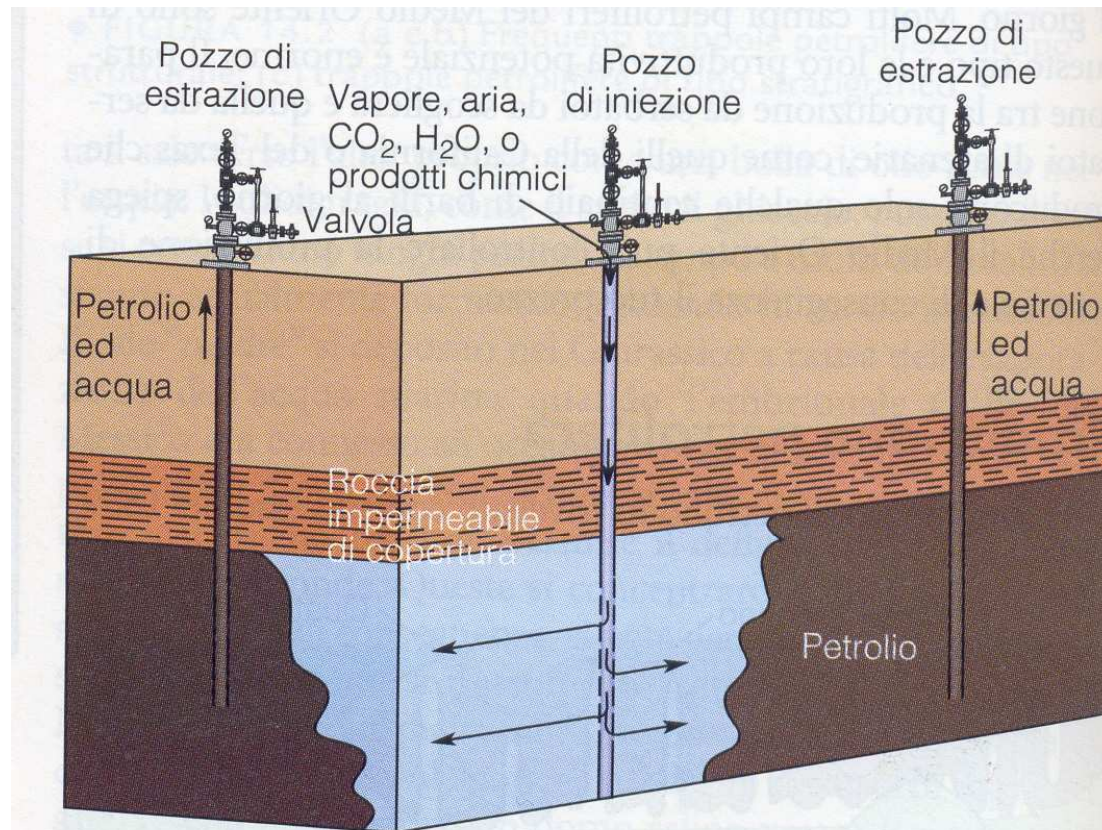
♦ FIGURA 14.7 Una perforazione multilaterale da una piattaforma di perforazione *off-shore* permette l'estrazione da diversi livelli di produzione, mentre il fondo è sfruttato da un condotto orizzontale.

Estrazione secondaria

Questi metodi consentono il prelievo del petrolio che rimane nella roccia-serbatoio dopo che i metodi standard non risultano più efficaci. Possono essere di tre tipi: termici, chimici e a miscele di fluidi. I metodi termici comprendono le iniezioni di vapore che rendono il petrolio meno viscoso e quindi più libero di fluire, e quello a fiamma per cui viene iniettata aria nella roccia serbatoio per dar fuoco al petrolio cosicché gas e calore aumentino la mobilità del petrolio.

L'iniezione di acqua è un metodo chimico che utilizza composti a grandi molecole che, quando aggiunti all'acqua, la rendono più densa aumentandone la capacità di dilavare e di dirigere i grumi di petrolio verso un pozzo di estrazione.

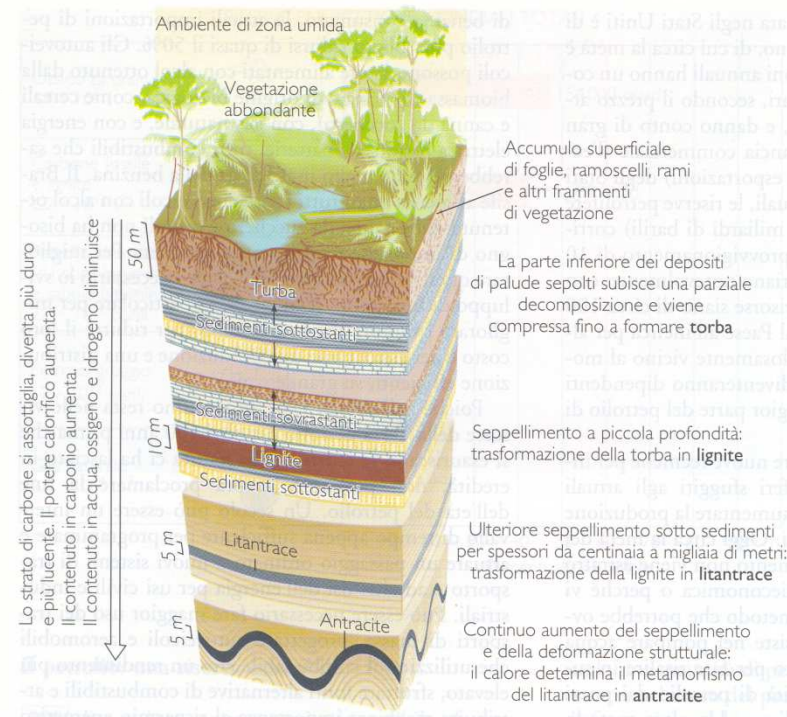
I fluidi che si mescolano al petrolio, detti miscibili, vengono utilizzati per rimuovere il petrolio aderente alla roccia serbatoio. Per questo metodo si usano miscele di acqua e propano o etano.



◆ **FIGURA 14.8** Nei metodi di estrazione secondaria vengono iniettati, nei livelli produttivi, vapori, aria, ossido di carbonio o sostanze chimiche disciolte nell'acqua al fine di favorire il deflusso del petrolio verso il pozzo di estrazione.

Carbone

Il carbon fossile è il residuo carbonioso di materie vegetali, preservato e trasformato dagli effetti del calore e della pressione. Il primo stadio del processo di carbonizzazione è l'accumularsi di grandi quantità di materiale vegetale in condizioni tali da essere preservato (ambiente anaerobico). Tali condizioni si trovano per esempio in acquitrini salmastri non marini. Il materiale vegetale accumulato deve poi essere sepolto ad una profondità tale che il calore e la pressione consentano l'espulsione dell'acqua e delle sostanze volatili. Il metamorfismo del carbone seguirà successivamente la sequenza torba, lignite, litantrace, ed antracite.



Miniera

L'insieme costituito dal giacimento, dalle gallerie, dagli scavi e dal complesso industriale collegato all'attività di estrazione di minerali e rocce.

Caratteristiche giacimento

- Ricche concentrazioni di materiale di interesse economico
- Costi di estrazione che garantiscono un profitto ragionevole

Tipi di estrazione

- A cielo aperto
- Sotterranea



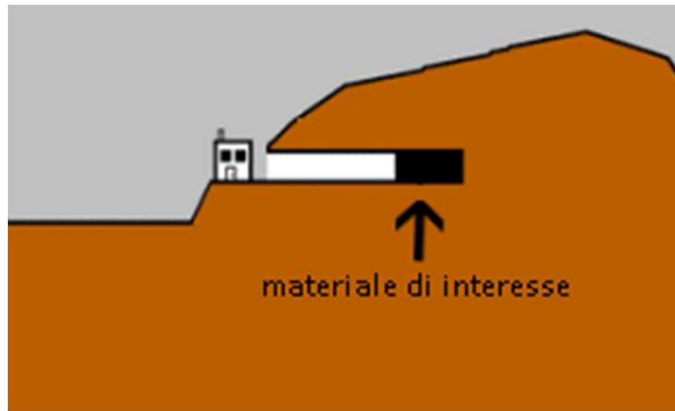
Esempi di estrazione a cielo aperto

- Estrazione a fossa / open pit
- Estrazione highwall

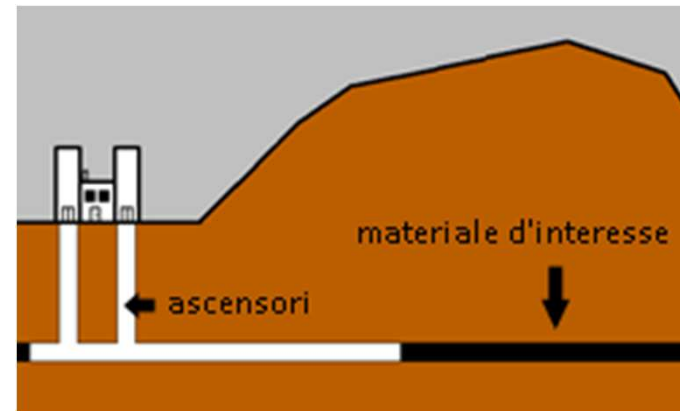


Esempi di estrazione sotterranea

- Miniere a mezza costa



- Miniere con ascensori

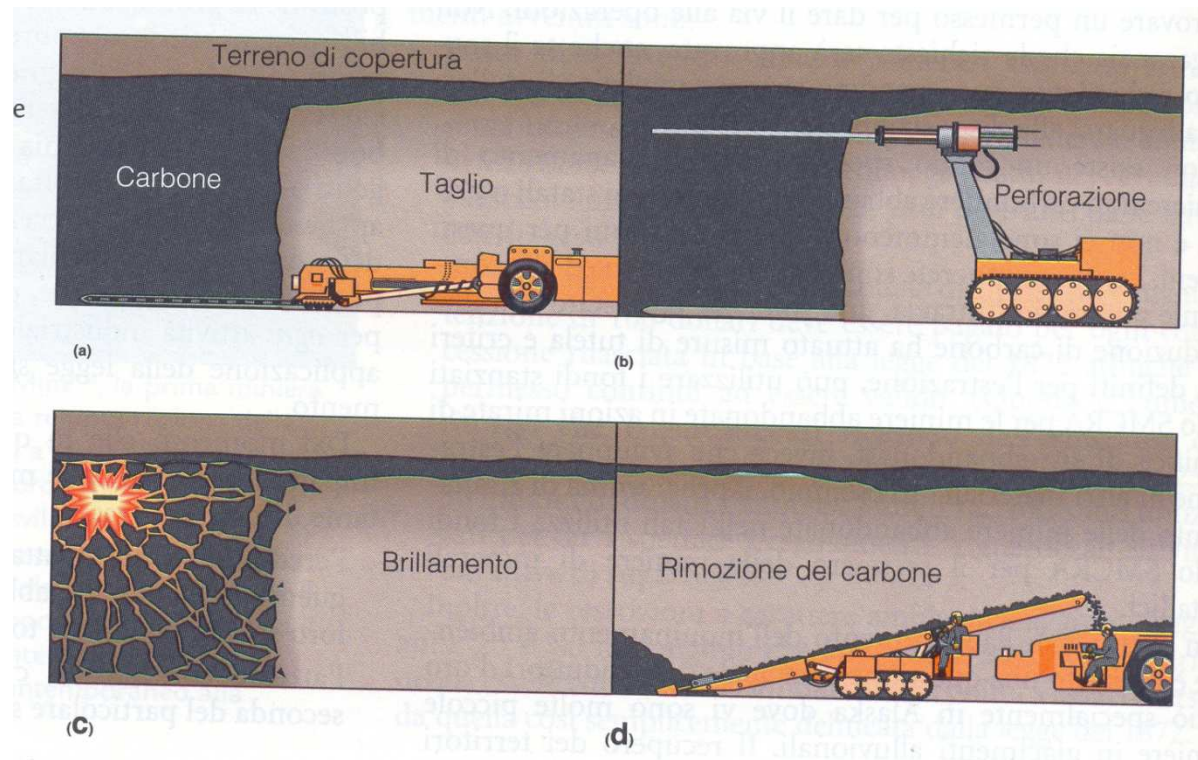


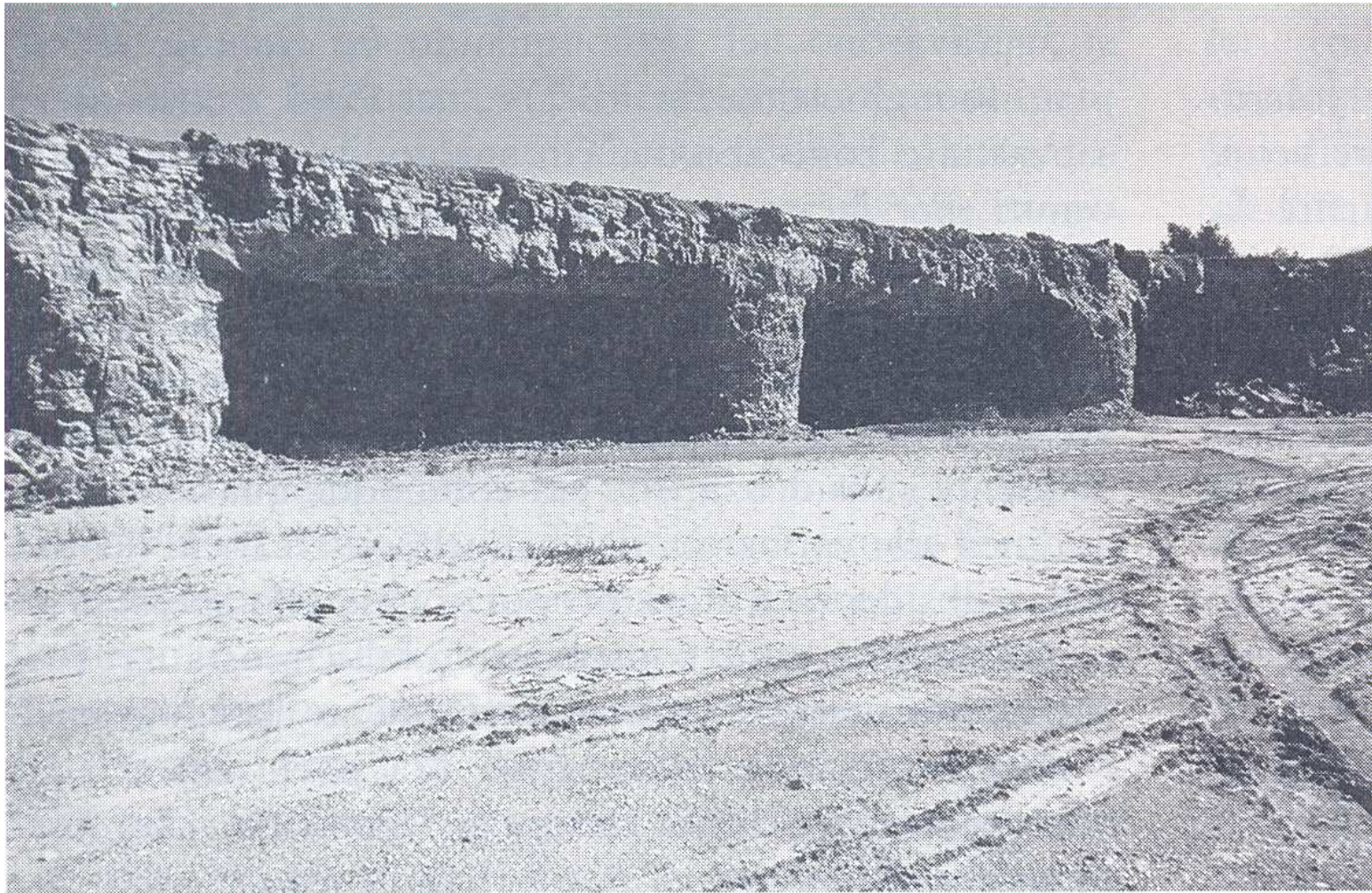


IMPATTO AMBIENTALE

Estrazione di metalli e carbone

Vi sono vari metodi per l'escavazione sotterranea dei depositi metalliferi e di carbone. Uno di questi è l'estrazione parziale, in cui vengono lasciati dei pilastri per sostenere la galleria. Questi col passar del tempo venivano assottigliati il più possibile e in parte eliminati verso la fine dell'attività della miniera il che provocava dei crolli con risultante subsidenza in superficie.





• Subsidenza dovuta all'estrazione mineraria

Abbassamento del piano di campagna in maniera sia lieve che rapida, dovuto al cedimento delle gallerie usate per l'estrazione mineraria.

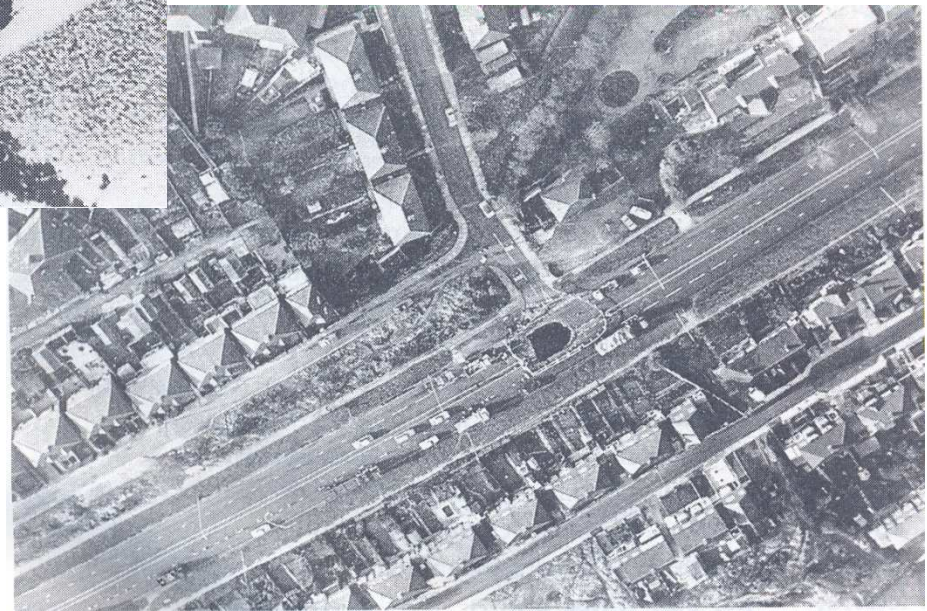
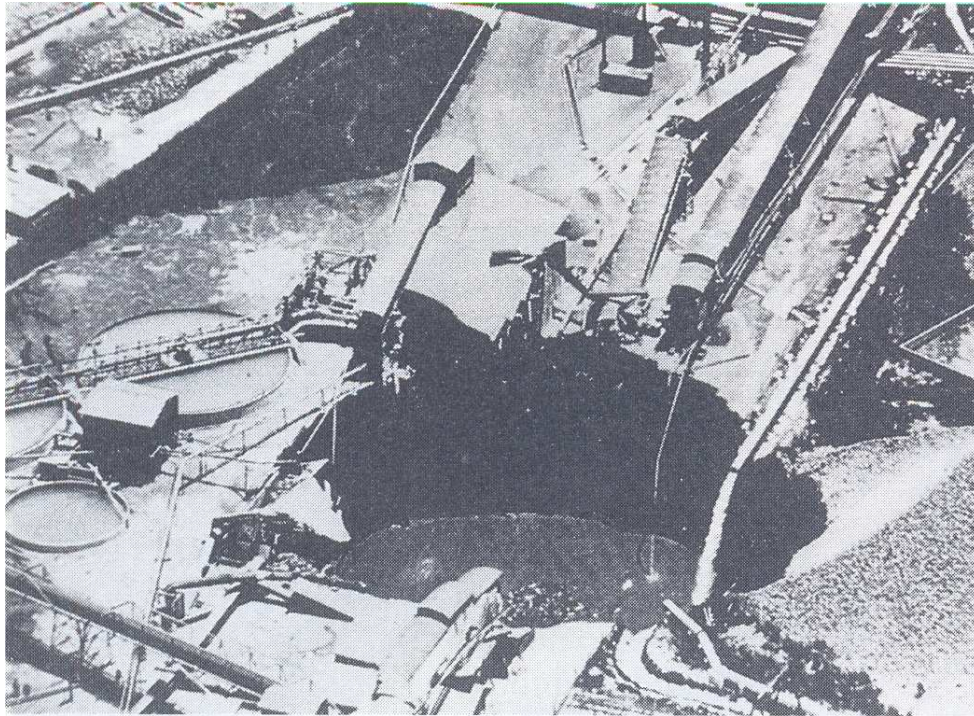
Cause crollo gallerie:

- Pilastri insufficienti o mal disposti
- Assenza di pilastri, asportati

a fine lavori

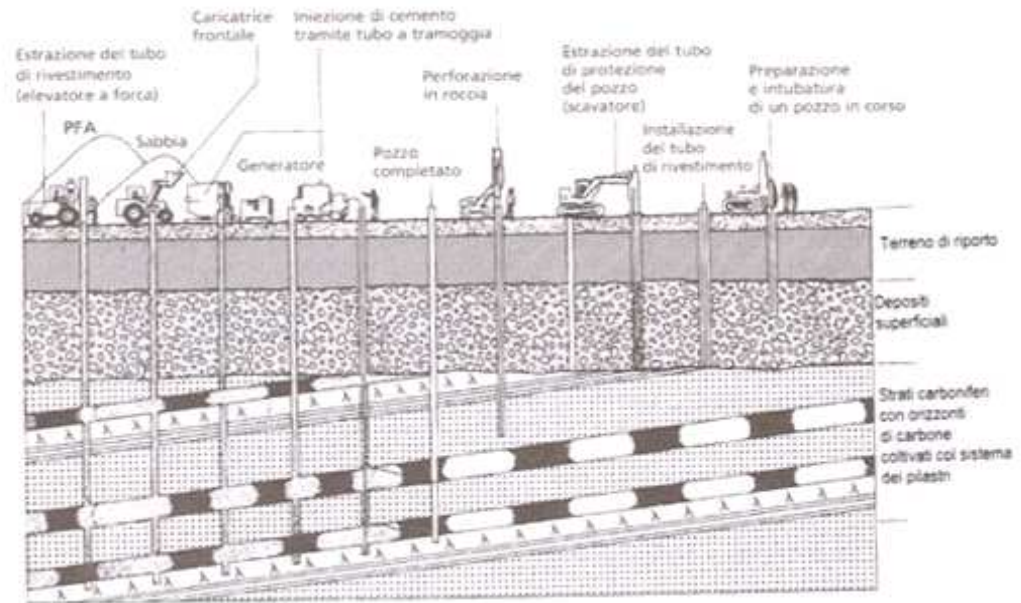


Possibili problemi derivanti dall'escavazione a pilastri



Metodi di mitigazione della subsidenza

- Non costruire
- Più pilastri
- Estrazione superficiale: asportare lo strato di copertura
- Fondazioni rinforzate tramite pali
- Platea di fondazione
- Riempimento dei vuoti: materiali di miniera, iniezioni idrauliche di sabbia o cemento



Estrazione areale: viene utilizzata in terreni pianeggianti o leggermente ondulati. Viene rimosso il cappellaccio, si estrae il carbone e si ripristina il territorio. Il terreno superficiale è accantonato e accumulato in speciali aree e riportato nell'area di scavo una volta completata l'estrazione.

Estrazione sommitale: comporta la rimozione e la sistemazione di tutti i materiali lapidei ed incoerenti posti al tetto di un orizzonte carbonifero. Un grosso problema che sorge con questo sistema estrattivo è dato dalla sistemazione delle discariche che include l'uso di prodotti chimici cancerogeni per il lavaggio e la depurazione del carbone prima della commercializzazione, nonché di metalli tossici come mercurio e arsenico.

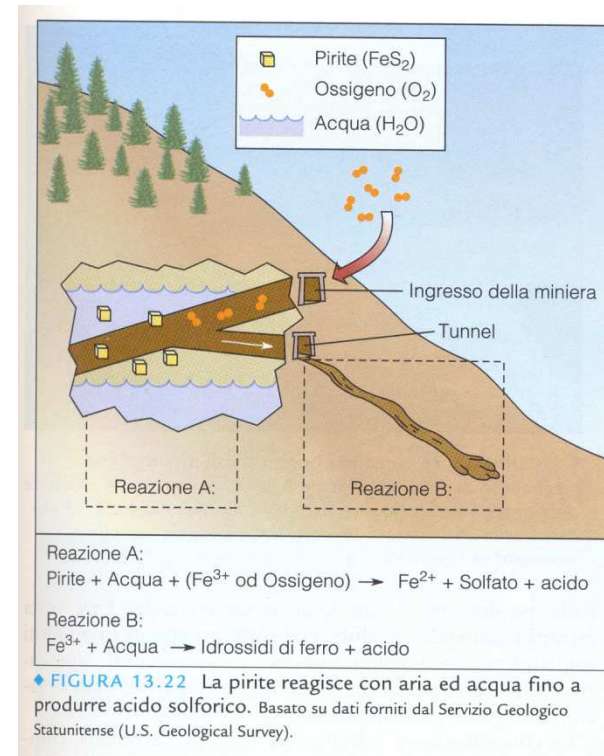


VIVIAN STOCKMAN

◆ FIGURA 13.20(b) Le scorie derivate dall'estrazione del carbone con il metodo di scavo sommitale formano un'enorme riempimento nella Birchton Curve Valley, Virginia Occidentale. Queste colmate hanno sepolto molti chilometri di corsi d'acqua, eliminando la vegetazione acquatica, i pesci e gli habitat di altre specie selvatiche ed allontanando intere comunità che hanno vissuto per generazioni lungo le vallate, ora sepolte, della Virginia Occidentale.

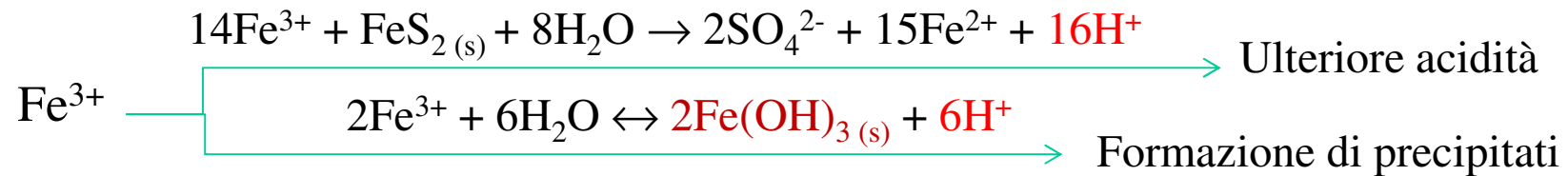
Gli effetti dell'attività estrattiva sotterranea sono la subsidenza del terreno, il crollo delle rocce di copertura nelle aree minerarie dismesse e il deflusso acido di miniera.

Il deflusso acido è il più serio problema di carattere ambientale. Questo deflusso può manifestarsi quando siano coltivati giacimenti di carbone con alta concentrazione di zolfo o di solfuri metallici. La reazione della pirite e di altri solfuri con acqua ricca in ossigeno produce anidride solforosa che successivamente reagisce con l'acqua stessa a formare acido solforico. Questo fatto acidifica le acque superficiali e sotterranee e accelera la lisciviazione, la liberazione e la dispersione nell'ambiente circostante di ferro, zinco ed altri metalli tossici.





AMD: Drenaggio Acido di Miniera



Effetti AMD:

- Abbassamento pH
- Formazione precipitati che coprono la superficie dell'acqua
- Contaminazione di metalli tossici



Trattamenti deflusso acido di miniera

- Metodo passivo

Zone umide: ecosistemi naturali o artificiali, caratterizzati dalla presenza di acqua e terreni saturi.



Caratteristiche:

- Diminuzione acidità
- Precipitazione metalli, intrappolati nella zona umida
- Bassi costi, poiché si autogestisce

- Metodo attivo

Aggiunta di agente chimico neutralizzante, come la calce o il calcare.

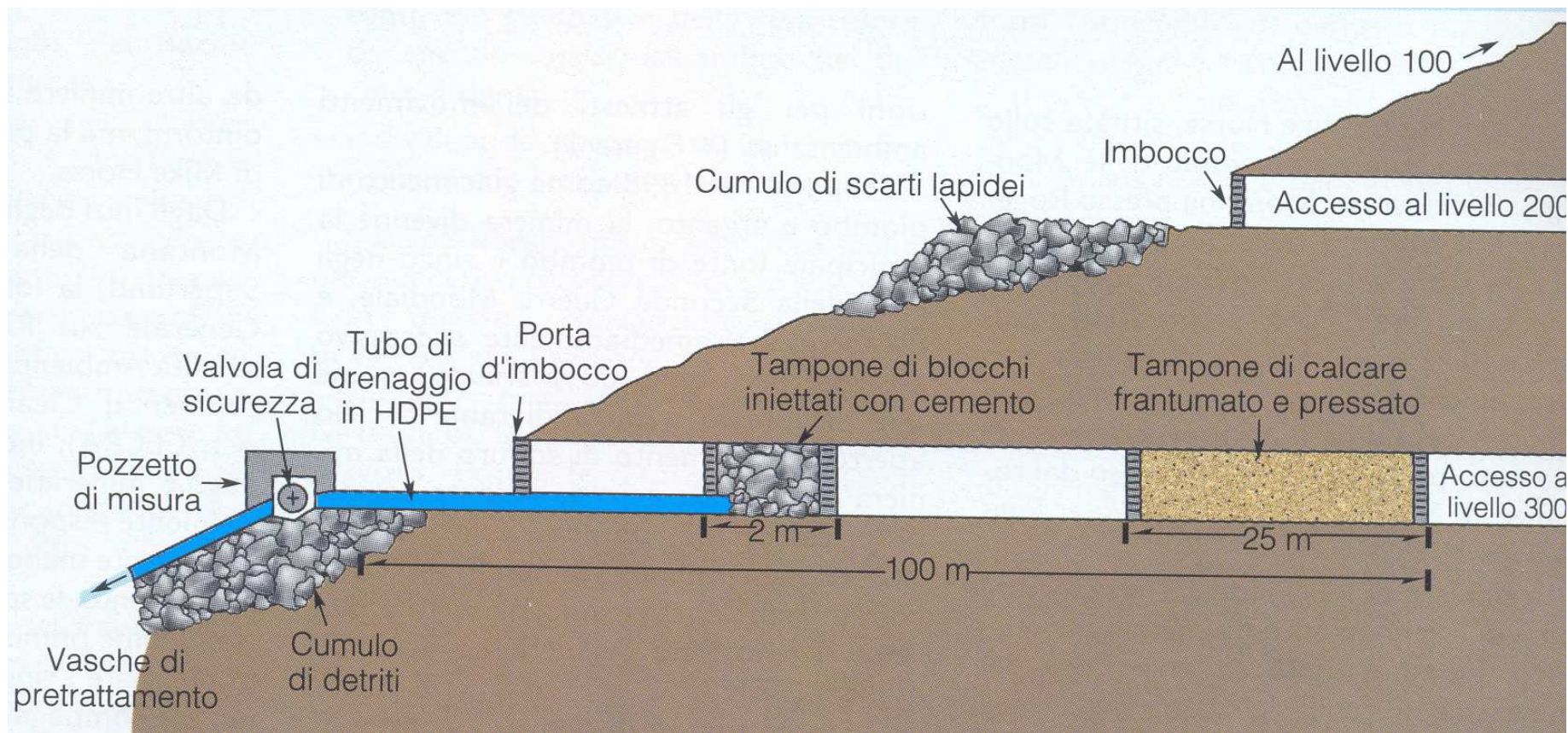
Caratteristiche:

- Neutralizzazione mirata
- Precipitazione metalli e rimozione selettiva (membrane, reagenti flocculanti)

▪ Impianto apposito:
elevati costi di installazione, manutenzione e gestione

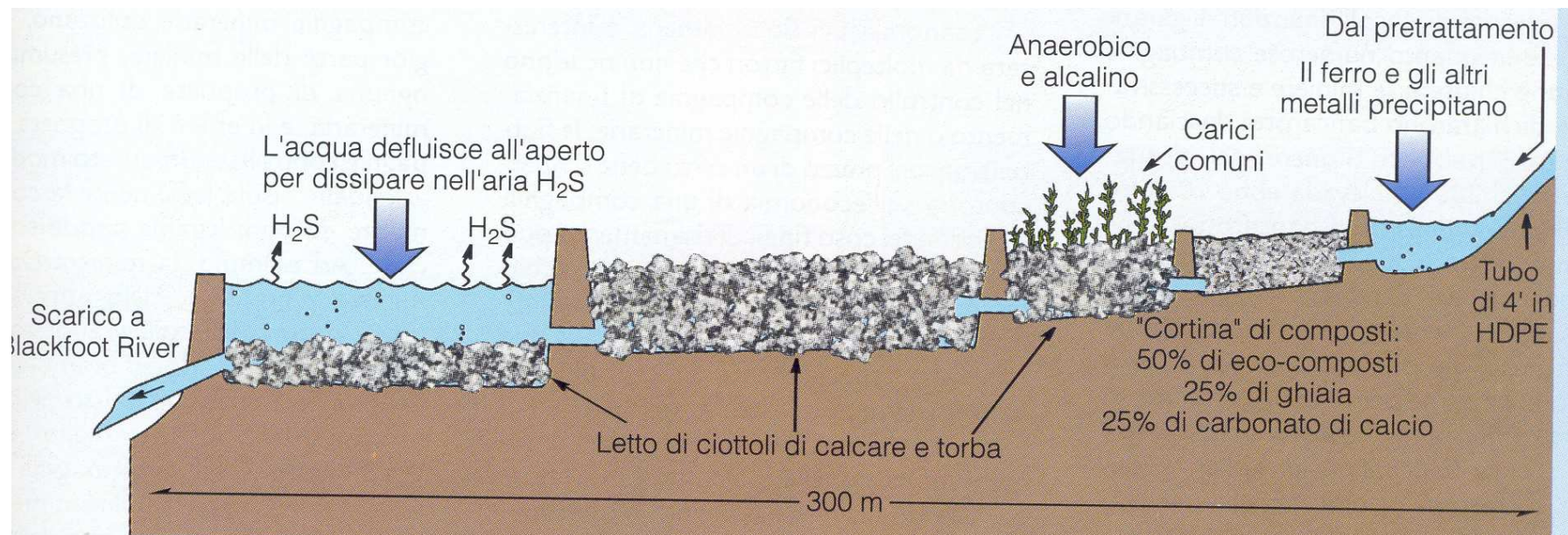


- Formazione di fanghi potenzialmente inquinanti



Il deflusso acido si accumula dietro un'ostruzione di tonnellate di calcare frantumato che crea un ambiente che neutralizza l'acido e fa precipitare ferro e altri metalli. Da qui l'acqua è convogliata ad una cavità dove una valvola ne controlla lo scarico in una struttura in cui l'effluente della miniera è areato per poi scorrere nei bacini di pretrattamento. I bacini sono rivestiti da polietilene impermeabile ad alta resistenza (HDPE); qui l'acqua ossigenata e depurata rimane per 4 giorni durante i quali gli idrossidi di ferro e altri metalli precipitano sotto forma di fanghi.

Ogni anno si accumulano circa 200 metri cubi di fanghi. Che vengono rimossi e posti in discarica. Lo scarico è riversato in una zona umida artificiale con strutture bio-tecnologiche (composti e piante acquatiche) per rimuovere ulteriormente ogni rimanente traccia di metalli tossici.



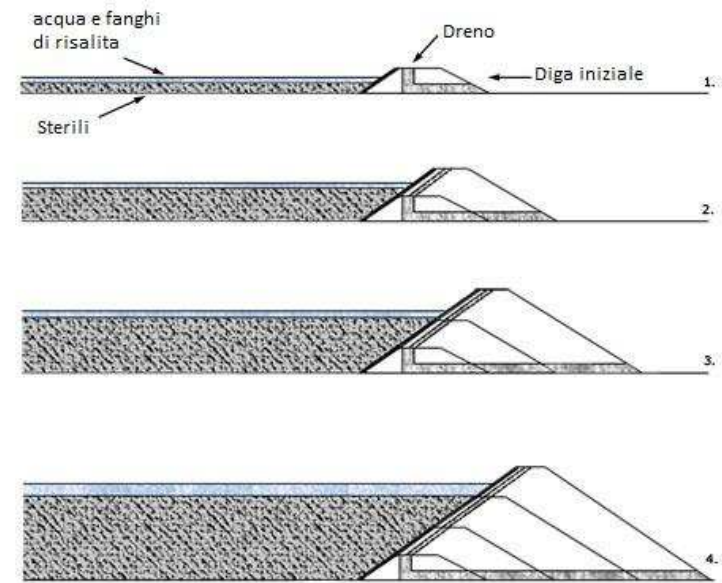
Deposito dei rifiuti di miniera

Tipi di rifiuti di miniera

- Inerti
- Sterili

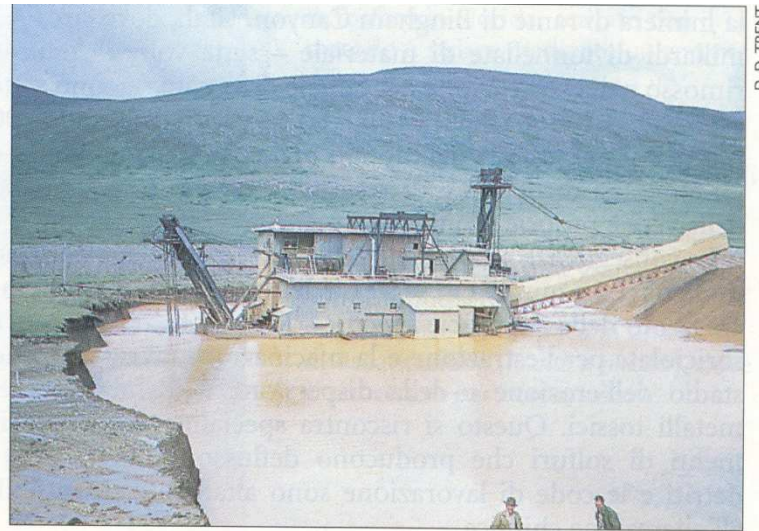
Possibili depositi

- Cumuli
- Vasche di decantazione
- Riempimento miniere abbandonate



Impatti dell'attività estrattiva in superficie.

L'estrazione con metodo idraulico è sostanzialmente un'attività del passato, ma il dragaggio sotto falda di materiale sciolto mediante chiatte o zattere continua ancora. Il dragaggio asporta il suolo, lascia una scia di massi e ciottoli e danneggia gli ecosistemi. Le aree possono essere risanate rimodellando i cumuli di scorie e ricoprendo la superficie con terriccio.

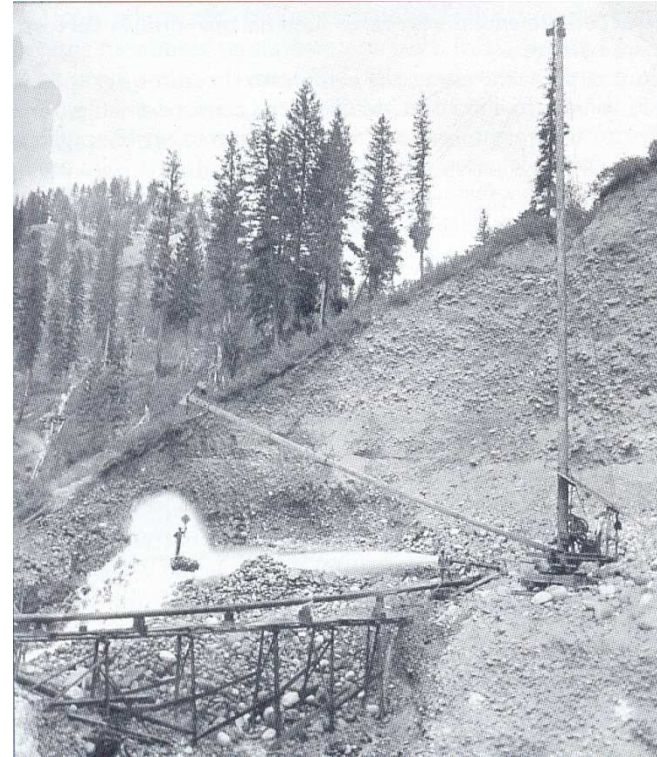


◆ FIGURA 13.24 24 Estrazione in un giacimento alluvionale (*placer*) mediante una draga munita di nastro trasportatore a pale presso Platinum, Alaska, 1958. La draga ha operato dagli inizi degli anni '30 fino al termine degli anni '70; durante tale periodo il sito minerario è stato il maggior produttore di metalli del gruppo del platino nel Nord America.

Nella coltivazione idraulica un getto ad alta pressione è spinto attraverso un apposito boccaglio contro i fianchi dei rilievi. Questo metodo richiede la costruzione di fossati, serbatoi, condotti verticali e condutture varie.

La coltivazione a strisce è usata comunemente quando la risorsa mineraria è presente in strati paralleli prossimi alla superficie come i giacimenti di fosfati. Dopo la rimozione degli strati di fosforo, lo scavo viene ritombato per riportare l'area al suo aspetto originario.

Coltivazione a cielo aperto: devastante per il paesaggio.



Impatti del trattamento dei minerali

La flottazione è largamente usata particolarmente per il recupero di solfuri metallici. Dopo la frantumazione e la concentrazione, si aumenta la bagnabilità (minore o maggiore predisposizione ad aderire su bolle d'aria) delle particelle dei minerali indesiderati trattando chimicamente (idrocarburi liquidi) il materiale frantumato per assicurarsi che i minerali indesiderati si depositino. Dopodiché viene insufflata aria nella miscela di minerali frantumati e acqua così formando una schiuma che raccoglie il materiale desiderato di bassa bagnabilità. Successivamente la schiuma viene essiccata. I materiali non desiderati vengono poi fatti defluire.

Separazione per gravità sono impiegati per il recupero di minerali ad alta densità come oro, metalli del gruppo del platino, tungsteno e stagno. Le particelle di minerale mescolate all'acqua vengono fatte fluire attraverso una serie di traversini collocati in una canaletta. I traversini catturano le particelle ad alta densità.

Metodi chimici

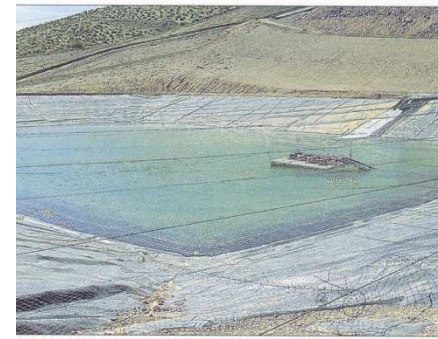
L'estrazione mediante cianuro (cianurazione) si utilizza per recuperare oro e argento. Il minerale proveniente da una miniera a cielo aperto è frantumato e polverizzato, raccolto in cumuli posti sopra uno strato impermeabile di argilla o teli di plastica ed irrorato con una soluzione di cianuro diluito. La soluzione scioglie l'oro e l'argento man mano che filtra attraverso il cumulo fino alla vasca di raccolta. L'oro e l'argento sono poi recuperati dalla risultante soluzione per adsorbimento con carbone di legna attivo. I metalli preziosi, in cui il carbone di legna è rimosso successivamente mediante tecniche chimiche ed elettriche, sono fusi e colati in stampi fino a formare dei lingotti.

Fusione

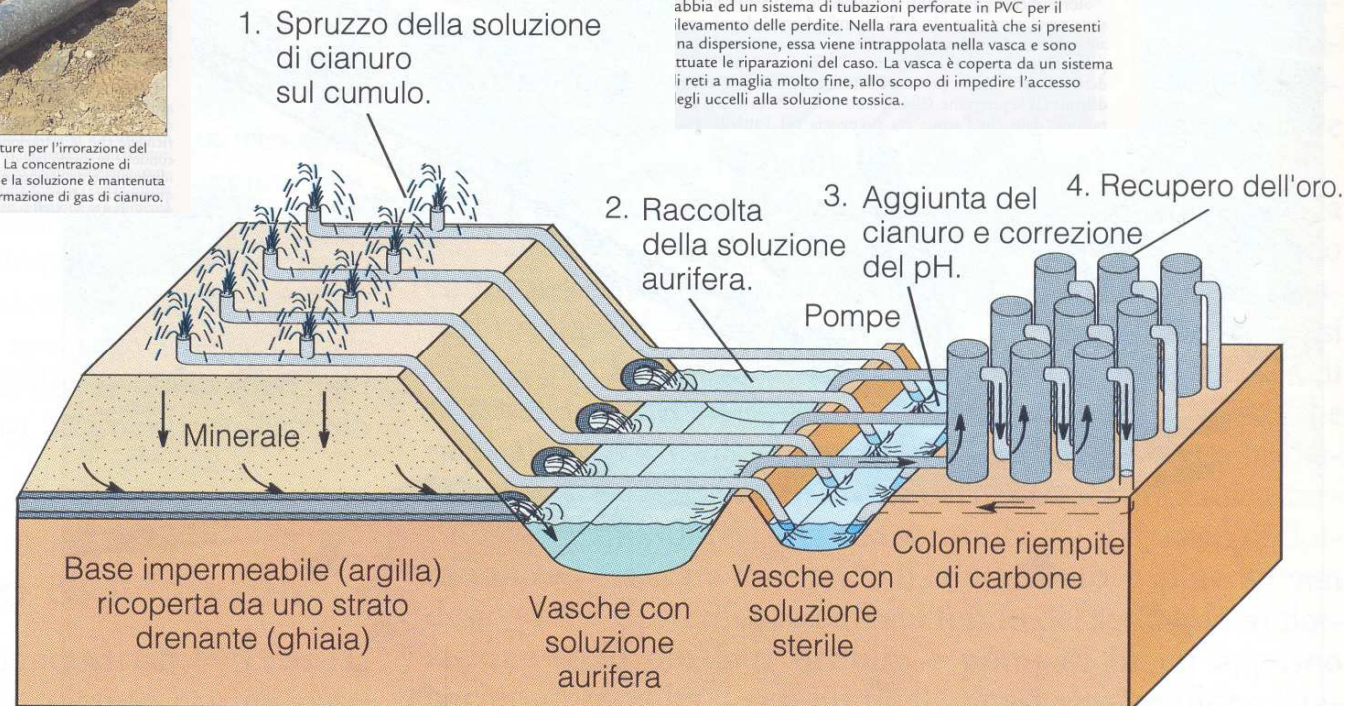
Fumi solforosi. E vari altri processi come scaricare i detriti nei corsi d'acqua o nei bacini di decantazione.



♦ FIGURA 13.30 Sistema di tubature per l'irrorazione del cianuro sul cumulo di lisciviazione. La concentrazione di cianuro è di 200 parti per milione, e la soluzione è mantenuta altamente alcalina per evitare la formazione di gas di cianuro.



♦ FIGURA 13.31 Un tipico bacino di decantazione per la raccolta della soluzione di cianuro contenente oro disciolto da un cumulo di lisciviazione. La fronte del cumulo è in alto a sinistra nella fotografia. Le tubature sul lato opposto della vasca drenano la soluzione ricca d'oro dalla base del cumulo di lisciviazione. La vasca è impermeabilizzata da due strati di polietilene ad alta densità, sotto ai quali si trova uno strato di sabbia ed un sistema di tubazioni perforate in PVC per il rilevamento delle perdite. Nella rara eventualità che si presenti una dispersione, essa viene intrappolata nella vasca e sono effettuate le riparazioni del caso. La vasca è coperta da un sistema di reti a maglia molto fine, allo scopo di impedire l'accesso degli uccelli alla soluzione tossica.



R word

Materiali di scarto

- Riutilizzo
- Riciclaggio
- Recupero risorse
- Recupero energie

Siti di estrazione

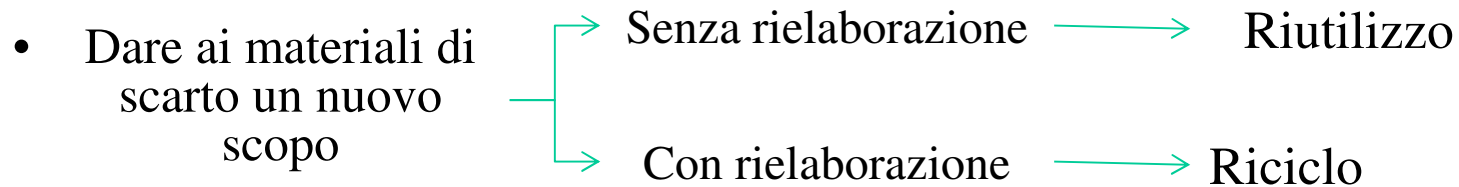
- Riapertura miniera (remining)
- Bonifica (rehabilitation)
- Ripristino
- Rimedio
- Ricostruzione

I vari processi di ripristino dell'ecosistema come quelli relativi al amd e le varie tecniche di smaltimento degli scarti di miniera si possono riassumere con il concetto di “R word”.

L'r word è l'insieme dei trattamenti mirati allo smaltimento dei materiali di scarto e al recupero del sito estrattivo.

Si possono vedere vari tipi di trattamenti, tutti che iniziano con la lettera R, ed è per questo motivo che si usa il termine Rword.

Riutilizzo e Riciclo



Inerti:

- Riempimento vuoti
- Tappi per la copertura di terreni
- Aggregati strade
- Componenti nei materiali da costruzione

Sterili:

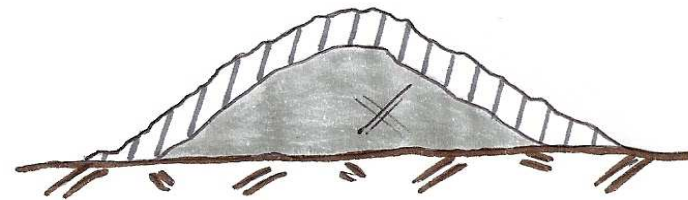
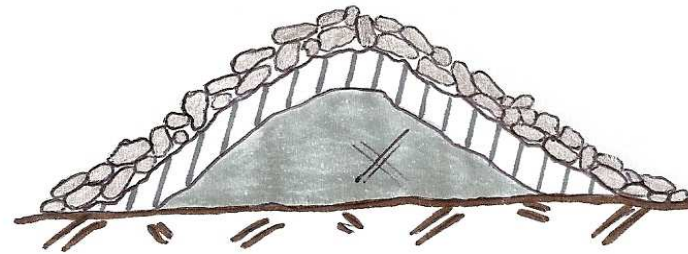
- Riempimento vuoti tramite iniezione
- Estrazione di minerali o metalli
- Componenti nei materiali da costruzione

Bonifica

Serie di operazioni per il miglioramento della zona estrattiva abbandonata con la presenza di depositi di rifiuti potenzialmente inquinanti

Cumuli di rifiuti di miniera attraversati da ruscelli

- Rimozione cumuli in zona asciutta
- Deviazione del ruscello
- Trattamento delle acque inquinate
- Ricoprimento cumuli evitando punti di ristagno
- Rivegetazione
- Rivestimento in roccia



Riapertura Miniera: Remining

Miniera abbandonata → Inquinamento acqua: Drenaggio Acido di Miniera

Studio elementi della miniera originale che causano degrado



Determinazione tecniche per diminuire il problema



Riapertura miniera



Soluzione problemi:

Isolare o eliminare le fonti inquinanti



Ulteriore sfruttamento miniera

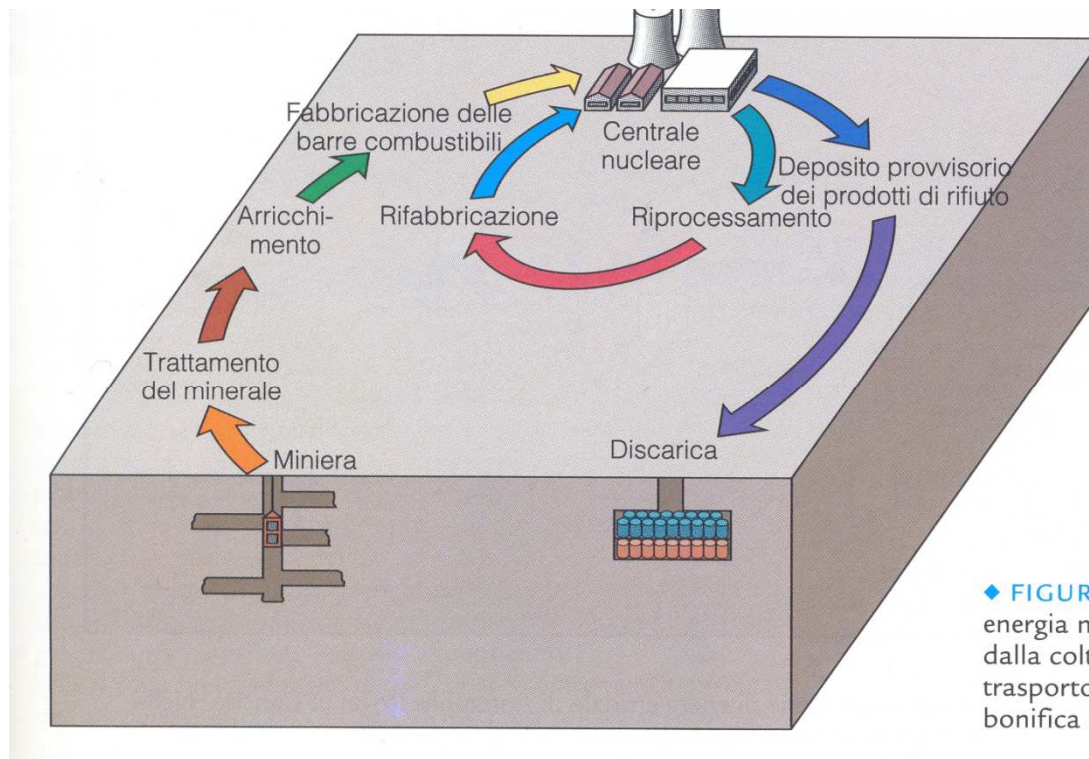


Daylighting



ENERGIA NUCLEARE

I reattori nucleari generano energia che deriva dalla fissione dell'uranio. I nuclei dell'uranio hanno 92 protoni ed un numero di neutroni variabile da 142 a 146. L'isotopo uranio-238 ha 146 neutroni ed è quasi stabile. Il successivo isotopo comune ^{235}U è invece così instabile che un neutrone penetrando nel suo nucleo può causarne la completa scissione tramite un processo definito fissione. La fissione avviene quando un nucleo fissile assorbe un neutrone e si scinde in elementi più leggeri e al contempo sono emessi altri neutroni ed energia.



◆ FIGURA 14.25 Il ciclo per la produzione di energia nucleare. Le fasi principali sono costituite dalla coltivazione mineraria, dall'arricchimento, dal trasporto, dalla generazione di energia elettrica, dalla bonifica e dalla discarica dei rifiuti radioattivi.

The uranium-238 decay chain

Atomic number

82

83

84

85

86

87

88

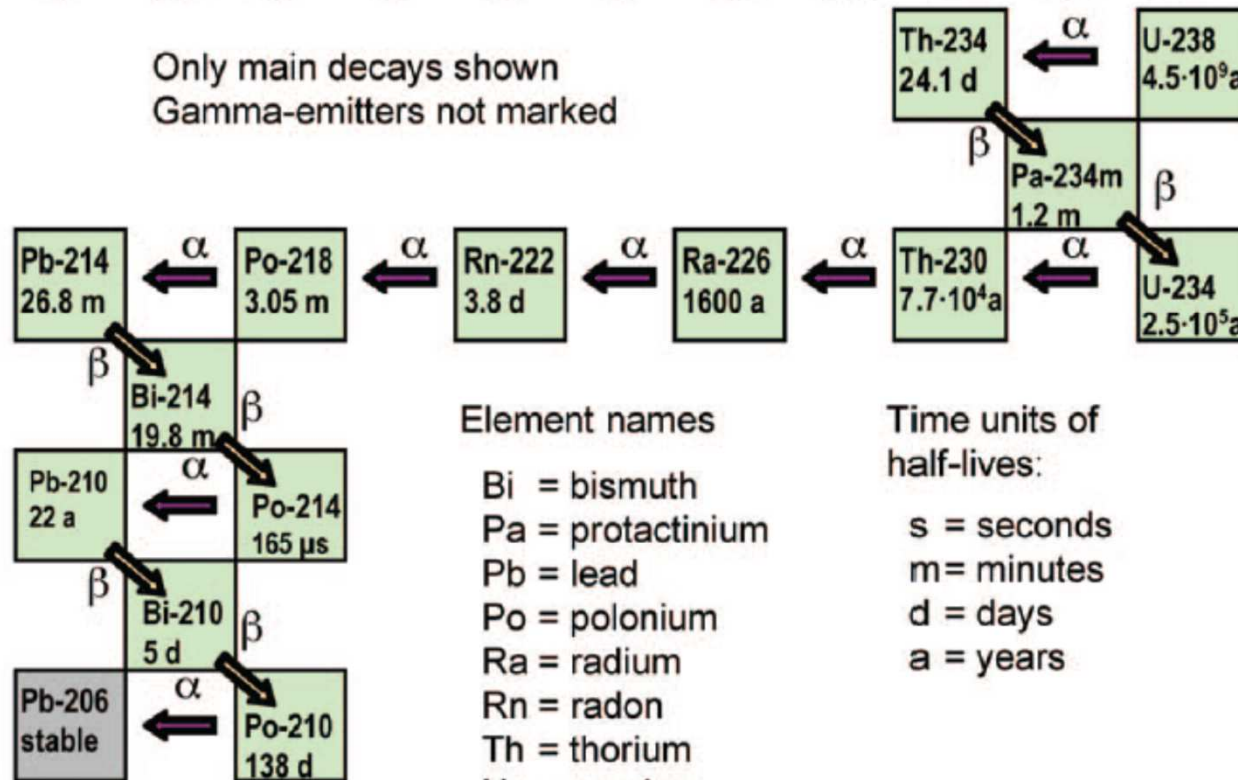
89

90

91

92

Only main decays shown
Gamma-emitters not marked



Element names

Bi = bismuth
Pa = protactinium
Pb = lead
Po = polonium
Ra = radium
Rn = radon
Th = thorium
U = uranium

Time units of half-lives:

s = seconds
m = minutes
d = days
a = years

TABLE 1 NUMBER AND SIZE OF CLOSED AND OPERATING URANIUM MINES AND TAILINGS PILES WITH CURRENT STATUS INDICATED (AFTER IAEA 2004)

Continent	Country	U Mining since	Number of mines	Tailings volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Status
North America	United States	1898	3900	120	Major rehabilitation program completed 1979–1999
	Canada	1933	24	ca. 30	Old small sites mostly rehabilitated; major current producer from 3 mines and 3 mills
South America	Argentina	1950s	11	–	Mining and milling ceased; planning for rehabilitation in progress
	Brazil	1981	1	2.17	Mining and milling ended 1997; restoration pending
Australia	Australia	1930s	25	48.6	Old small sites mostly rehabilitated; major current producer from 2 mines
Asia	Kazakhstan	1955	19	209	Only in situ leach mining; hard-rock mining ceased
	Uzbekistan	–	4	30	–
	Krgystan	–	4	–	Many mines closed in early 1990s; dumps unremediated
	China, India, Japan	–	13	0.03	–
Europe	Germany	1946	9	161	Production ceased 1990; major WISMUT clean-up in progress
	Ukraine	1950s	6	130	Production continues from one mill; restoration activity, started in 1991, has paused due to economic difficulties
	Russia	1950	21	54.1	Production continues; old mines rehabilitated; rehabilitation and decommissioning plans for operating plants being reviewed
	France	1950s	180	47.3	Mining and milling stopped; old sites being progressively rehabilitated since 1990
	Czech Republic	1948	13	46.8	Reduced production matched to national energy needs; rehabilitation of closed sites underway
	Hungary, Bulgaria, Estonia, Romania, Portugal, Spain, Sweden, Slovenia, Poland, Finland	–	111	59.15	Production ceased or is very low in most countries; rehabilitation is on-going
Africa	Gabon, Namibia, Dem. Rep. of Congo, South Africa	–	43	–	–
TOTALS			4384	938	



FIGURE 2 (A) Aerial view of the open pit at the Ecarpière mine site (France) during operation. The mine was operated between 1957 and 1990. (B) After operation and remediation. Site remediation was completed within 7 years. PHOTOS COURTESY OF NUCLEAR ENERGY INSTITUTE (NEI)

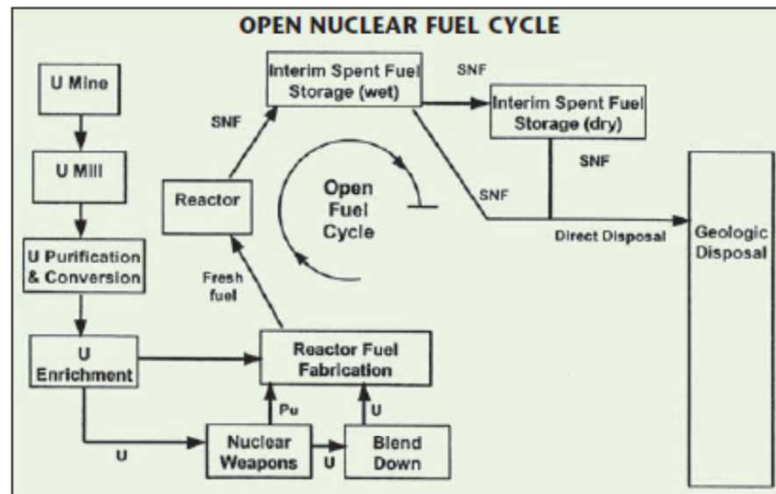


FIGURE 1 Schematic illustration of the ideal open nuclear fuel cycle. There is no reprocessing. Typical nuclear burn-ups of 40 MegaWatt days/kg of uranium (MWd/kg of U) result in a conversion of the initial uranium in the fuel to ~1 atomic percent transuranium elements, mainly Pu, and ~3 atomic percent fission products, such as ^{137}Cs and ^{90}Sr . The spent nuclear fuel still contains fissile nuclides, such as ^{235}U and ^{239}Pu (created in-reactor by neutron capture reactions on ^{238}U). A typical light water reactor will create 20 metric tonnes of spent nuclear fuel per year. The current inventory of spent nuclear fuel in the United States is approximately 50,000 metric tonnes. Reprinted with permission, from *End Points of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in Russia and the United States* by the National Academy of Sciences (National Research Council 2003).

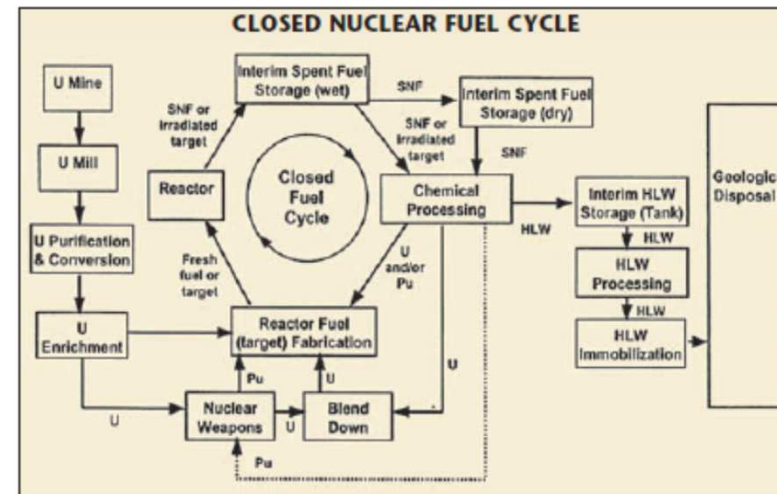


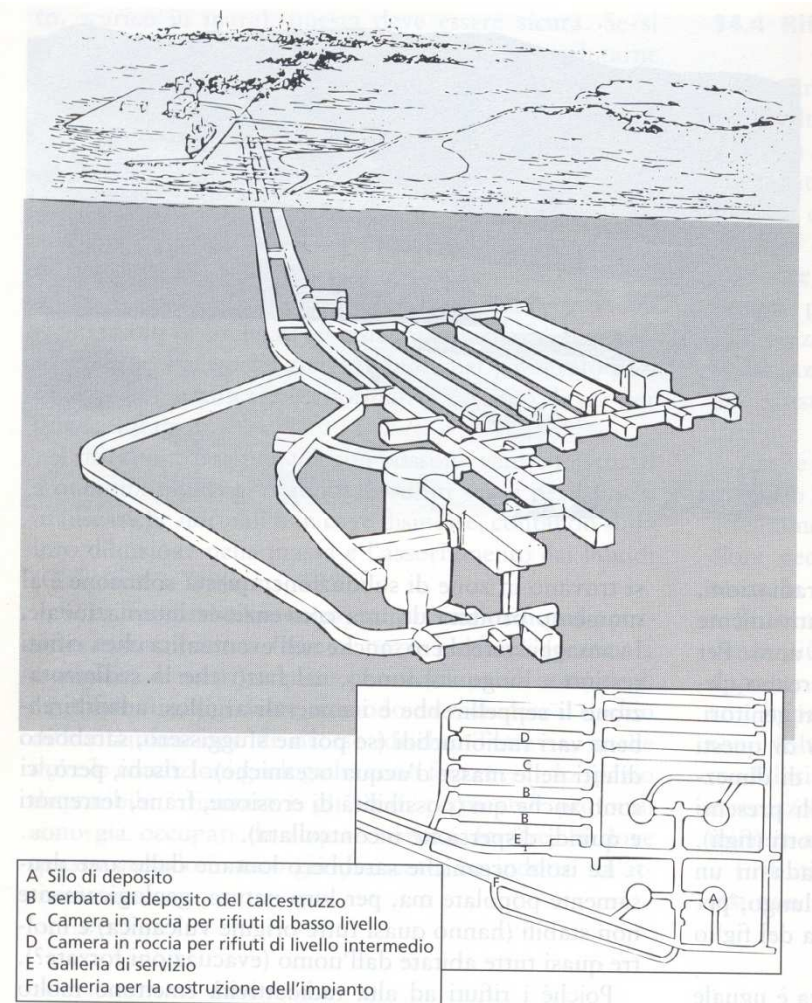
FIGURE 2 Schematic illustration of the ideal closed nuclear fuel cycle. Typically, the PUREX process is used to reclaim fissile ^{235}U and ^{239}Pu . Advanced processing technologies may allow for the separation of specific radionuclides that then may be immobilized into durable waste forms. Under normal circumstances, the spent nuclear fuel will be placed in interim storage for just a few years prior to reprocessing. The exact characteristics of the nuclear waste stream depend on the type of fuel, the degree of burn-up, and the type of reprocessing technology. Another important source of the fissile material is dismantled nuclear weapons, e.g. highly enriched ^{235}U can be blended down or ^{239}Pu mixed with uranium to form a mixed-oxide fuel (MOX). SNF: spent nuclear fuel; HLW: high-level waste. Reprinted with permission from *End Points of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in Russia and the United States* by the National Academy of Sciences (National Research Council 2003).

I rifiuti radioattivi possono essere di livello basso, medio e alto.

Quelli di basso livello contengono piccole quantità di radioattività e non presentano un pericolo significativo per l'ambiente se manipolati come si deve. Questi rifiuti possono essere sepolti al sicuro in siti controllati in cui le situazioni geologiche e idrogeologiche limitano la migrazione dei materiali radioattivi.

La tendenza più recente è quella di fornire le apposite discariche di barriere artificiali in calcestruzzo. I siti indicati sono volte sotterranee, volte non interrate, contenitori modulari di calcestruzzo posti in trincee, bunker di calcestruzzo rivestiti di terra, pozzi trivellati e cavità di miniere abbandonate.

I rifiuti di livello intermedio provengono da impianti nucleari e consistono di oggetti come i filtri usati per depurare l'acqua dei reattori o parti sostituite dei macchinari. Questi rifiuti debbono restare immagazzinati per 100 anni.



I rifiuti radioattivi di alto livello non possono essere resi non radioattivi e la loro sistemazione deve tener conto del fatto che l'emissione di radiazioni potrà prolungarsi per circa 24000 anni! Vi sono due tipi di rifiuti ad alto livello: barre di combustibile esaurito e materiali provenienti dal ritrattamento. Entrambi sono attualmente isolati in contenitori temporanei (piscine). Per quanto riguarda possibilità di stoccaggio duratura si parla di calotte glaciali, fosse oceaniche, isole oceaniche e lo spazio extraterrestre!!!

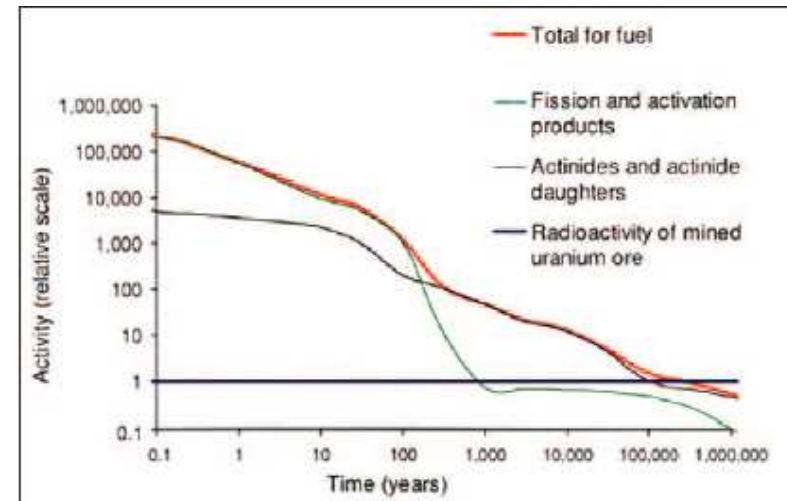


FIGURE 1 Relative radioactivity of spent nuclear fuel with a burn-up of 38 MWd/kg U. The activity is dominated by fission products during the first 100 years, thereafter by actinides (Hedin 1997).

Calotte glaciali: presunto vantaggio è la lontananza dalla civiltà. Rischi: dinamica e stabilità delle masse glaciali.

Fosse oceaniche: il materiale si troverebbe in zone di subduzione e quindi rientrerebbe nel mantello. Vantaggi: i rifiuti restano sepolti per molto tempo, i fanghi li sommergerebbero e i minerali argillosi potrebbero adsorbire dei radionuclidi. Rischi: erosione, frane, terremoti con conseguente dispersione incontrollata.

Isole oceaniche: geologicamente non stabili

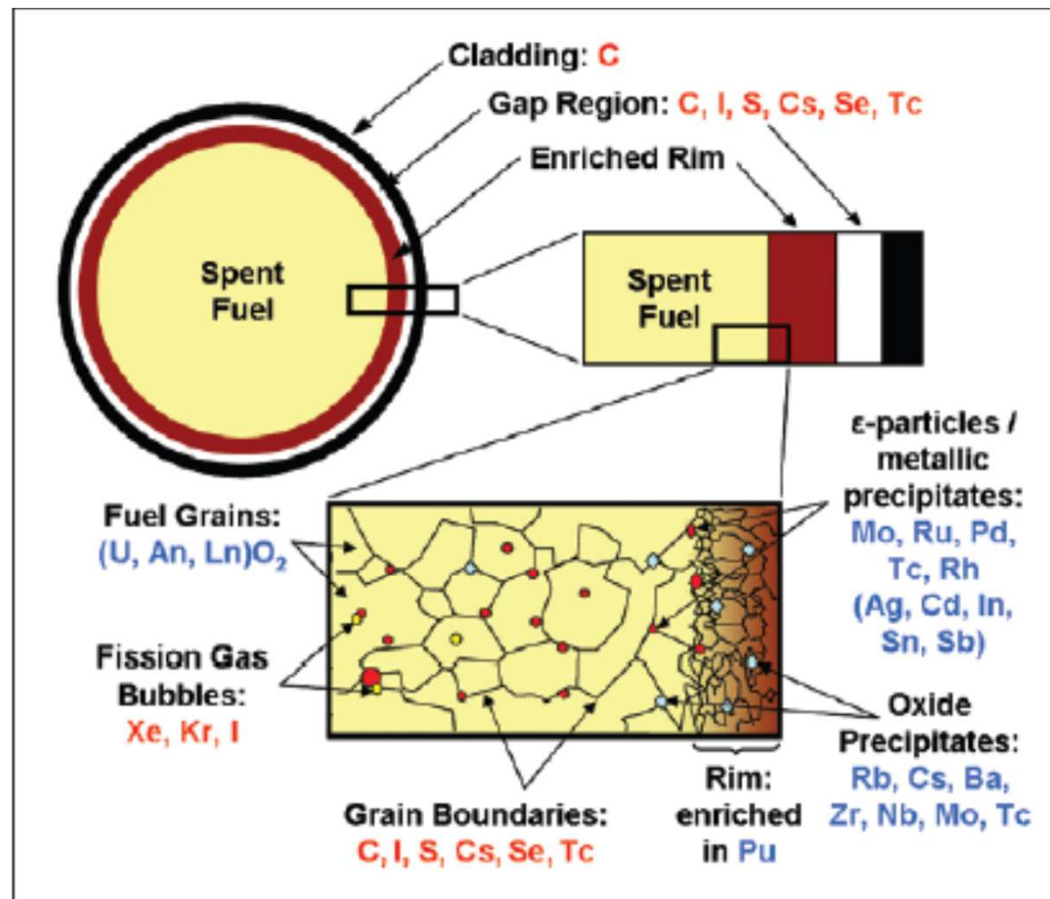


FIGURE 2 Schematic illustration of the microstructure of spent fuel and the distribution of actinides and fission products following burn-up in a reactor. Red labels indicate nearly instantaneous release upon contact with water; blue indicates slower release rates. An = actinides and Ln = lanthanides in solid solution in the UO_2 matrix. Figure adapted from Buck et al. (2004) and Shoesmith (2000)

Questi rifiuti emettono molto calore e quindi si è pensato di metterli in cavità sotterranee allo stato di soluzioni o fanghiglie. Evaporata l'acqua o altri solventi, il calore fonderebbe la roccia. Dopo un millennio la miscela rifiuto-roccia, raffreddandosi tornerebbe allo stato solido. Quindi i rifiuti si autocapsulerebbero in una matrice vetrosa.

Altrimenti la soluzione potrebbe essere la collocazione in camere sotterranee profonde, scavate appositamente in formazioni geologiche stabili e impermeabili con barriere multiple. Un esempio sarebbe costituito da capsule poste entro contenitori che sarebbero isolati da barriere artificiali (terrapieni, diaframmi di calcestruzzo) rispetto alle rocce circostanti.

TABLE 2 SUMMARY OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF INDIVIDUAL PHASES MEASURED AGAINST POTENTIAL SELECTION CRITERIA AND OTHER MEANS OF EVALUATION (E.G. NATURAL SAMPLES)

	Aqueous durability	Chemical flexibility	Waste loading	Radiation tolerance	Volume swelling	Natural analogues
Perovskite (Ca,Sr)TiO ₃	Low	Medium	Low	Medium	High	Yes
Pyrochlore Gd ₂ (Ti,Hf) ₂ O ₇	High	High	High	Low-high	Medium	Yes
Zirconolite CaZrTi ₂ O ₇	High	High	Medium	Low-medium	Medium	Yes
Zircon ZrSiO ₄	High	Medium	Low (?)	Low	High	Yes
Monazite LnPO ₄	High	Medium	High	High	Low	Yes
Zirconates Gd ₂ (Zr,Hf) ₂ O ₇	High	Medium	Medium	High	Low	No
Zirconia (Zr,Ln,Act)O _{2-x}	High	Medium	Medium	High	Low	No
Brannerite UTi ₂ O ₆	Medium	Medium	High	Low	?	Yes
Crichtonite Ca(Ti,Fe,Cr,Mg) ₂₁ O ₃₈	?	High	Medium	Low (?)	?	Yes
Murataite Zr(Ca,Mn) ₂ (Fe,Al) ₄ Ti ₃ O ₁₆	High	High	Medium	Medium	?	Rare
Garnet Ca ₃ Zr ₂ (Al,Si,Fe) ₃ O ₁₂	?	High	Medium	Low	?	Yes*
Titanite CaTiSiO ₅	Medium	Medium	Low	Low	Medium	Yes
Minerals of the apatite group (e.g. brithollite)	Medium	Medium	Low	Low	Medium	Yes
Kosnarite NaZr ₂ (PO ₄) ₃	Medium	Medium	Medium	Low	?	Yes

* Natural garnets typically do not contain substantial amounts of Th or U.

FRENCH TWO-STAGE CONTINUOUS VITRIFICATION PROCESS

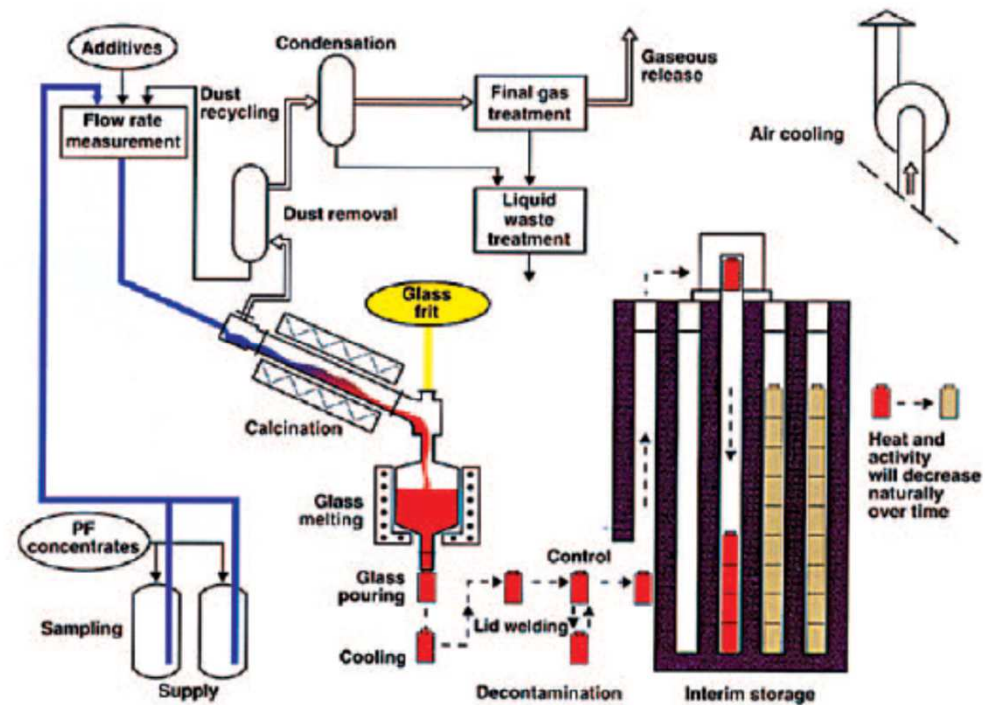


FIGURE 1 Flow sheet of the glass production process at AREVA NC's plants R7 and T7 in La Hague. AREVA NC, personal com-

Ambienti per deposito di scorie radioattive: devono essere asciutti o del tutto impermeabili, privi quindi di acqua circolante, esenti da attività vulcanica o erosiva, a rischio minimo di attività sismica.

Non esistono ammassi rocciosi assolutamente impermeabili, ma molti tipi di roccia si possono considerare praticamente impermeabili.

Rocce considerate come possibili depositi sono:

Sale: alta conducibilità termica che permette di dissipare velocemente il calore sviluppato dalla radioattività; la sua plasticità permette di autosigillare le fratture, non viene modificato dalla radioattività, non fornisce vie di accesso e di fuga ai fluidi. Problemi se ci sono intercalazioni pelitiche, faglie e acque sotterranee.

Granito e basalti: forniscono uno scudo adeguato contro le radiazioni, disperdono il calore, le quantità di acqua sono molto piccole.

NON TUTTE LE ARGILLE: possono essere rigonfiabili oppure perdere acqua ad alte temperature.

Nelle caverne profonde i rifiuti vanno comunque portati e non gettati, questo significa che devono essere convertiti in forma solida. Questi solidi dovrebbero essere praticamente insolubili. Attualmente si utilizza un vetro al borosilicato, dato che può incorporare rifiuti di varia composizione e ha una bassa solubilità. La capsula di vetro sarebbe rinchiusa in un contenitore metallico e avvolta da un involucro di cemento o argilla.

La scala degli incidenti nucleari

- ▶ **Livello 7** **Incidente molto grave, catastrofico**, con rilascio di materiale radioattivo **in un'area molto estesa**
(Cernobyl, in Ucraina, nel 1986, fusione del nocciolo)
- ▶ **Livello 6** **Incidente grave**, con **rilascio significativo di iodio 131**, necessarie contromisure
(Kyshtym, Unione Sovietica, nel 1957)
- ▶ **Livello 5** **Incidente** con **rilascio di materiale radioattivo** tale da richiedere **contromisure per la salute**
(Three Mile Island, in Usa, 1969, fu una fusione del nocciolo)
- ▶ **Livello 4** **Incidente con conseguenze locali, non** significative **all'esterno** dell'impianto
(Tokaimura, Giappone, nel 1999, morti e contaminati)
- ▶ **Livello 3** **Guasto**, con **impatto lieve** ed esposizione della popolazione inferiore ai limiti previsti.
(Centrale di Barsebaeck in Danimarca, nel 1993)
- ▶ **Livello 2** **Guasto** senza nessun impatto esterno
(Incidente di Civaux, in Francia, nel 1998)
- ▶ **Livello 1** **Anomalia** all'interno di un impianto senza alcuna fuga di materiale
(Centrale di Krsko, in Slovenia, il 30 marzo scorso)



Ad oggi, si sono verificati i seguenti incidenti nucleari che possono venire catalogati con la scala INES:

•**12 dicembre 1952 5° livello INES (Chalk River, Canada)** - Si tratta del primo incidente che ha interessato un reattore nucleare. L'evento interessò il cosiddetto reattore NRX presso i Chalk River Laboratories nei pressi di Ottawa. Durante alcuni test a causa delle incomprensioni tra il personale addetto al reattore furono inviati dati errati presso la sezione di controllo del reattore che causarono la parziale fusione nucleare del reattore. A causa del successivo surriscaldamento del refrigerante del reattore vi fu un'esplosione che provocò la fuoriuscita di liquido refrigerante contaminato che fu fatto confluire in una cava abbandonata per evitare la contaminazione del fiume Ottawa.

10 ottobre 1957, 5° livello INES, Windscale (Gran Bretagna) - Nella centrale nucleare di Windscale si assistette alla combustione lenta della grafite del reattore senza che i tecnici se ne rendessero conto, se non dopo un paio di giorni. A causa di ciò vi fu una fuga abbastanza consistente di radioattività. Attraverso la ciminiera della centrale, infatti, i fumi finirono in atmosfera e si dovettero prendere misure precauzionali per la popolazione inglese. In seguito all'incidente, comunque, ci si prodigò per la progettazione di misure di sicurezza più efficaci in Gran Bretagna.

•**28 marzo 1979, 5° livello INES, Three Mile Island (Pennsylvania, USA)** - L'incidente di Three Mile Island causò un rilascio di radioattività nell'ambiente a seguito dello scarico all'esterno di un eccesso di vapore che aveva saturato il circuito primario. In seguito al surriscaldamento del reattore vi fu una fuga di radionuclidi gassosi quali lo Xeno e vapori di Iodio. La popolazione della città poco distante che contava 140 000 persone venne evacuata per precauzione e secondo le stime ufficiali non vi furono conseguenze sanitarie. Tuttavia, la parziale fusione del nocciolo a causa del surriscaldamento dello stesso rese inutilizzabile il reattore, con conseguenti gravi danni finanziari per i proprietari della centrale.

•**13 settembre 1987, 5° livello INES, Goiânia (Brasile)** - L'incidente di Goiânia causò la morte di 4 persone, mentre 6 ricevettero dosi radioattive. L'incidente fu causato da un apparecchio di radioterapia abbandonato in un ospedale che fu recuperato da alcuni ferrivecchi per rivenderne il metallo. Il cesio-137, prodotto attivo dell'apparecchio, fu disperso nell'ambiente attirando numerosi curiosi a causa della luce blu prodotta dalla ionizzazione dell'aria circostante. Oltre alle 4 persone morte nel giro di 75 giorni, 249 persone furono contaminate. Fu necessario rimuovere 3 500 m³ di scorie radioattive per decontaminare il sito nel quale fu disperso il Cesio.

•**29 settembre 1957, 6° livello INES, Majak (Urali dell'URSS)** - Nell'impianto di Majak, in una zona degli Urali, si verificò nel 1957 un incidente del 6° livello della scala INES. È il terzo incidente nucleare più grave della storia dopo quelli di Černobyl' e di Fukushima. Di questo incidente si conosce poco per il fatto di aver interessato un sito militare segreto. Infatti in realtà l'incidente non coinvolse una centrale nucleare ma piuttosto un deposito di materiali radioattivi di un sito militare. Il rilascio di radioattività nell'ambiente costrinse l'autorità a interdire l'area circostante che fortunatamente non era molto popolata.

•**26 aprile 1986, 7° livello INES, Černobyl' (URSS)** - L'incidente di Černobyl' si verificò in una centrale nucleare nei pressi della cittadina di Pripyat e comportò la fusione del combustibile, l'esplosione e lo scoperchiamento del reattore, la fuga in aria di combustibile polverizzato, scorie radioattive e vari materiali radioattivi. In parte l'incidente fu provocato da alcune caratteristiche problematiche del reattore, ma in gran parte è da imputarsi a un errore umano, dal momento che i tecnici esclusero manualmente tutti i sistemi di sicurezza. La conseguenza dello scoperchiamento del reattore e della fuga in atmosfera di isotopi radioattivi fu una vasta contaminazione ambientale. Il rapporto ufficiale redatto da agenzie dell'ONU (OMS, UNSCEAR, IAEA e altre) stila un bilancio di 65 morti accertati con sicurezza più altri 4 000 morti presunti (che non sarà possibile associare direttamente al disastro) per tumori e leucemie su un arco di 80 anni.

11 marzo 2011, 7° livello INES, Fukushima (Giappone) - A seguito del grave terremoto dell'11 marzo 2011, l'unità 1 della centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi, dopo circa 24 ore dall'evento, durante un'ulteriore scossa di terremoto, ha registrato un'esplosione con fuoriuscita di fumo bianco, presumibilmente idrogeno rilasciato dal liquido di raffreddamento in condizioni di alta temperatura e pressione, con conseguente dispersione di materiale irradiato all'esterno e crollo del tetto di un edificio di servizio, non ospitante il reattore. Il 13 marzo si è verificata un'analogia esplosione all'unità 3. Nella mattina del 15 marzo, dopo numerosi allarmi riguardanti la mancata ricopertura delle barre del reattore dell'unità 2, si è verificata un'esplosione che a una prima indagine potrebbe aver danneggiato il rivestimento esterno del nucleo, rimasto intatto nelle unità 1 e 3. Anche le 4 unità della centrale di Fukushima Dai-ichi, situata a 11 km dall'altra, e che erano in funzione al momento del sisma, sono state spente automaticamente dai sistemi di sicurezza, ma il malfunzionamento degli impianti di raffreddamento dei reattori ha provocato una situazione di allarme, di grado inferiore in quanto senza rilascio di radioattività all'esterno degli impianti.

L'11 marzo 2011 alle 14:46 JST, si verificò un violento terremoto di magnitudo 9 con epicentro al largo della costa nord-orientale del Giappone. Mentre i reattori 4, 5 e 6 erano stati spenti precedentemente per una manutenzione programmata, i reattori 1, 2 e 3 sono stati spenti dalla procedura automatica e il loro calore residuo venne raffreddato dal sistema di raffreddamento che faceva uso dell'energia dei generatori di emergenza.

Più o meno 40 minuti dopo il terremoto, si abbatté sulla costa uno tsunami con onde alte 14 metri, le quali hanno superato le barriere della centrale e sono penetrate negli edifici. L'acqua di mare ha disattivato i generatori di emergenza necessari per raffreddare i reattori e le piscine di combustibile esaurito e la temperatura all'interno del nocciolo è salita vertiginosamente.

Nelle settimane successive ci sono state prove del meltdown dei reattori 1, 2 e 3. Le esplosioni derivanti dai meltdown hanno rilasciato nell'ambiente grandi quantità di materiale radioattivo. Per proteggere la popolazione, sono stati evacuati circa 83.000 residenti in un raggio di 30 km. Il triplo meltdown ha anche causato preoccupazioni sulla contaminazione delle forniture di cibo e acqua, incluso il raccolto di riso del 2011, e anche sugli effetti sulla salute delle radiazioni sui lavoratori dello stabilimento. Gli scienziati stimano che l'incidente abbia contaminato 338 km² del fondo dell'oceano Pacifico.

Gli eventi ai reattori 1, 2 e 3 sono stati classificati al livello 5 di gravità secondo la scala internazionale per gli eventi nucleari (INES). Gli eventi al reattore 4 invece, sono stati classificati come gravi (corrispondenti al livello 3), con una valutazione complessiva del disastro di livello 7.

Per gli appunti delle lezioni relative ai capitoli Georisorse 1 e 2, Impatto ambientale e Energia nucleare, testi e foto sono stati tratti da:

“Geologia Ambientale, teoria e pratica” di Fred G. Bell, ed. Zanichelli

“Geologia Ambientale” di BW Pipkin, DD Trent e R Hazlett, ed. Piccin

“Giacimenti minerari” di CF Park e RA Mac Diarmid, ed. Liguori

Tesi di laurea inedita in Ingegneria Ambientale – Andrea Raccovelli