AGENZIA NAZIONALE
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

L'ENERGIA DEL FUTURO

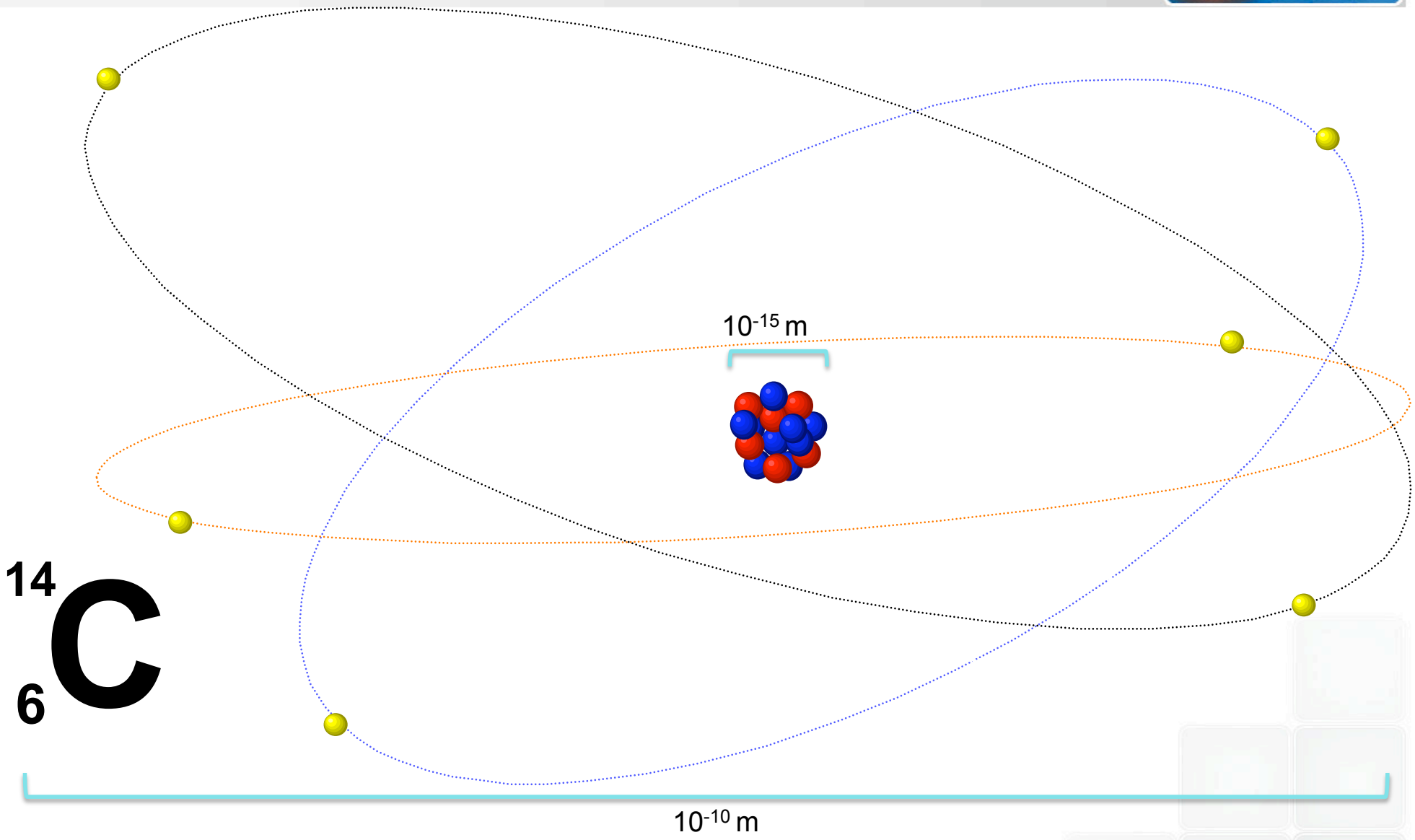
www.enea.it

# La radioattività: questa sconosciuta

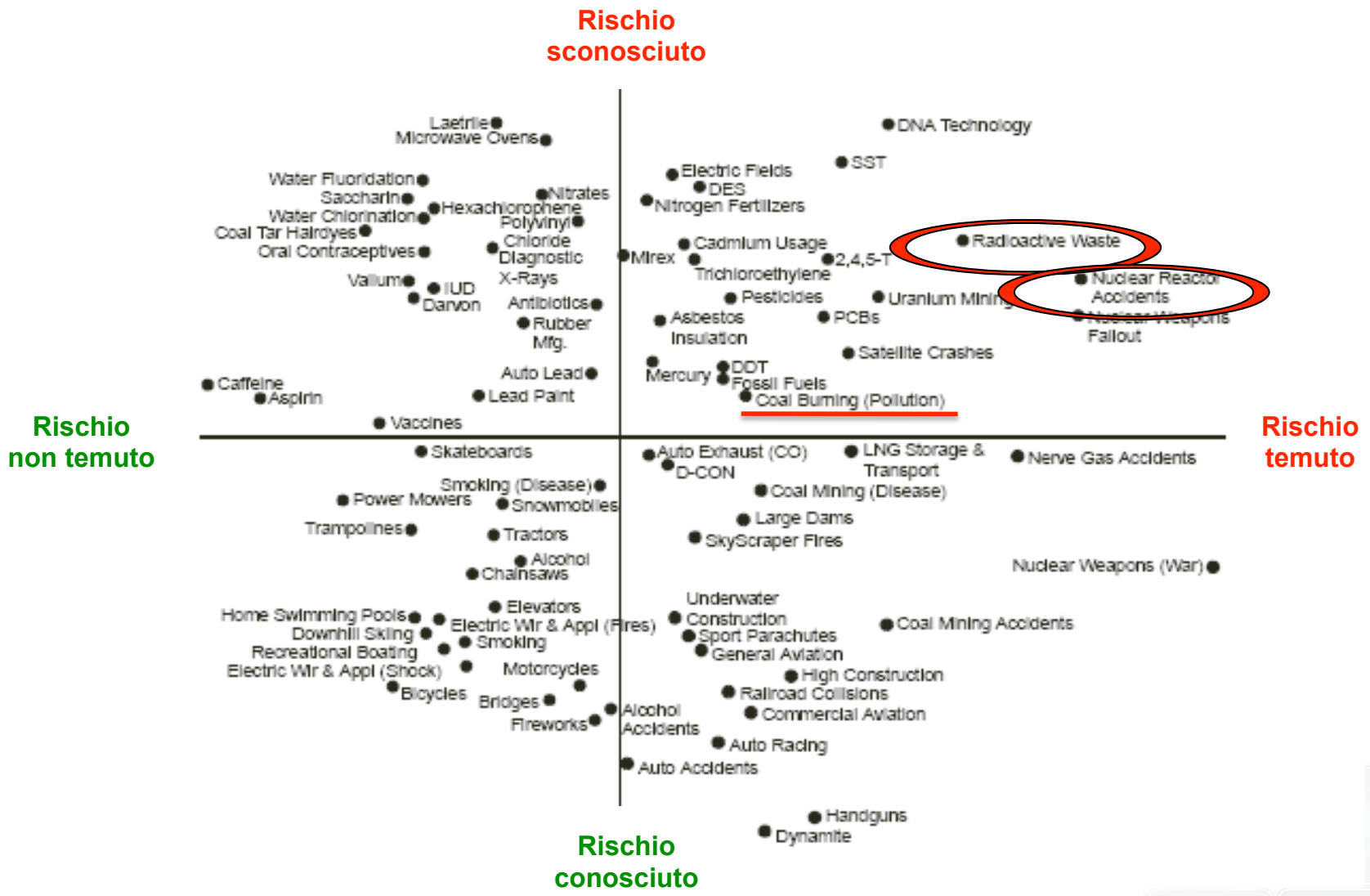
**Francesco Troiani – ENEA**
*Membro Commissione Tecnica (2007-2011) per la sicurezza nucleare e la protezione sanitaria dalle radiazioni ionizzanti (Art. 9, D. Lgs. 230/95)*

**Roma, 3 maggio 2011**
**Camera dei Deputati – Sala delle Conferenze**
**Via del Pozzetto, 158 Roma**

# L'Atomo



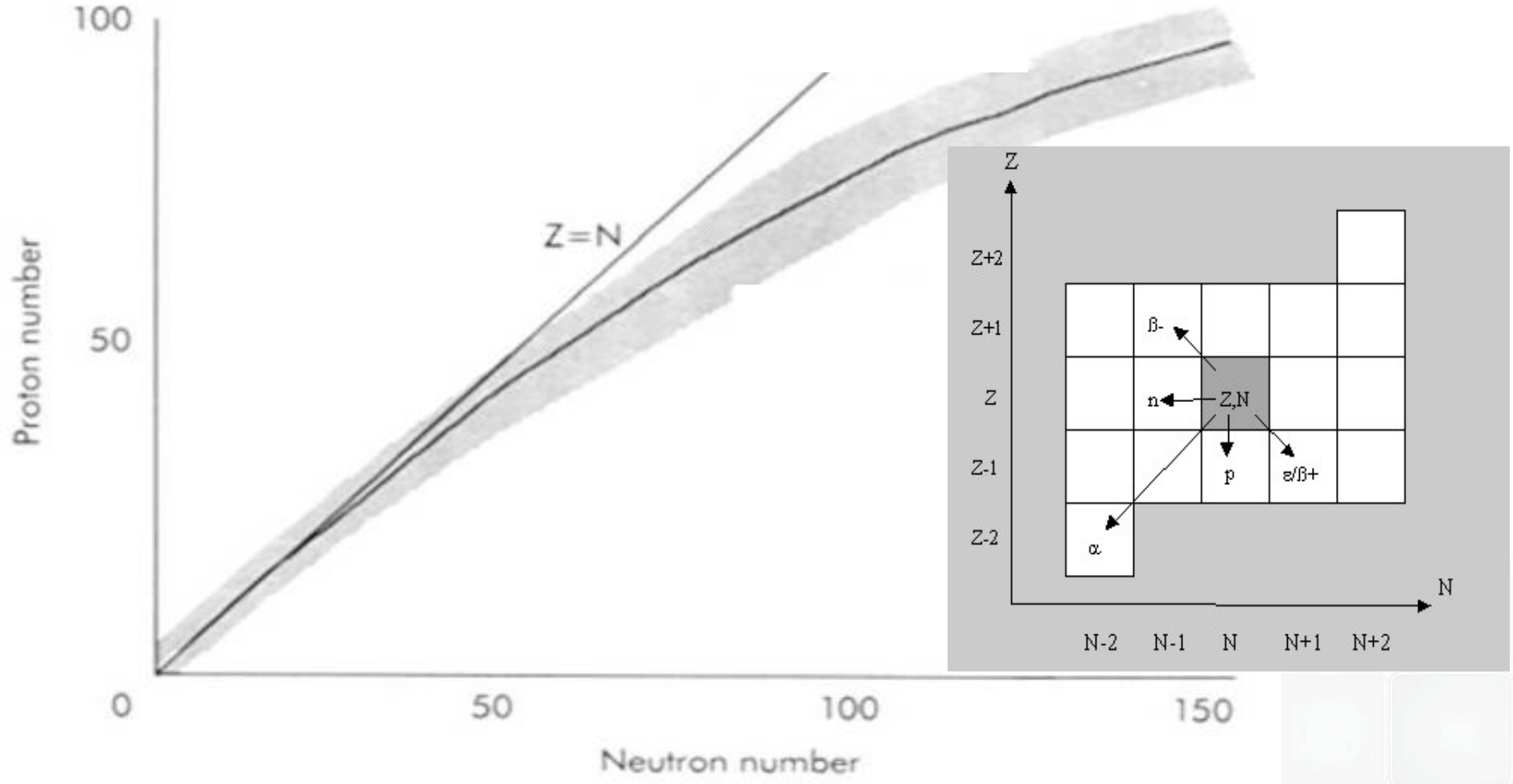
# Rischio giustificato




Risposta a: Ingegneri, Psicologi e Sociologi

# Nuclei stabili e nuclei radioattivi

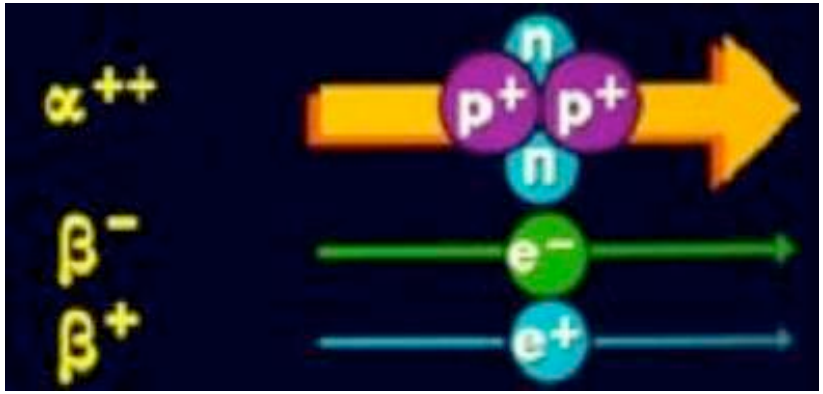
**I nuclidi stabili hanno, all'interno del loro nucleo, un rapporto neutroni/ protoni ben definito.**




**I nuclidi instabili tendono a riequilibrare il rapporto neutroni/protoni, espellendo materia ed energia in eccesso.**

# Radiazioni ionizzanti

## Direttamente ionizzanti

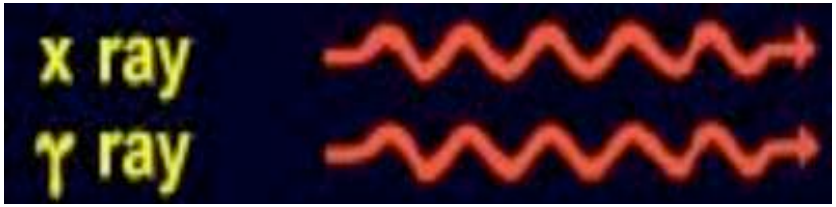



### Particelle

**Particelle atomiche o subatomiche la cui energia è data dall'energia cinetica associata alla loro massa in movimento**

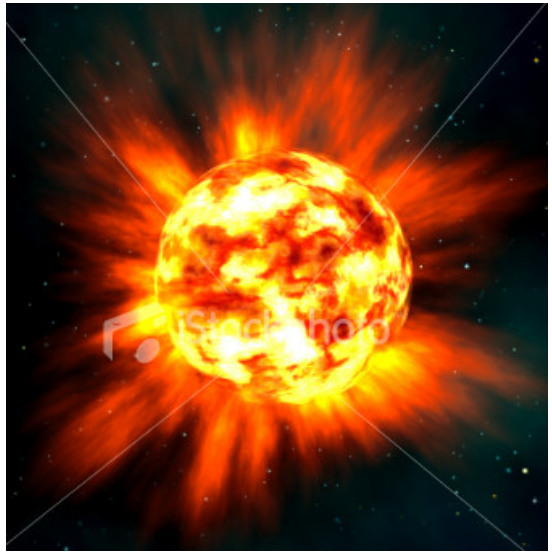
## Indirettamente ionizzanti

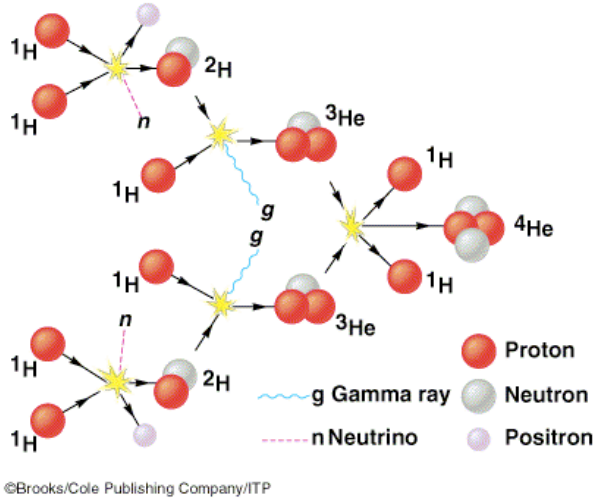
### Radiazioni Elettromagnetiche

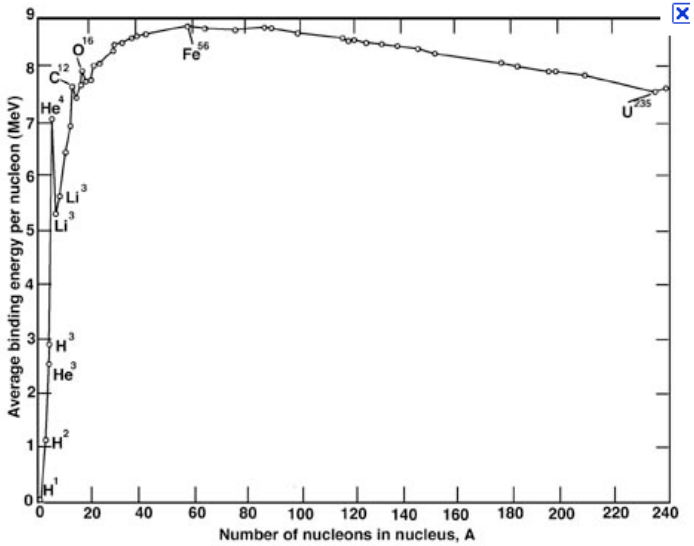


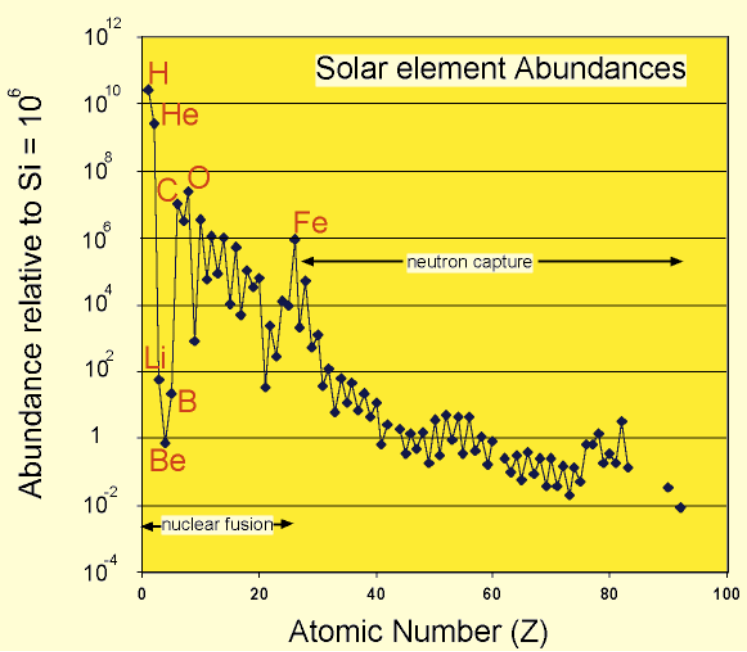

**L'energia è trasportata sottoforma di campi elettrici e magnetici oscillanti che viaggiano nello spazio alla velocità della luce**

# Origine dei radionuclidi – materia primordiale

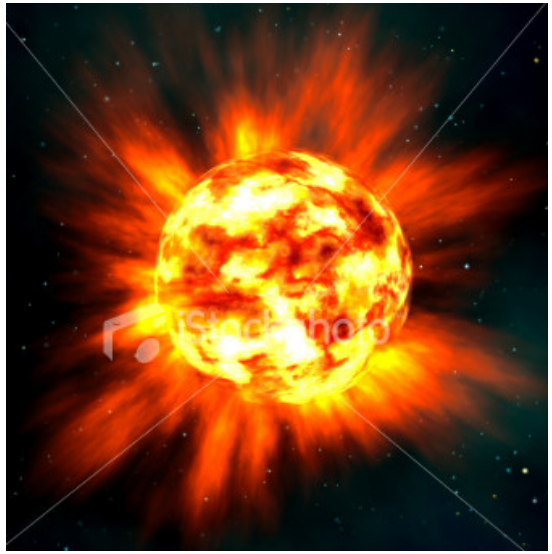


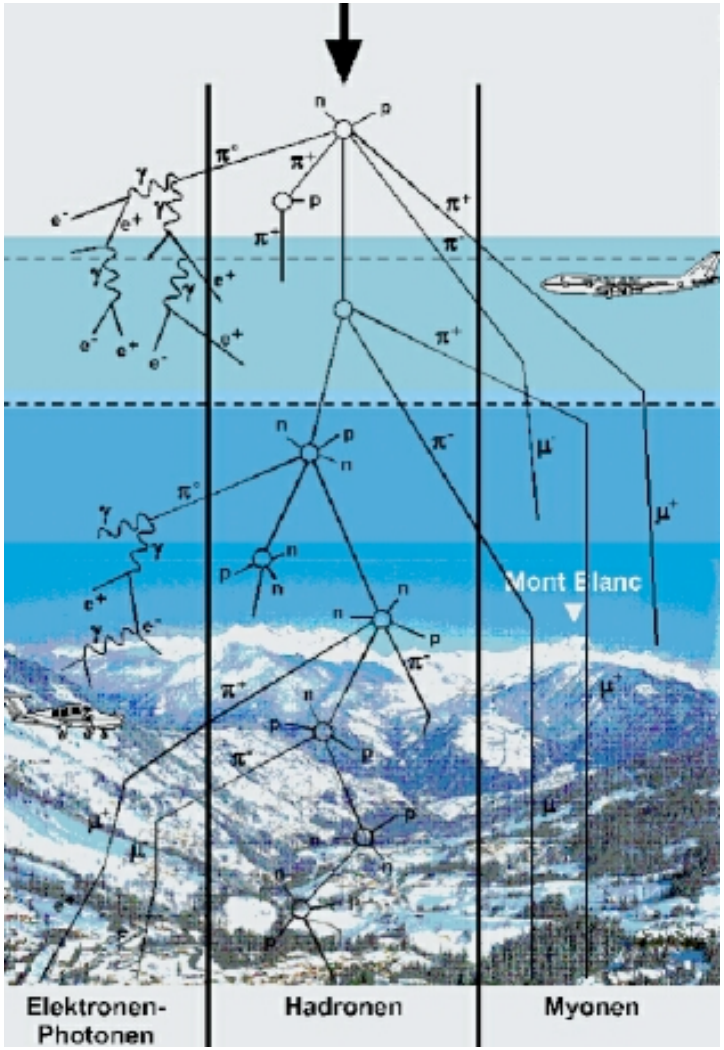


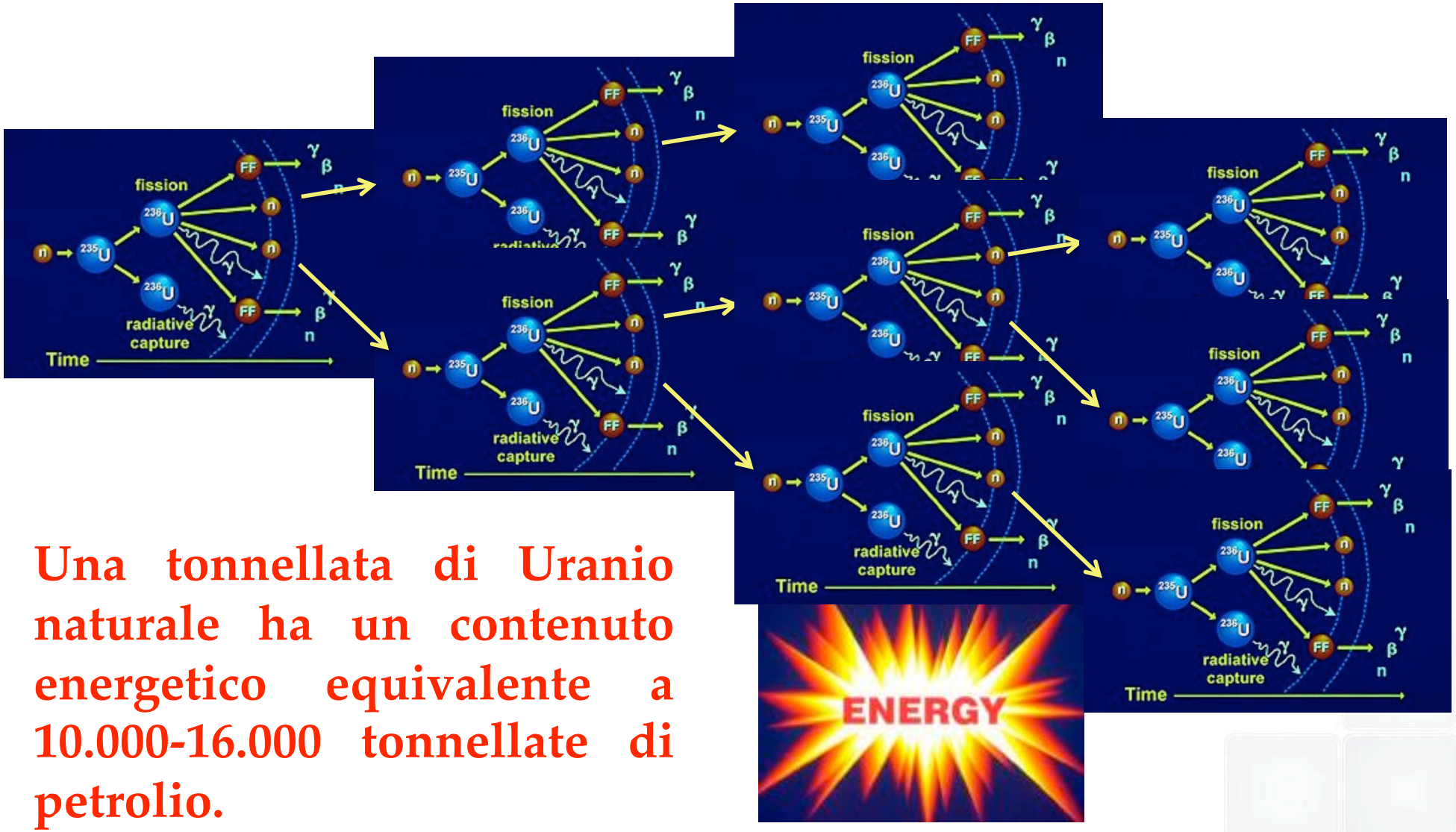



# Origine dei radionuclidi – radiazione cosmica





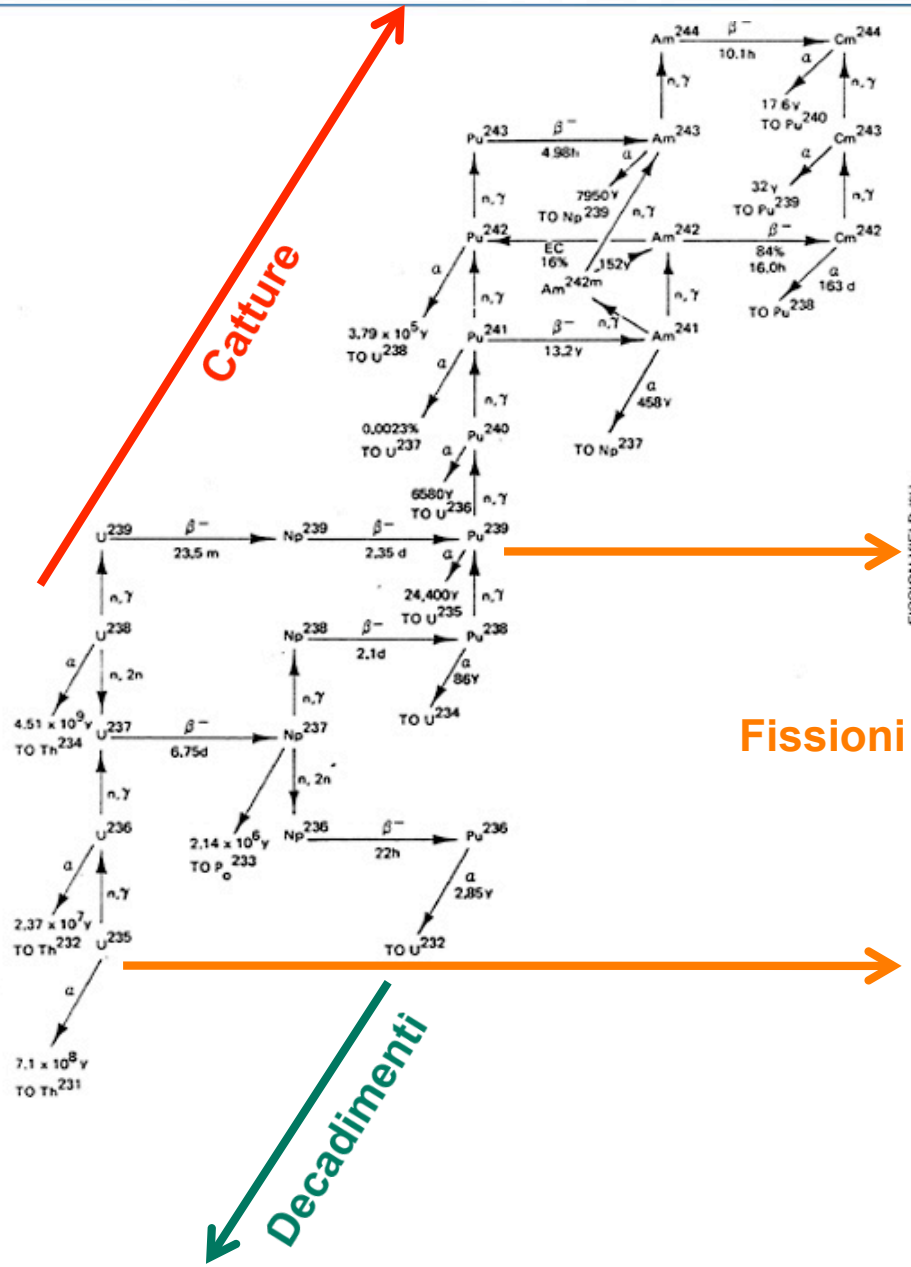
# Origine dei radionuclidi - fissione

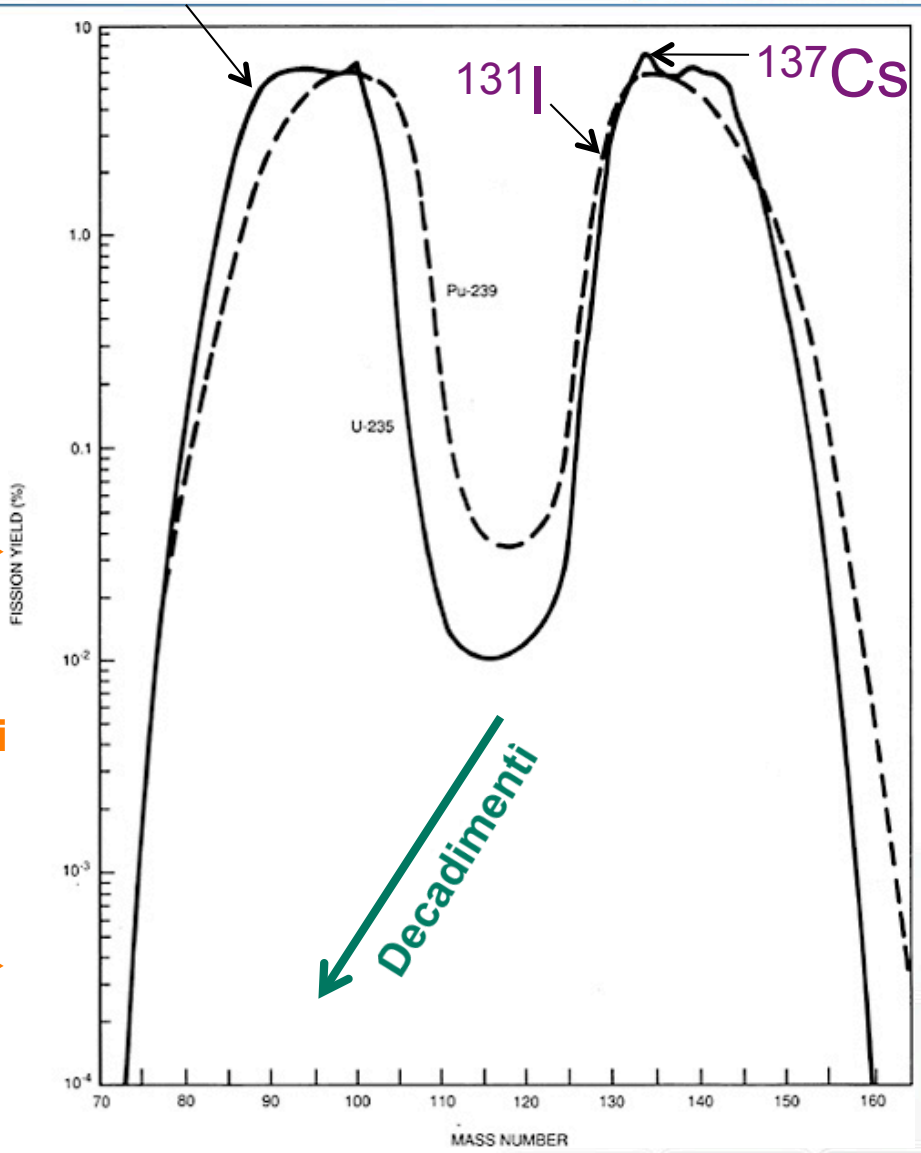



**Una tonnellata di Uranio naturale ha un contenuto energetico equivalente a 10.000-16.000 tonnellate di petrolio.**

$$n + {}^{235}U \rightarrow {}^{141}Ba + {}^{92}Kr + 3n + \text{Energia } 200 \text{ MeV}$$

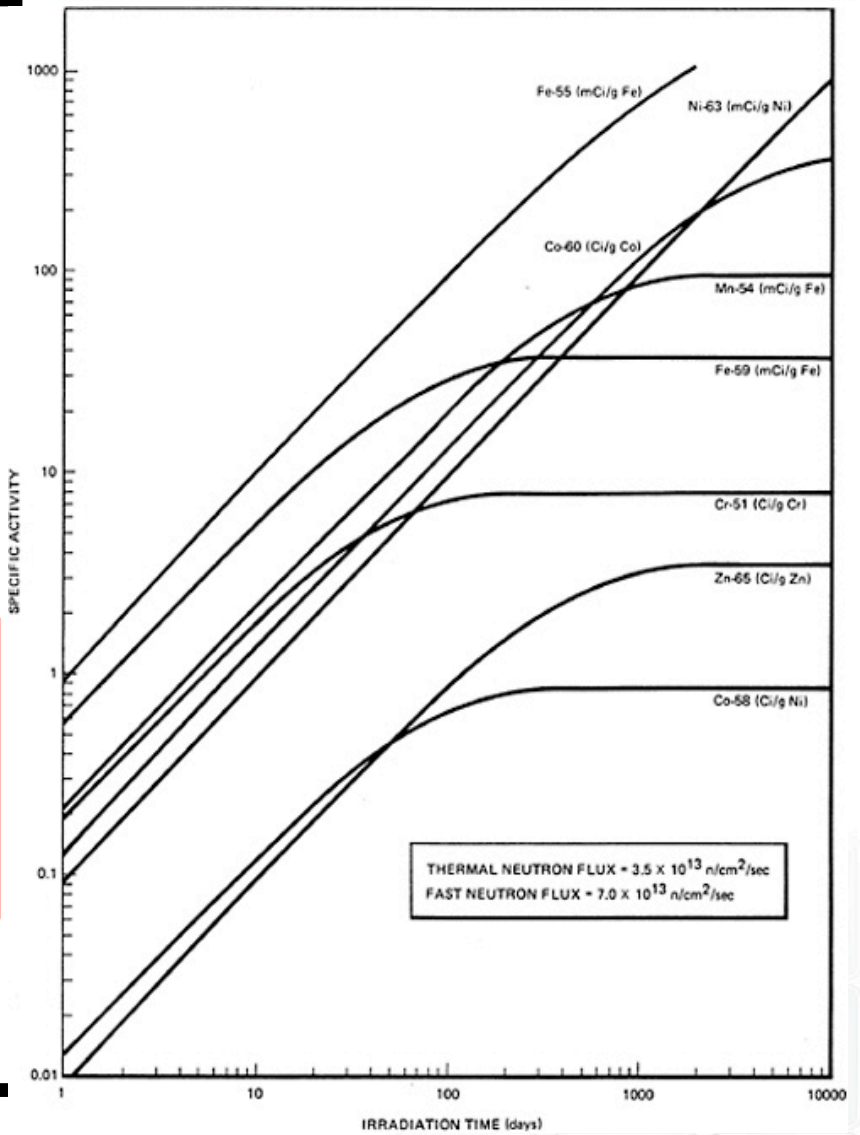
# Reazioni nucleari



# Formazione Elementi Radioattivi

| Actinides | | | | Half-life | Fission products | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{244}$Cm | $^{241}$Pu$^{f}$ | $^{250}$Cf | $^{243}$Cm$^{f}$ | 10–30 y | $^{137}$Cs | $^{90}$Sr | $^{85}$Kr | |
| $^{232}$U$^{f}$ | | $^{236}$Pu | f is for | 69–90 y | | | $^{151}$Sm nc→ | |
| 4n | $^{249}$Cf$^{f}$ | $^{242}$Am$^{f}$ | fissile | 141–351 | No fission product has half-life $10^2$ to $2\times10^5$ years | | | |
| | $^{241}$Am | | $^{251}$Cf$^{f}$ | 431–898 | | | | |
| $^{240}$Pu | $^{229}$Th | $^{246}$Cm | $^{243}$Am | 5–7 ky | | | | |
| | $^{245}$Cm$^{f}$ | $^{250}$Cm | $^{239}$Pu$^{f}$ | 8–24 ky | | | | |
| 4n | $^{233}$U$^{f}$ | $^{230}$Th | $^{231}$Pa | 32–160 | | | | |
| | 4n+1 | $^{234}$U | | 211–290 | $^{99}$Tc | | $^{126}$Sn | $^{79}$Se |
| $^{248}$Cm | | $^{242}$Pu | 4n+3 | 340–373 | Long-lived fission products | | | |
| | $^{237}$Np | | | 1–2 my | $^{93}$Zr | $^{135}$Cs nc→ | | |
| $^{236}$U | | 4n+2 | $^{247}$Cm$^{f}$ | 6–23 | | $^{107}$Pd | $^{129}$I | |
| $^{244}$Pu | 4n+1 | | | 80 my | >7% | >5% | >1% | >.1% |
| $^{232}$Th | | $^{236}$U | $^{235}$U$^{f}$ | 0.7–12by | fission product yield | | | |

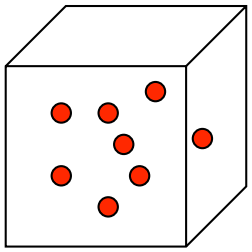



Attinidi

Prodotti di Fissione

Prodotti di Attivazione

# Decadimento radioattivo

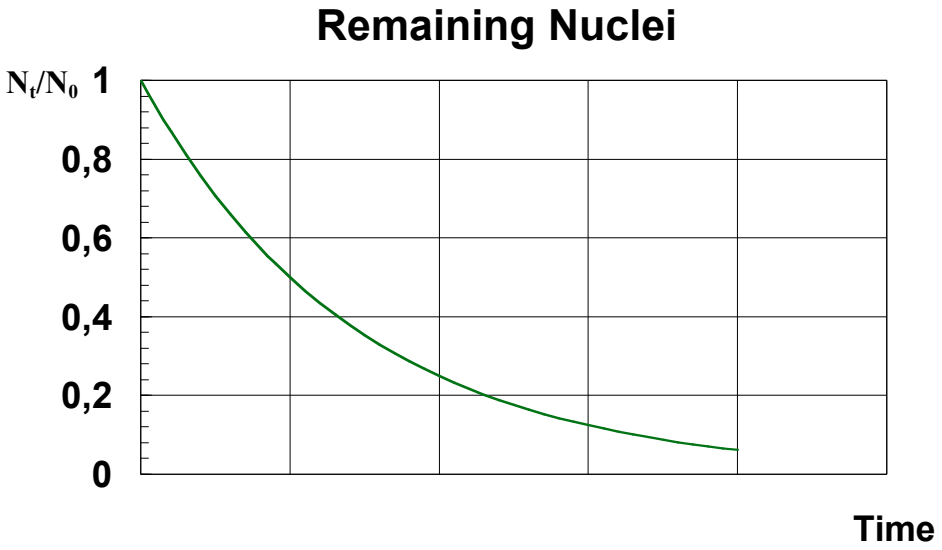


$-dN/dt = \lambda N(t)$

$A_t = \lambda N(t)$

$\lambda$ = costante di decadimento

$$N(t) = N_0 e^{(-\lambda t)}$$



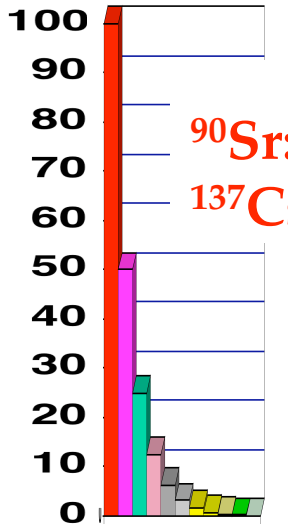

**Nel Sistema Internazionale (SI) l'unità di radioattività è il Becquerel (Bq):**

**1 Bq = 1 disintegrazione per secondo**

**La vecchia unità di radioactività era il Curie (Ci) equivalente alla radioattività di 1 grammo di Radio**

**1 Ci = 3,7 x $10^{10}$ Bq**

# Evoluzione della radioattività: Decadimento




$^{90}$Sr: 28,1 anni

$^{137}$Cs: 30 anni

***TEMPO DI DIMEZZAMENTO:*** **tempo occorrente perché un materiale radioattivo perda la metà della sua radioattività iniziale.**

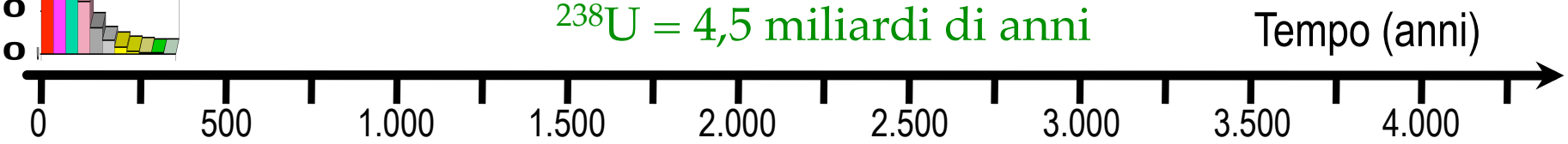
**Esempi di Tempi di dimezzamento:**

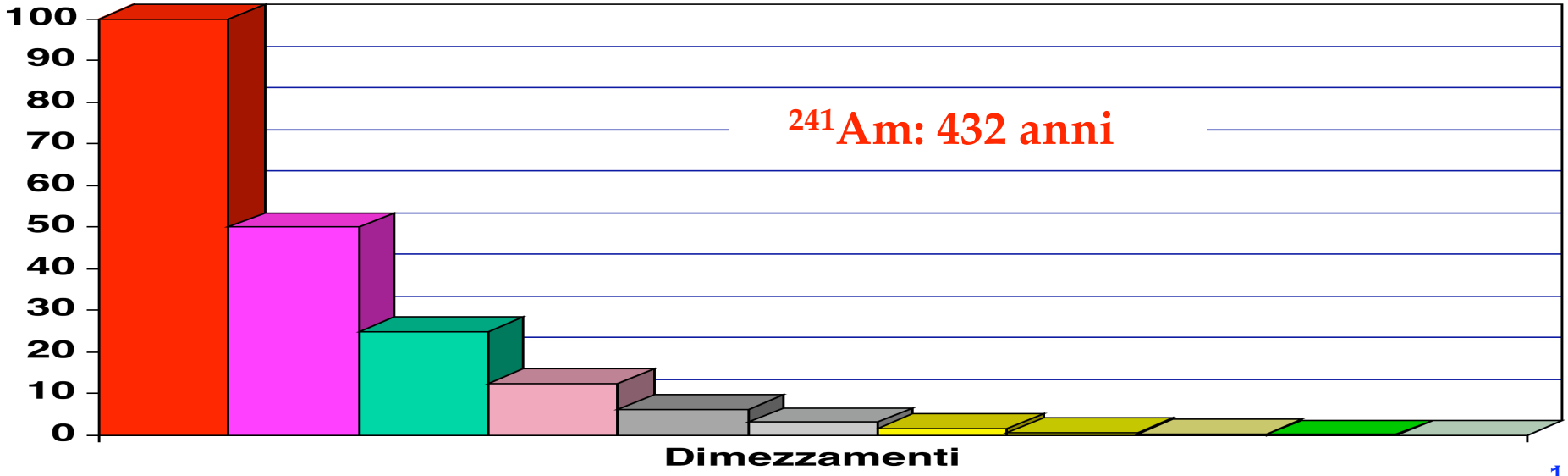
$^{60}$Co = 5,2 anni

$^{14}$C = 5.730 anni

$^{239}$Pu = 24.400 anni

$^{238}$U = 4,5 miliardi di anni




$^{241}$Am: 432 anni

# Energia delle radiazioni ionizzanti.

**eV – KeV – MeV**

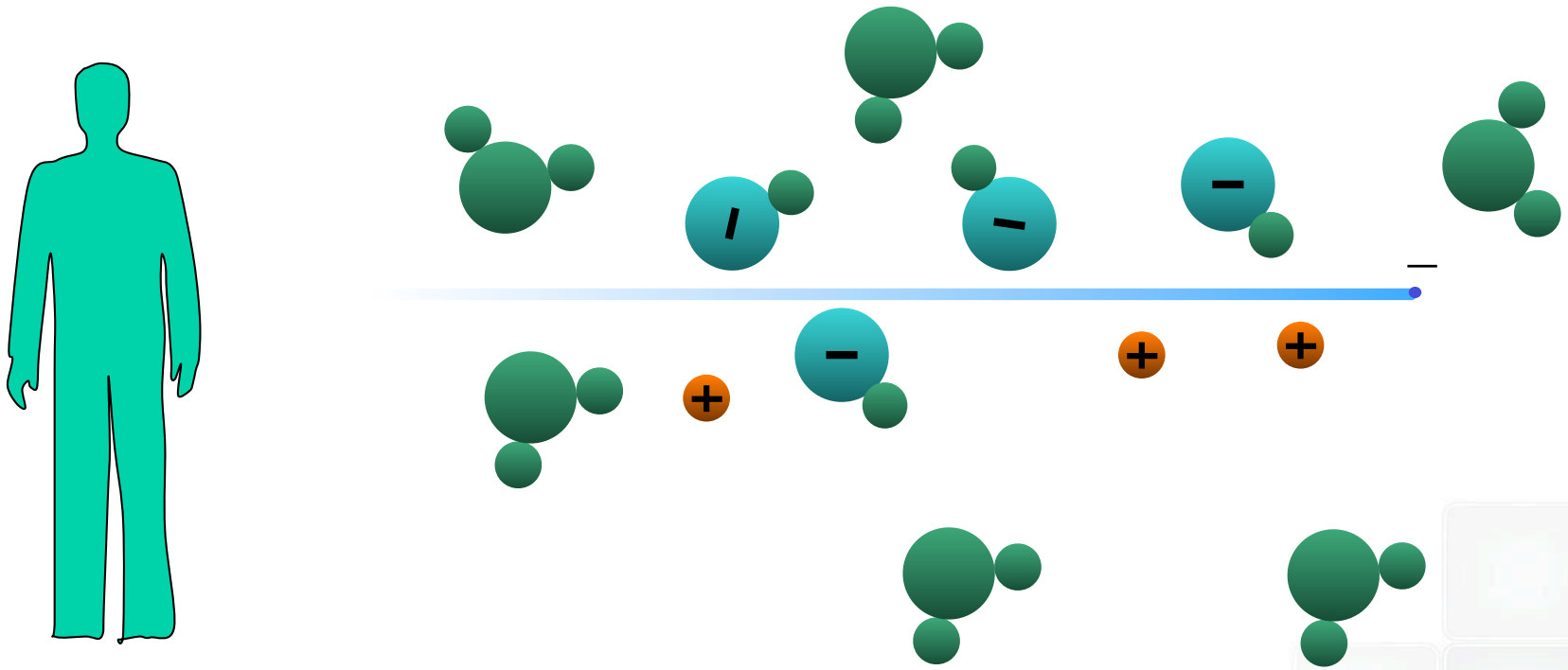
**eV = elettronvolt = energia che un elettrone acquisisce quando accelerato da un potenziale di 1 Volt**

**1 MeV = 1.6 x $10^{-13}$ J = 3.38x$10^{-14}$ Cal**

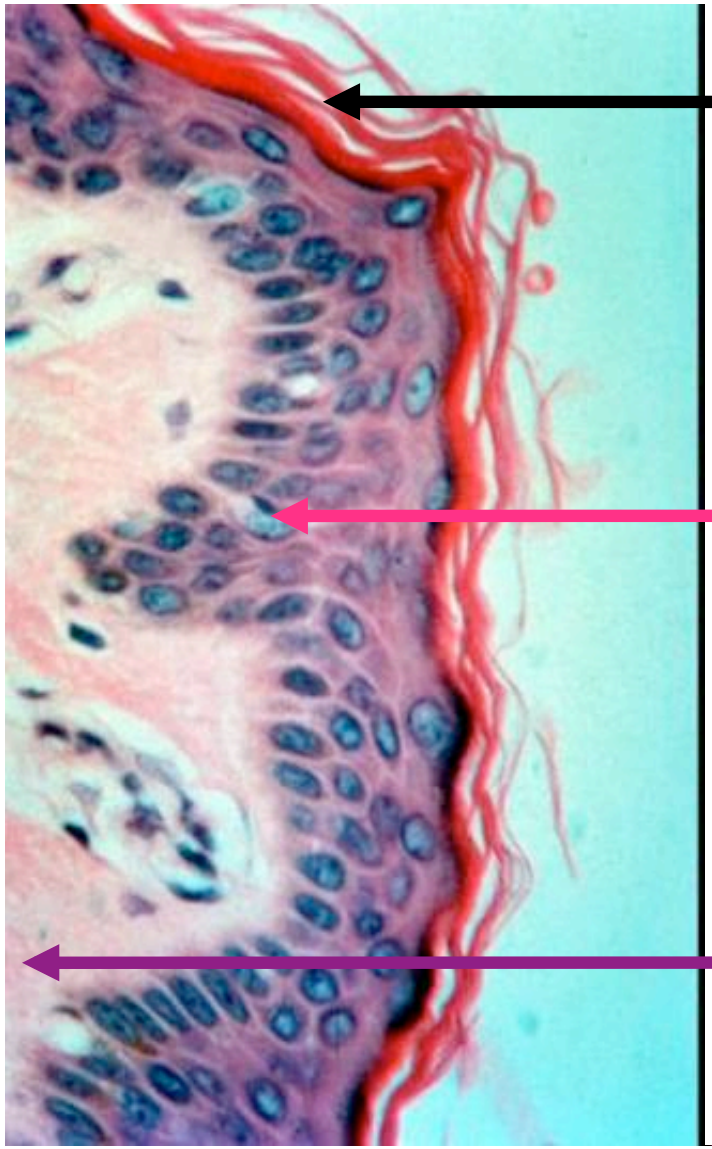
**Per aumentare di 1°C la temperatura di un grammo di acqua sono necessari 26.200 miliardi di MeV**

# Ionizzazione della materia

Le radiazioni che hanno energia sufficiente per spostare gli elettroni dagli atomi o molecole, producono ioni e radicali liberi nel mezzo attraversato.



# Interazioni radiazioni-materia vivente



**Le Radiazioni Alfa**

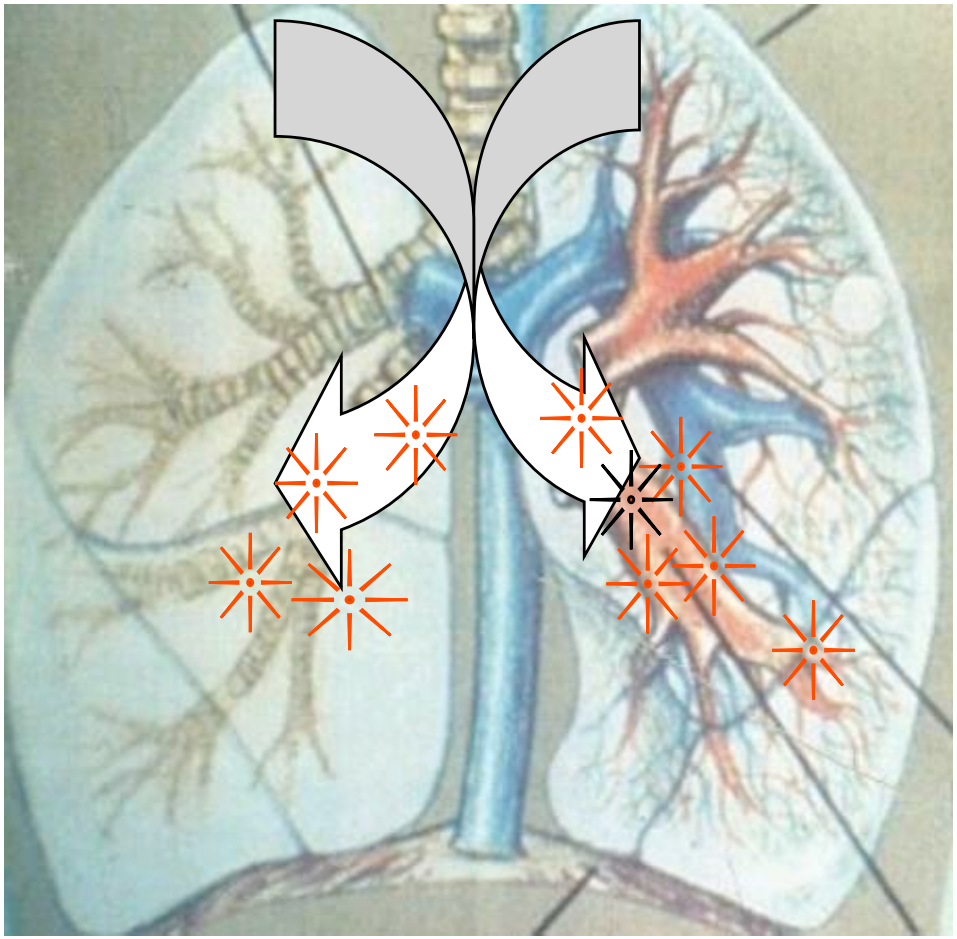
Sono assorbite nello strato superficiale delle cellule morte (strato corneo)

**Le Radiazioni Beta** danneggiano **lo strato epiteliale**. Radiazioni β ad alta energia provocano lesioni simili alle scottature

**Le Radiazioni Gamma**

danneggiano i tessuti sottostanti e gli organi

# Irraggiamento interno



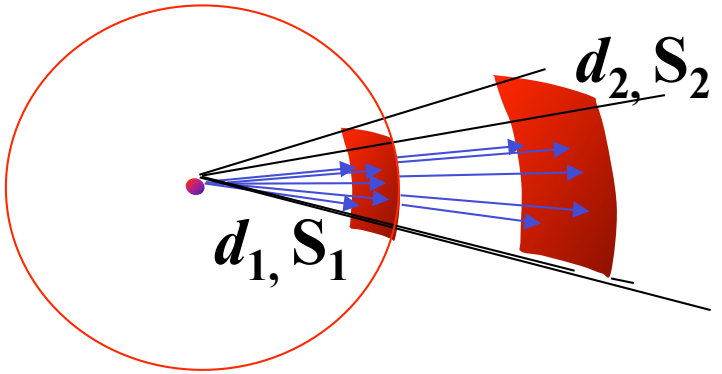
- **Le radiazioni Alfa sono un rischio interno.**
- **Grossi danni da inalazione ed ingestione di emettitori alfa**

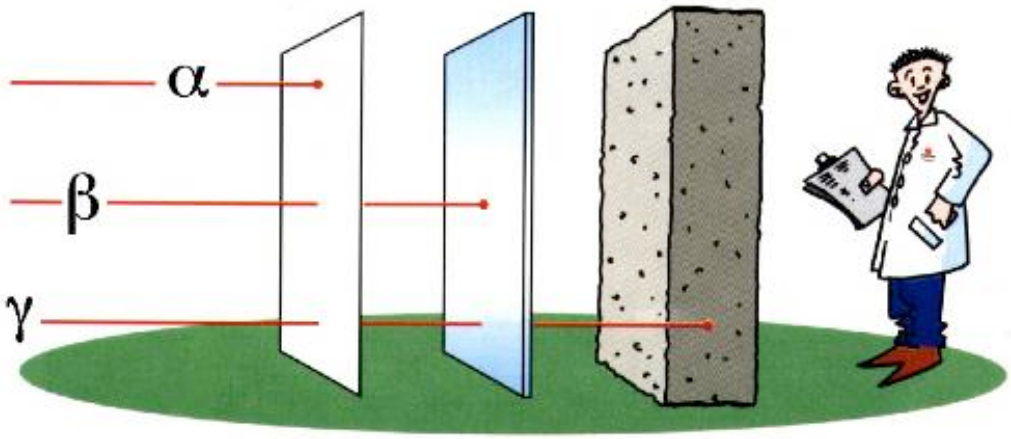
# Protezione dall'esposizione esterna

**Tempo di esposizione: *t***

$$D = D_r \cdot t$$

**Distanza dalla sorgente: *d***




**Schermaggio**

# Protezione dall'esposizione interna

1. **Autorespiratore (quando è necessario un alto fattore di protezione).**
2. **Maschere o semimaschere facciali (con filtri per le polveri contaminate)**

# Dose radiologica

$$D = E/m$$

**Energia assorbita dalla massa m**

**Unità di misura: Gray (Gy)**
**1 Gy = 1 joule/kg**

**Vecchia unità: rad (1 Gy=100 rad)**

# Equivalente di dose

**Per la materia vivente differenti radiazioni hanno differenti effetti per cui si utilizza un fattore di correzione "Fattore di Qualità" per avere un Equivalente di Dose:**

$$H = Q \times D$$

**Unità di misura: Sievert (Sv)**

**1 Sv = Q x 1 joule/kg**

**Vecchia unità: rem (1 Sv=100 rem)**

# Fattore di Qualità

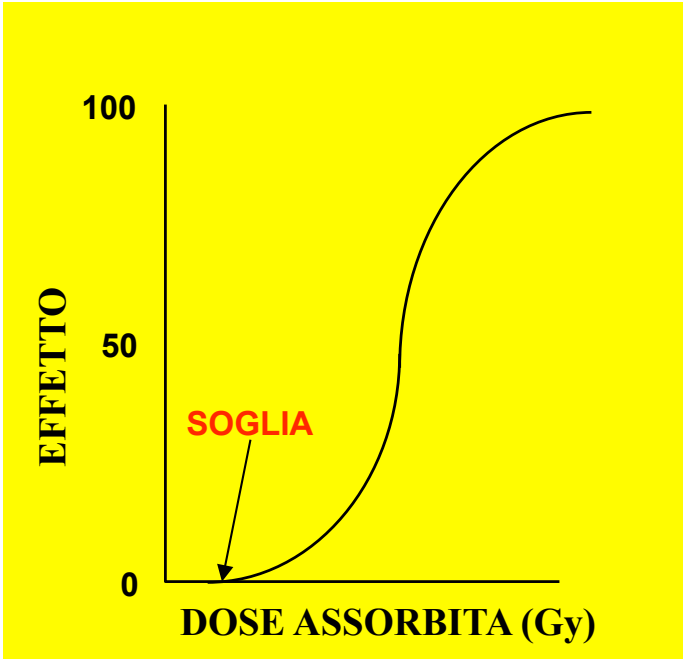
**ICRP 60 (1991)**

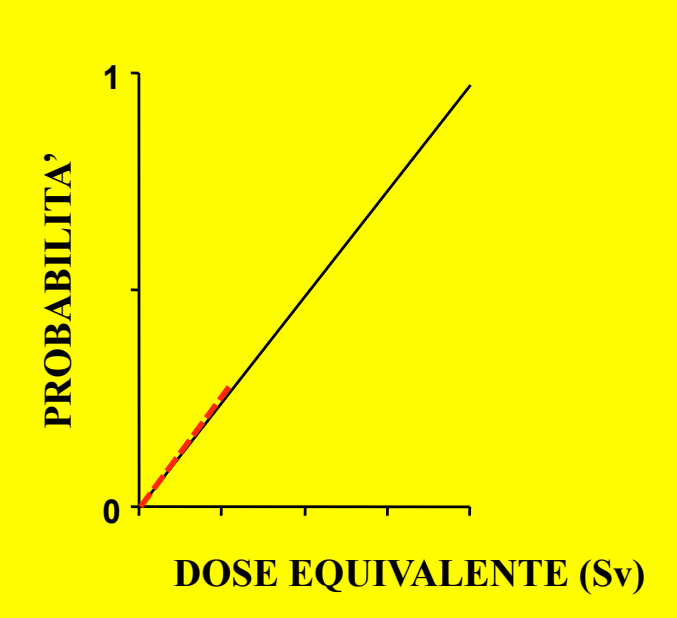
| Tipo di radiazioni ed energie | Q |
|---|---|
| Fotoni (Raggi X e raggi gamma ) | 1 |
| Elettroni, tutte le energie | 1 |
| Neutroni | |
| <10 keV | 5 |
| 10-100 keV | 10 |
| >100 kev to 2 MeV | 20 |
| 2-20 MeV | 10 |
| >20 MeV | 5 |
| Protoni >20MeV | 5 |
| Particelle Alfa e frammenti di fissione | 20 |

# Danni biologici

**Effetti deterministici** (alte dosi, 0,2÷15 Gy)

- Danno ematologico
- Sterilità temporanea – permanente
- Eritema – ustioni
- Sindrome da radiazioni
- Decesso




**Effetti stocastici**

(ipotesi lineare e senza soglia)

- Tumori
- Effetti ereditari (alterazioni genetiche)

# Effetti deterministici

*FIG. 9.2. 17 days after exposure. Large and tense blisters. Significant swelling limits fingers movement.*

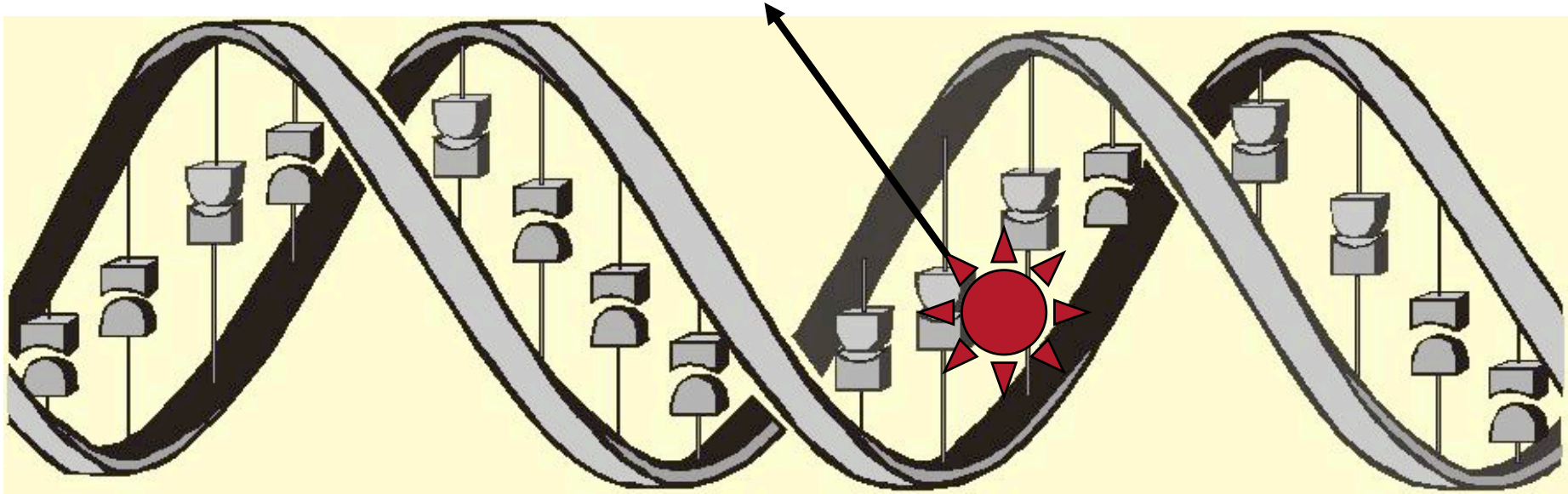
# Valori di soglia per gli effetti deterministici

| Danno | Dose | | |
|---|---|---|---|
| | acuta (Sv) | cumulata (Sv) | annuale (Sv/year) |
| Testicoli<br>- sterilità temporanea<br>- Sterilità permanente | <br>0,15<br>3,5-6,0 | <br>N.A.<br>N.A. | <br>0,4<br>2,0 |
| Ovaie<br>- sterilità | <br>2,5-6,0 | <br>6,0 | <br>> 0,2 |
| Cristallino<br>- opacità<br>- cataratta | <br>0,5-2,0<br>5,0 | <br>5,0<br>>8 | <br>> 0,1<br>> 0,15 |
| Midollo osseo<br>- anemia<br>- aplasia (morte) | <br>0,5<br>1,5 | <br>N.A.<br>N.A. | <br>> 0,4<br>> 1 |

*Fonte: ICRP n. 41/1984 e n. 60/1990*

# Effetti probabilistici

**Rottura dell'elica del DNA**

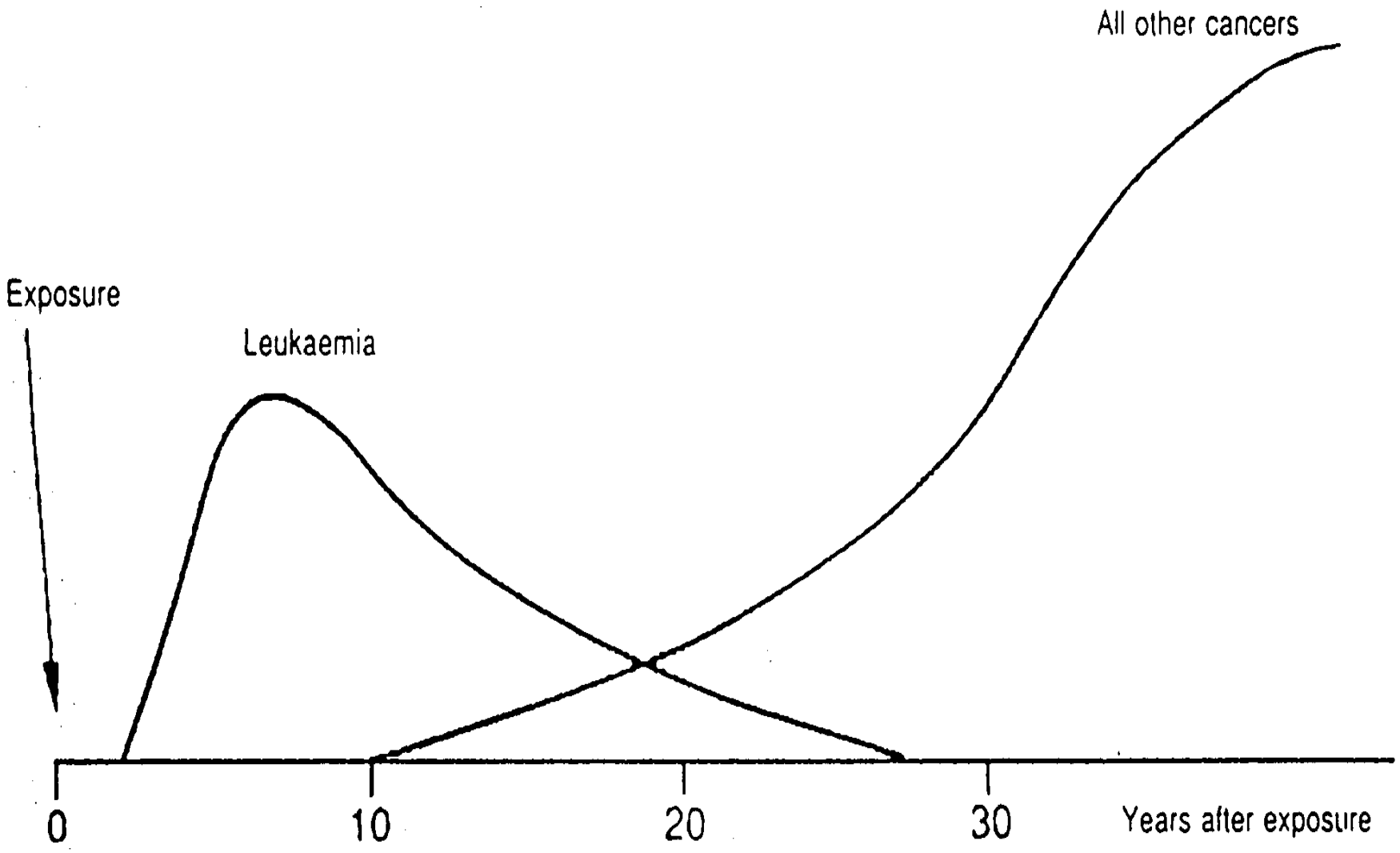


Conseguenze

**Riparazione del danno** ⟷ **Morte della cellula**

**Errata riparazione, conseguenze genetiche**

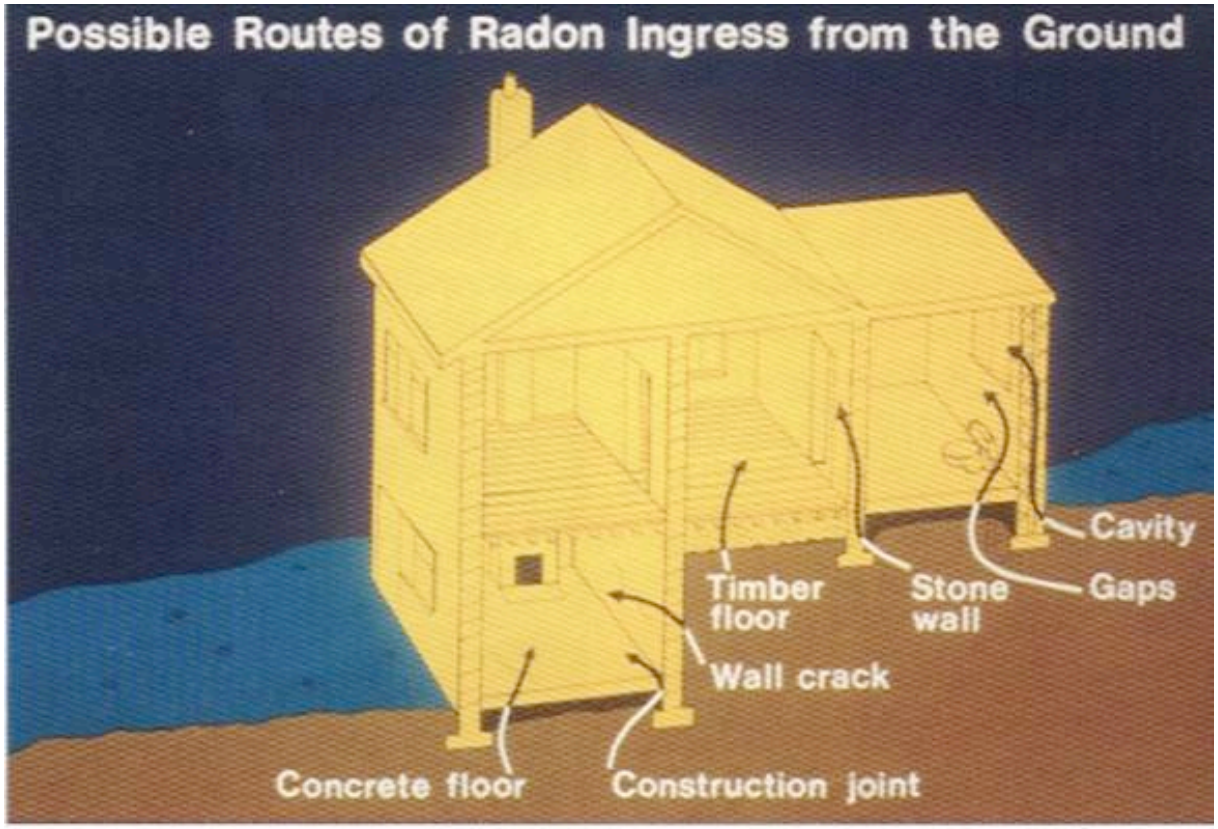
# Danni genetici

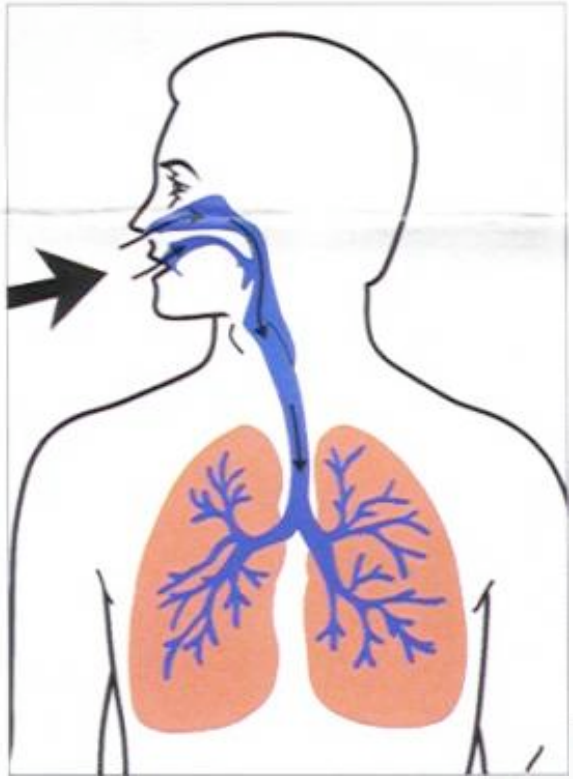


# Casi di studio

| Type or localization of cancer | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Population groups** | **Leukemia** | **Thyroid gland** | **Lung** | **Breast** | **Bone** | **Skin** |
| **A-bomb survivors** | + | + | + | + | | |
| **Ra-dial painters** | | | | | + | |
| **Early radiologists** | + | | | | | + |
| **U-miners** | | | + | | | |
| **Exposed in a nuclear accident** | | + | | | | |

# Esposizione da Radon

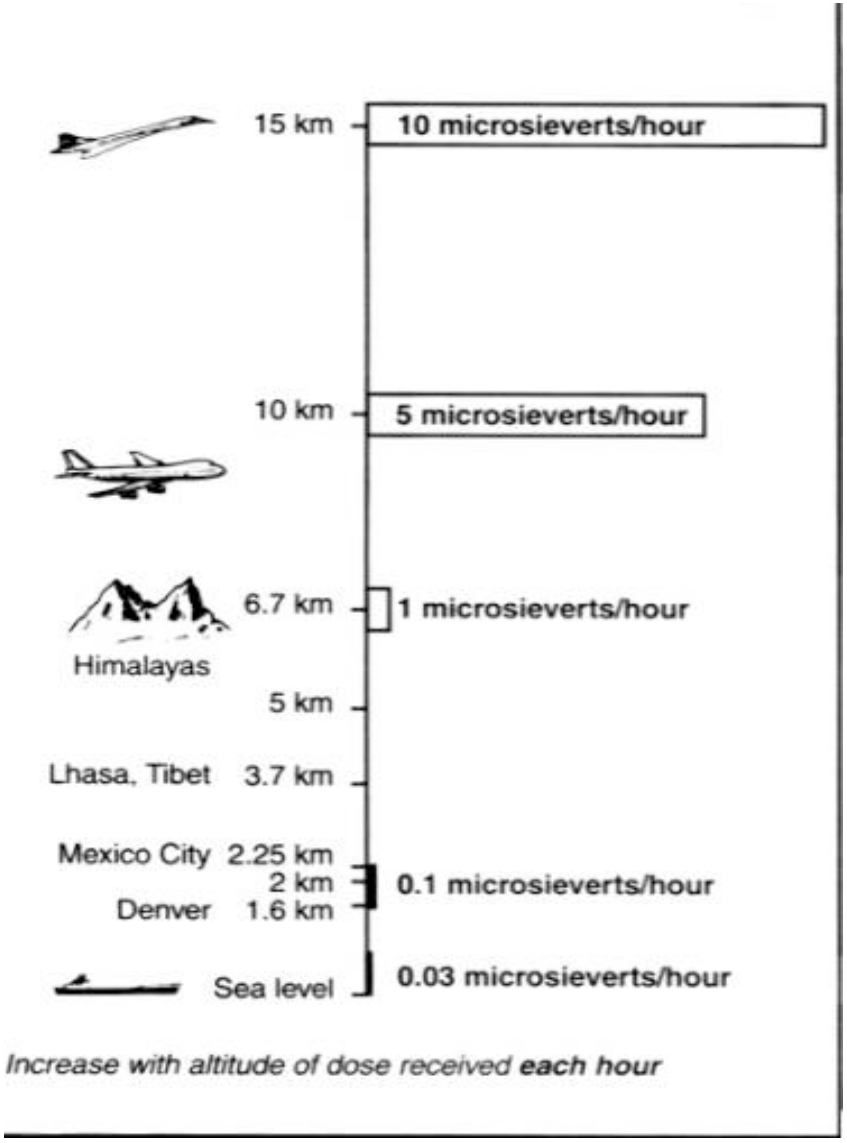


**U-238 ⟶ Rn-222**

**Th-232 ⟶ Rn-220**

# Esposizione da raggi cosmici



# Esposizione dagli alimenti

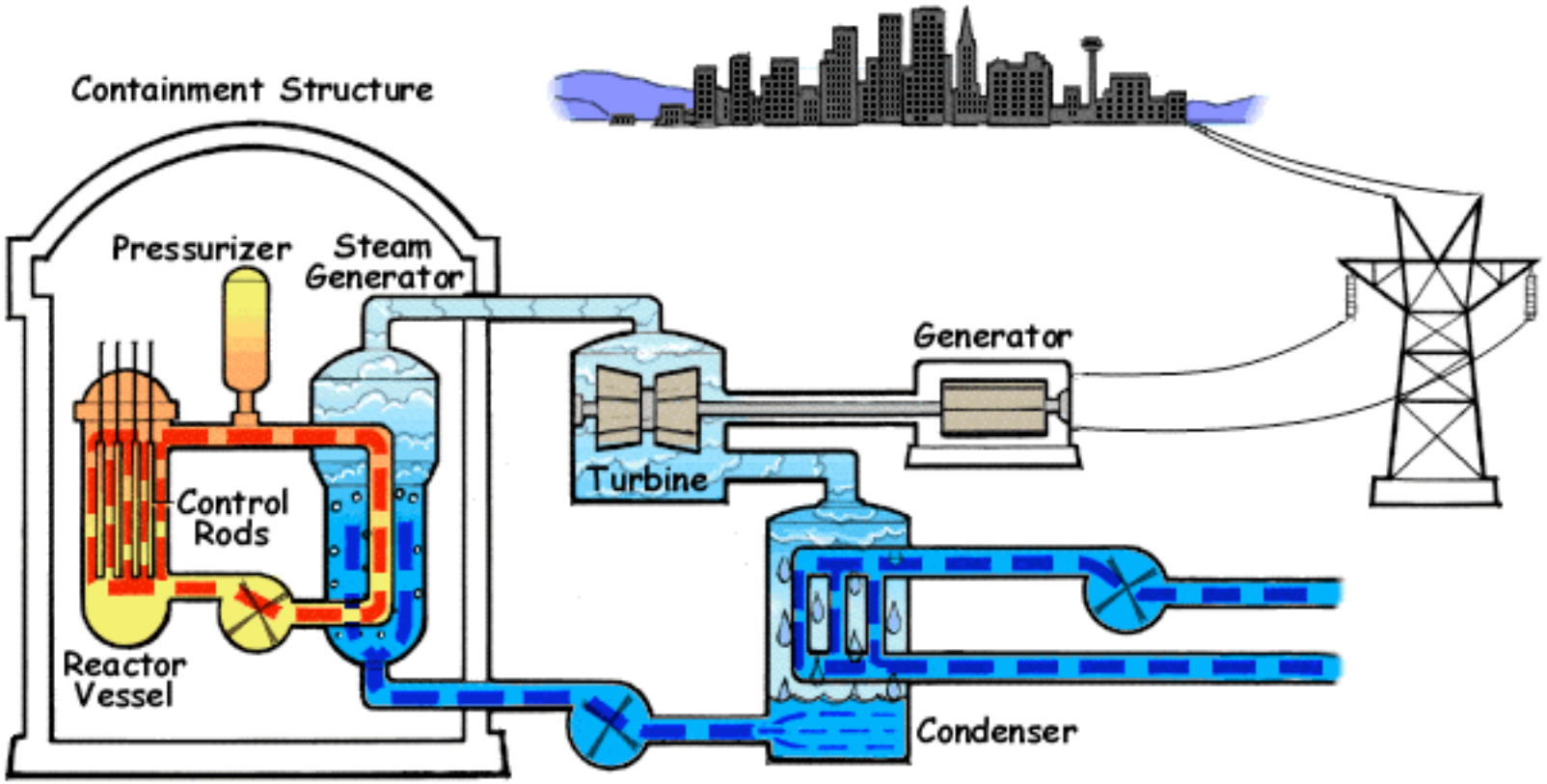
***Ogni individuo incorpora radioattività.***

***Presenza, nel corpo umano, di radionuclidi naturali:***

***K-40 = 0,06 Bq/g***
***C-14 = 0,21 Bq/g***

# Esposizioni mediche

# Esposizione da industria nucleare



# Esposizione da rilasci di materiali nucleari

Alcuni materiali radioattivi naturali

Radiation Protection 122 EUR, riporta:

- ✓ cemento $^{40}K$ = 0,4 Bq/g
- ✓ tufo $^{40}K$ = 1,8 Bq/g
- ✓ granito $^{40}K$ = 0,64 Bq/g

ICRP 30, corpo umano:

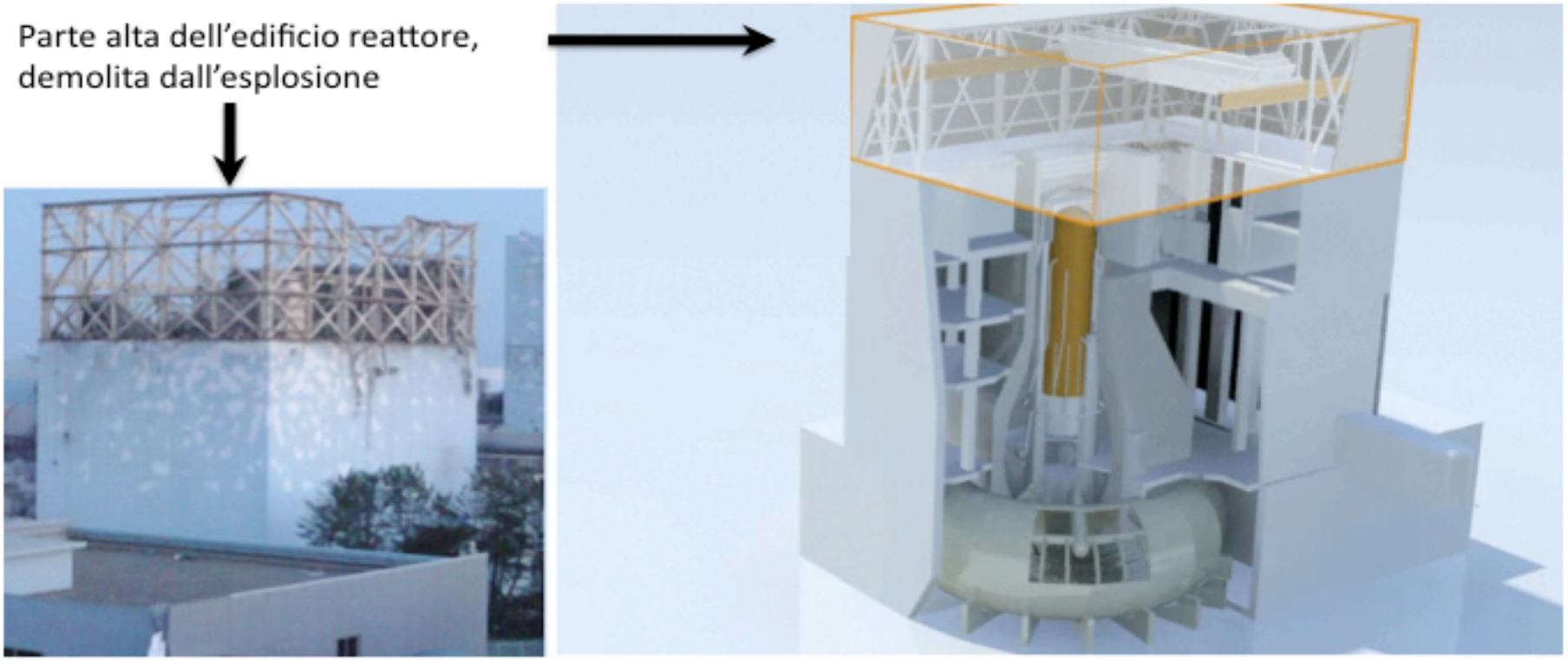
- ✓ $^{40}K$ = 0,06 Bq/g
- ✓ $^{14}C$ = 0,21 Bq/g

**Rilascio di materiali radioattivi nell'ambiente con radioattività inferiore a quella ambientale**

| | IAEA | | EURATOM | Autorità Italiana |
|---|---|---|---|---|
| materiali rilasciati | generico | val rapp. | generico | met./cem./altri |
| $^{3}H$ | 1000-10000 | 3.000 | 100 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{14}C$ | 100-1000 | 300 | 10 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{54}Mn$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | 1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{55}Fe$ | 100-1000 | 300 | 100 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{60}Co$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | 1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{59}Ni$ | - | - | 100 | 1 / 1/ 0,1 |
| $^{63}Ni$ | 1000-10000 | 3.000 | 100 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{90}Sr$ | 1-10. | 3 | 1 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{125}Sb$ | - | - | 1 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{134}Cs$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{137}Cs$ | 0,1-1 | 0,3 | 1 | 1 / 1 / 0,1 |
| $^{152}Eu$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | 1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{154}Eu$ | - | - | 0,1 | 1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{241}Pu$ | 10-100 | 30 | 1 | 1 / 1 / 0,1 |
| alpha emettitori | vedi sotto | | vedi sotto | 0,1 / 0,1 / 0,1 |
| $^{234/235/238}U$ | 0,1-1 | 0,3 | 1 | |
| $^{239/240}Pu$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | |
| $^{241}Am$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | |
| $^{242}Cm$ | - | - | 1 | |
| $^{244}Cm$ | 0,1-1 | 0,3 | 0,1 | |

# Esposizione da esplosioni nucleari

# Esposizione da incidenti nucleari




*Unità 1 e 3 di Fukushima-Dai-chi dopo l'esplosione del tetto*

# Radioattività e dosi radiologiche

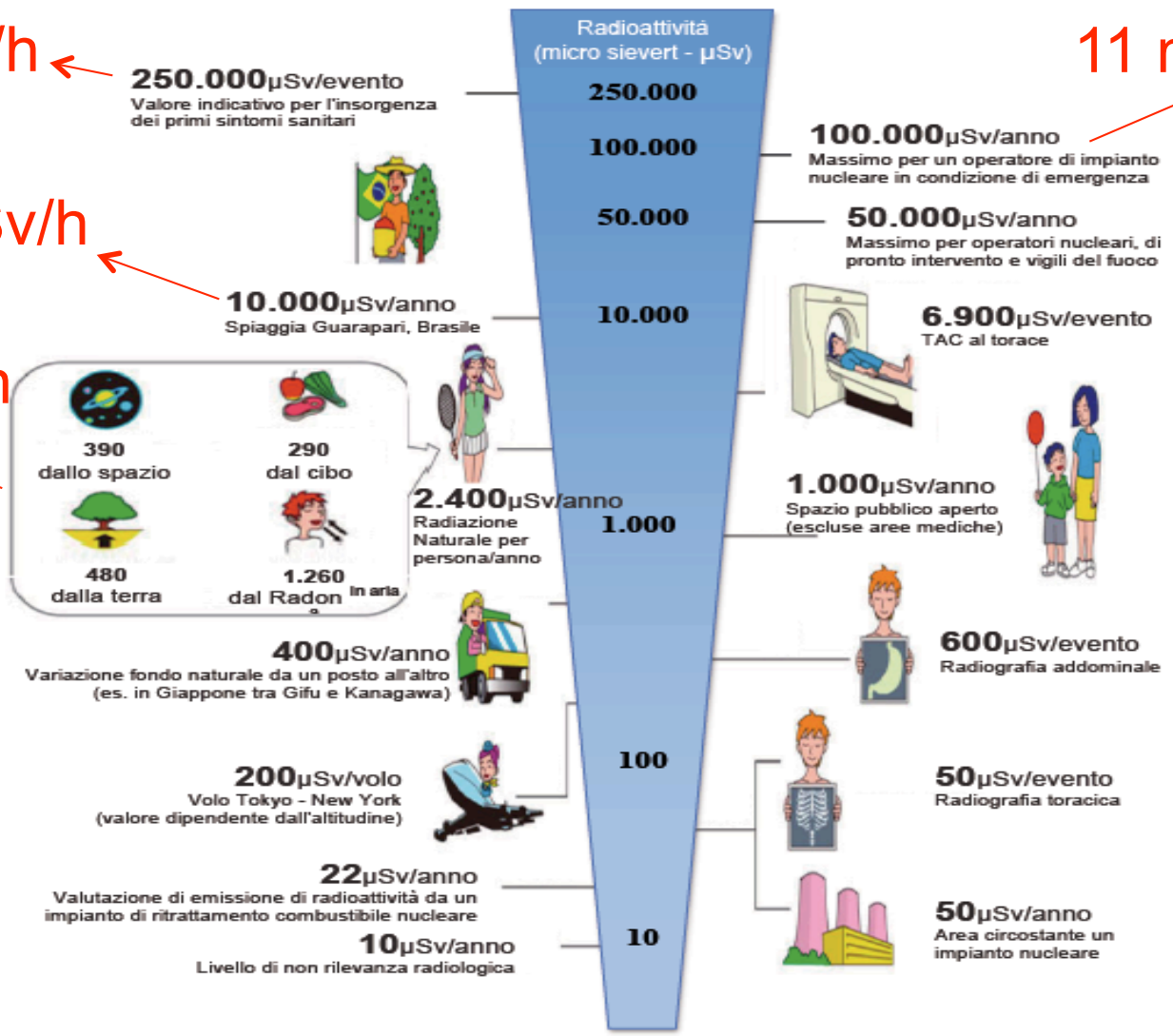
**Media sull'ora**

28,5 microSv/h

1,1 microSv/h

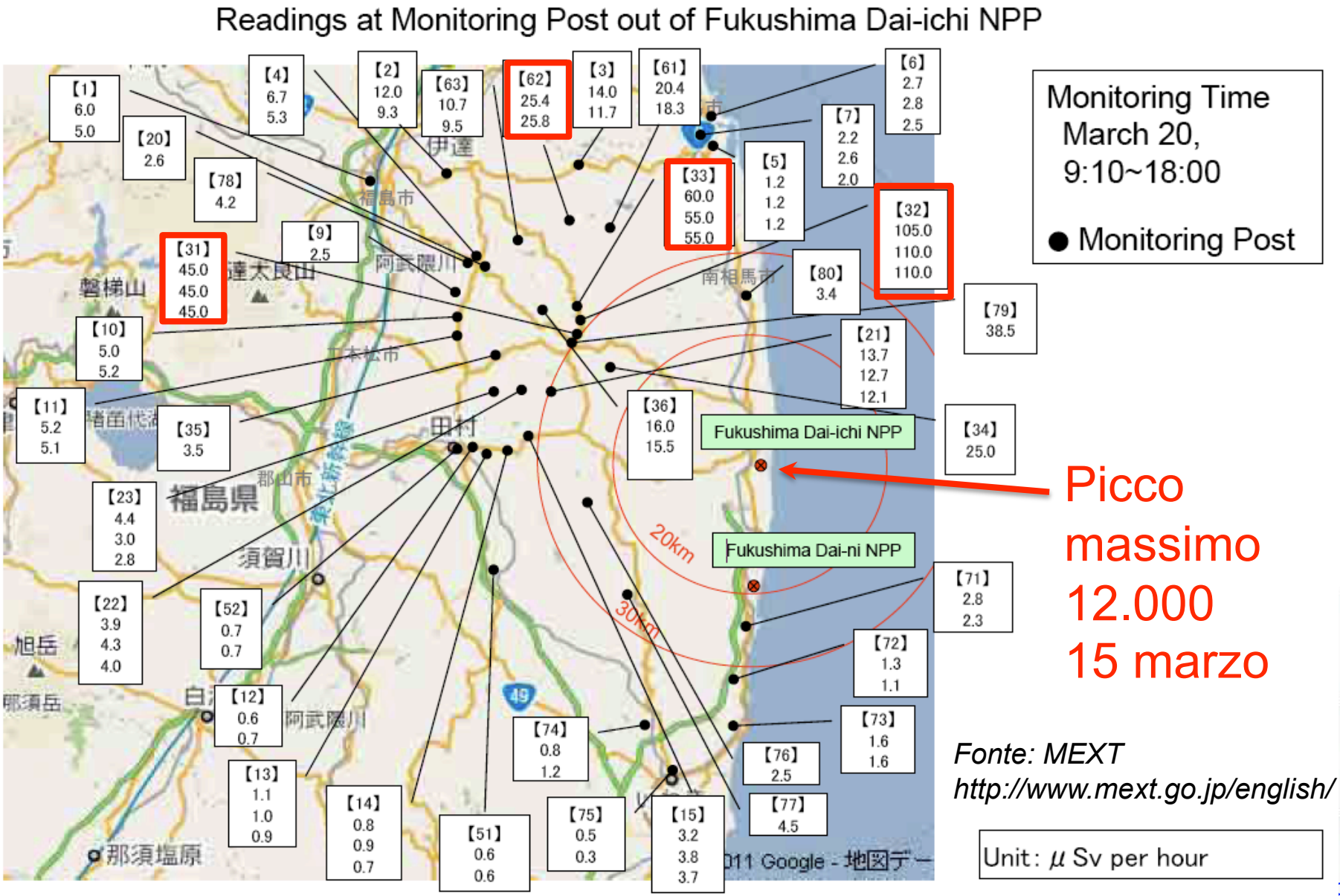
0,3 microSv/h

11 microSv/h




*Fonte: MEXT*
*http://www.mext.go.jp/english/*

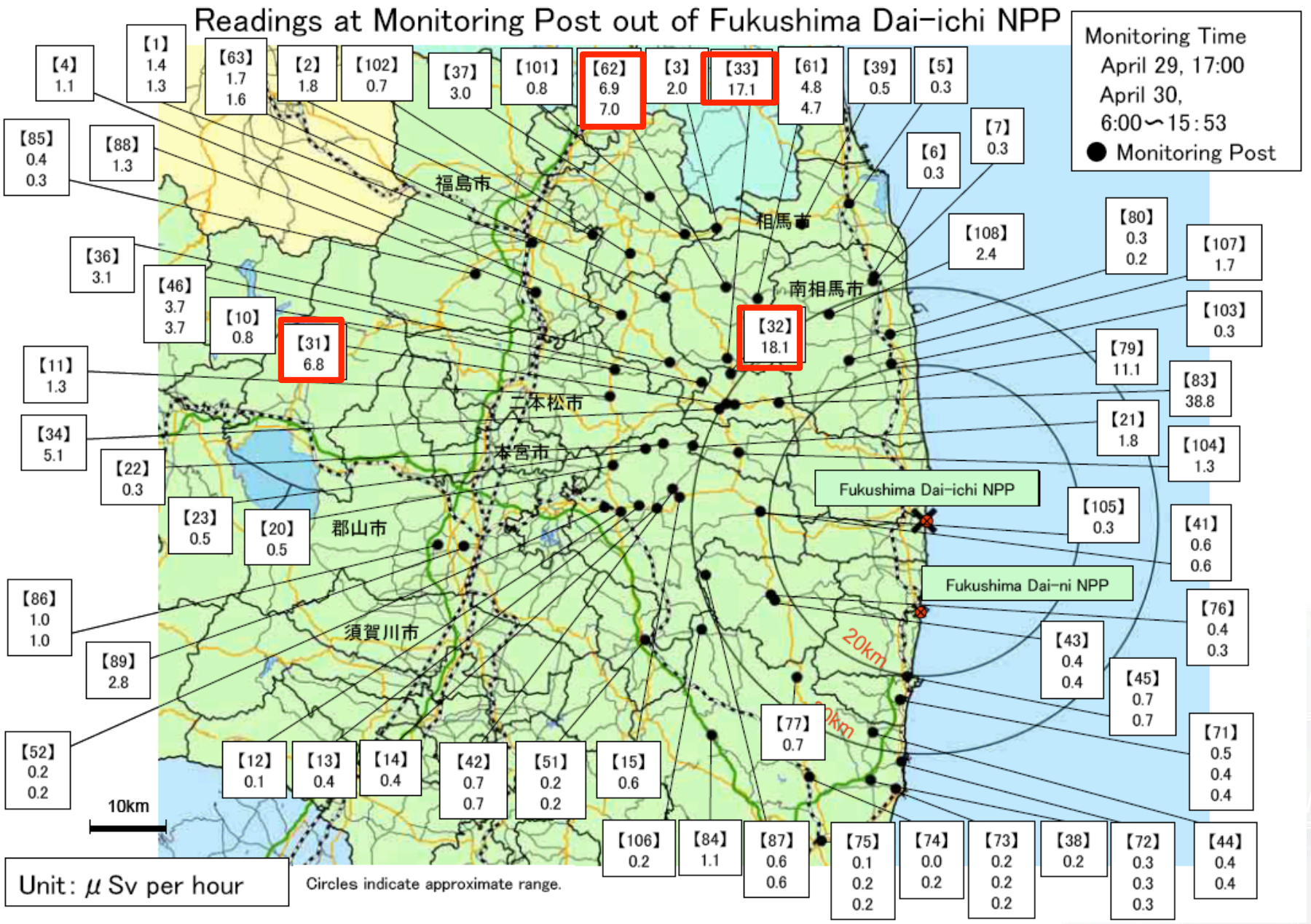
# Dosi radiologiche nelle aree limitrofe DAIICHI – 20 marzo



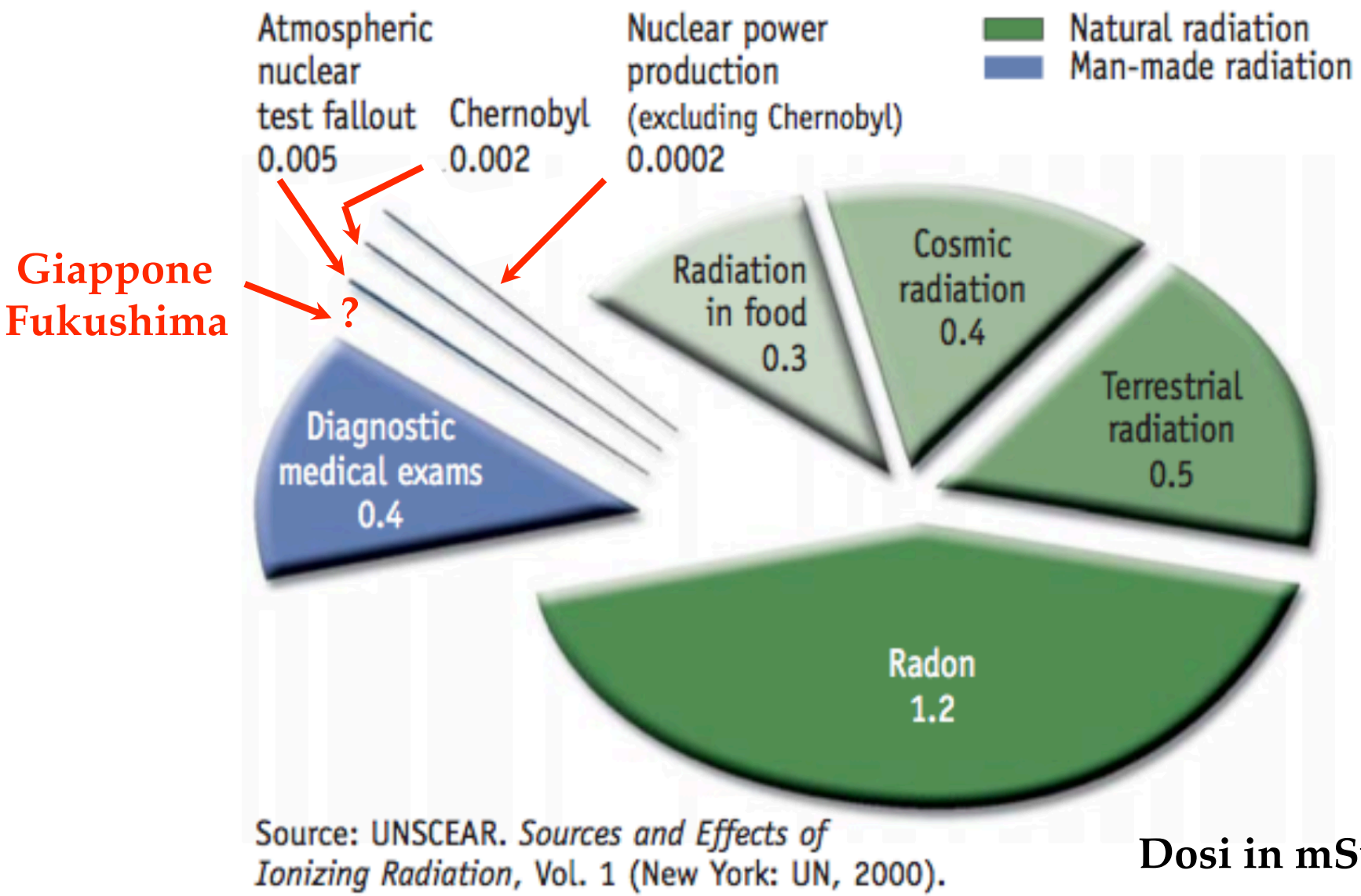

Picco massimo 12.000 15 marzo

*Fonte: MEXT*
*http://www.mext.go.jp/english/*

# Dosi radiologiche nelle aree limitrofe DAIICHI – 29-30 aprile



# Esposizione alle radiazioni ionizzanti




Source: UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Vol. 1 (New York: UN, 2000).

**Dosi in mSv**

# Principi di radioprotezione

Esistono soluzioni provate e sono state maturate numerose esperienze a livello mondiale per la corretta gestione dei materiali radioattivi.

Tuttavia, sono costantemente sviluppate attività di ricerca e sviluppo tecnologico, studi e miglioramenti dei processi, coerentemente ai Principi fondamentali di Radioprotezione:

**Giustificazione**

Nessuna pratica che preveda esposizione a radiazioni deve essere adottata a meno che non produca benefici, all'individuo o alla società, tali da giustificare il danno che causa.

**Limitazione della Dose**

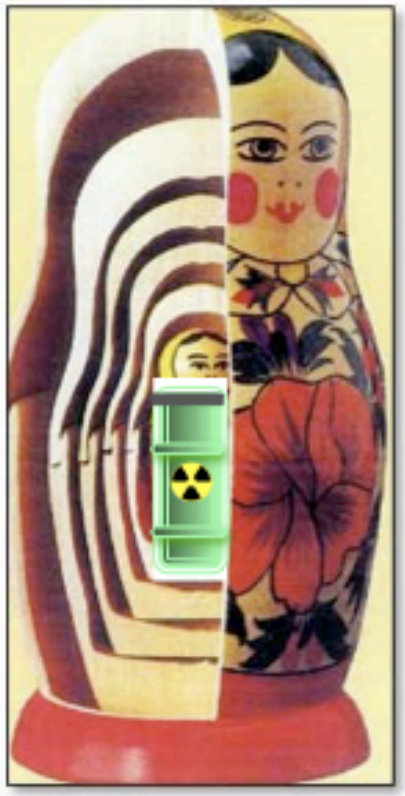
Limiti di dose devono essere adottati in modo che gli individui o i gruppi di individui non eccedano un accettabile livello di rischio.

**Ottimizzazione della Protezione**

Le esposizioni devono essere il più basse ragionevolmente possibile, tenendo conto dei fattori economici e sociali.

**ALARA: As Low As Reasonably Achievable**

# Isolamento dei materiali radioattivi

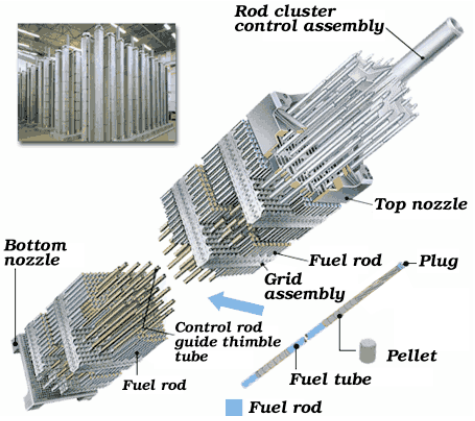


Per prevenire il rilascio della radioattività nell'ambiente, i rifiuti radioattivi sono confinati all'interno di un adeguato numero di barriere artificiali e naturali, con l'obiettivo di:

- ✓ Proteggere le popolazioni (presenti e future) e l'ambiente, fino a quando il contenuto di radioattività non avrà raggiunto un livello comparabile con quello naturale;
- ✓ Non esporre la popolazione a dosi superiori ai livelli stabiliti dalla legge: (**0.01 mSv/anno** in condizioni normali e **1 mSv/anno** in casi incidentali).

# Origine dei rifiuti radioattivi

## Ciclo del **combustibile nucleare**



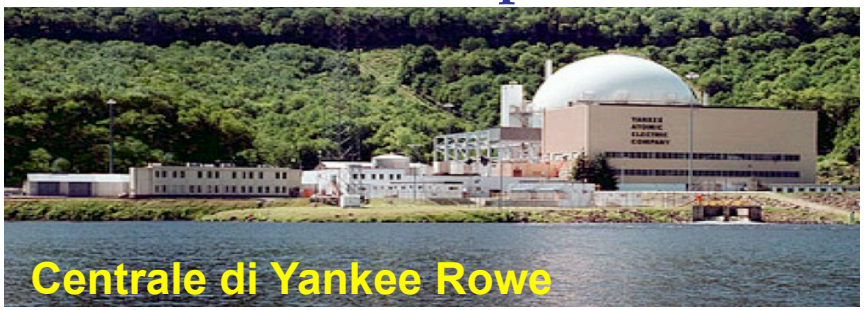

## Ricerca e Medicina

- Ospedali
- Laboratori analisi
- Industria farmaceutica
- Reattori di ricerca

## Industria

- Petrolifera
- Fosfati
- Metallurgica
- ……

## Smantellamento impianti



## Altri

- Rivelatori di fumo
- Parafulmini
- Radio-luminescenti
- Ceneri
- Saldature
- Derivati del Torio (lenti, refrattari)
- ……

# Classificazione e standard di sicurezza

## Guida Tecnica ENEA-DISP n. 26 e D.lgs. 230/95 e smi

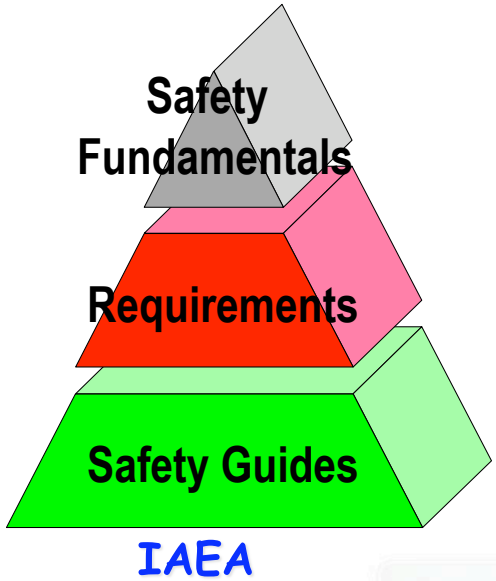
**I Categoria**

Rifiuti che al massimo in **qualche anno**, decadendo, raggiungono concentrazioni di radioattività inferiori …. (*valori trascurabili*) ….. .

**II Categoria**

Rifiuti che entro un massimo di **qualche centinaio di anni** raggiungono concentrazioni di radioattività dell'ordine di alcune centinaia di Bq/g.

Tali rifiuti devono essere trattati e condizionati. La **cementazione** è la tecnologia maggiormente affermata.




**III Categoria**

Rifiuti che richiedono **migliaia di anni** per raggiungere, decadendo, concentrazioni di radioattività di alcune centinaia di Bq/g.

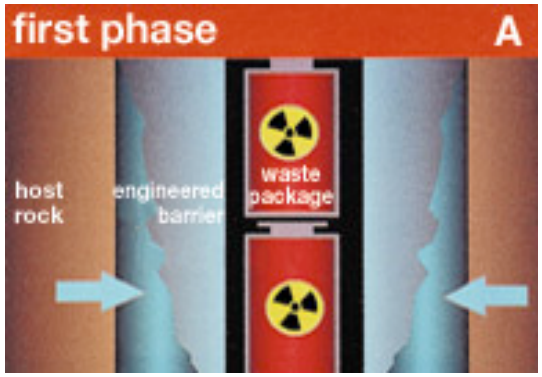
Tali rifiuti devono essere trattati e condizionati, in una forma (vetro, cemento, rocce sintetiche o combustibile incapsulato) compatibile con la formazione geologica dove saranno smaltiti.

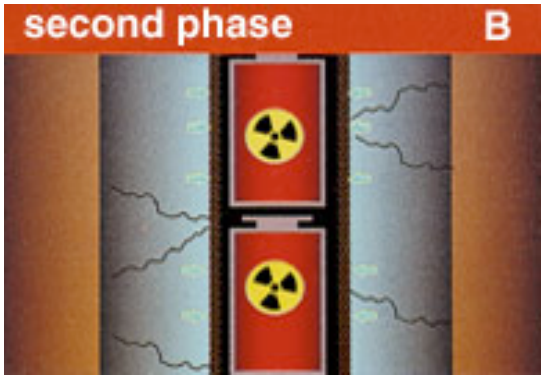
# Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi

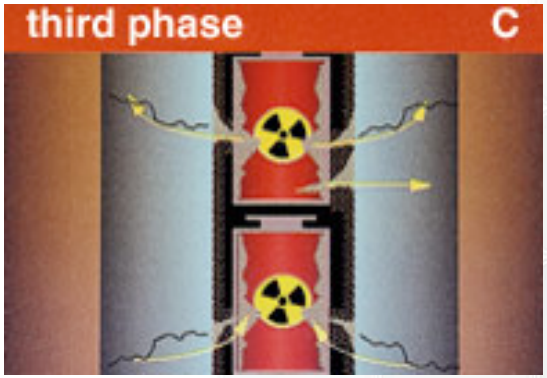
Il Deposito Superficiale o sub superficiale è costituito da "sole" (o quasi) barriere artificiali (opere ingegneristiche), idonee a mantenere confinata la radioattività per un periodo relativamente "breve" (tipicamente inferiore a 1000 anni), comunque sufficiente al decadimento radioattivo.

Il Deposito Geologico è costituito da barriere artificiali (opere ingegneristiche) e barriere naturali stabili (formazioni saline, argillose, granitiche, etc.), idonee a mantenere confinata la radioattività per un periodo relativamente "lungo" (superiore a diverse centinaia di migliaia di anni), sufficiente al decadimento radioattivo.

La qualificazione dei depositi è effettuata (Performance Assessment) con lunghi studi ed approfondite analisi dei fenomeni di dispersione della radioattività attraverso le barriere protettive.



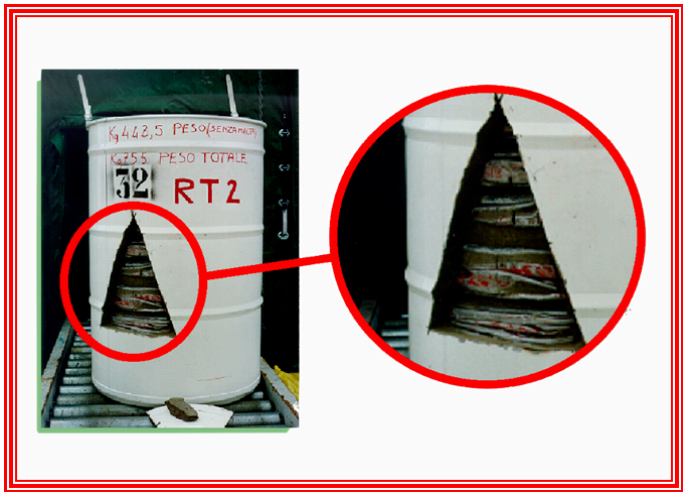
# Condizionamento rifiuti: cementazione

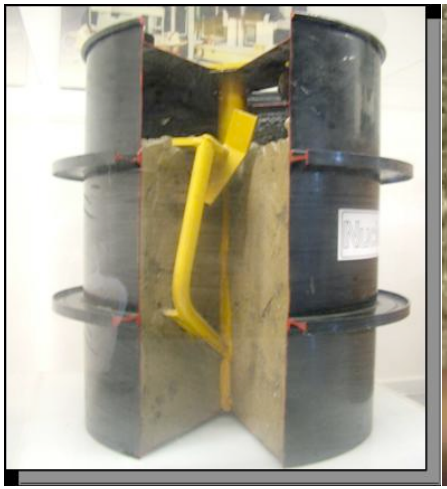
Il “condizionamento” è la conversione in una forma solida stabile e duratura, che ne consenta la manipolazione, lo stoccaggio, il trasporto e lo smaltimento.

## Cementazione

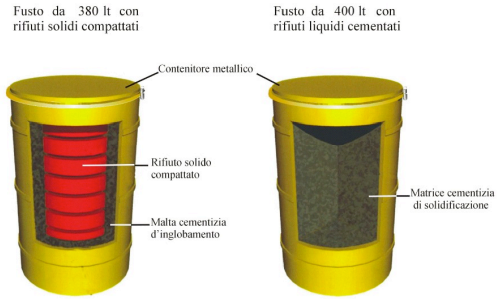
Rifiuti solidi compattati

Rifiuti liquidi omogenei





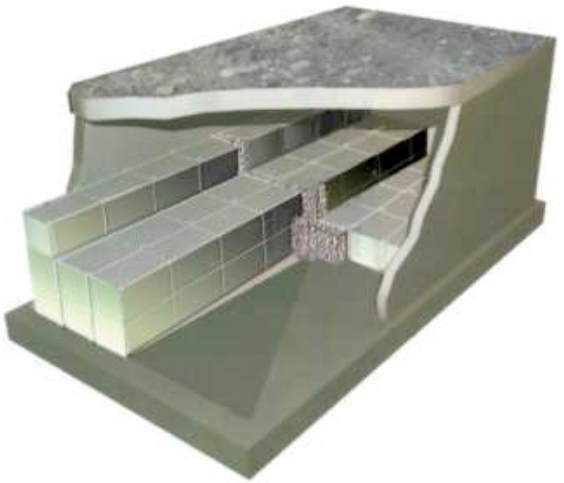
# Smaltimento superficiale



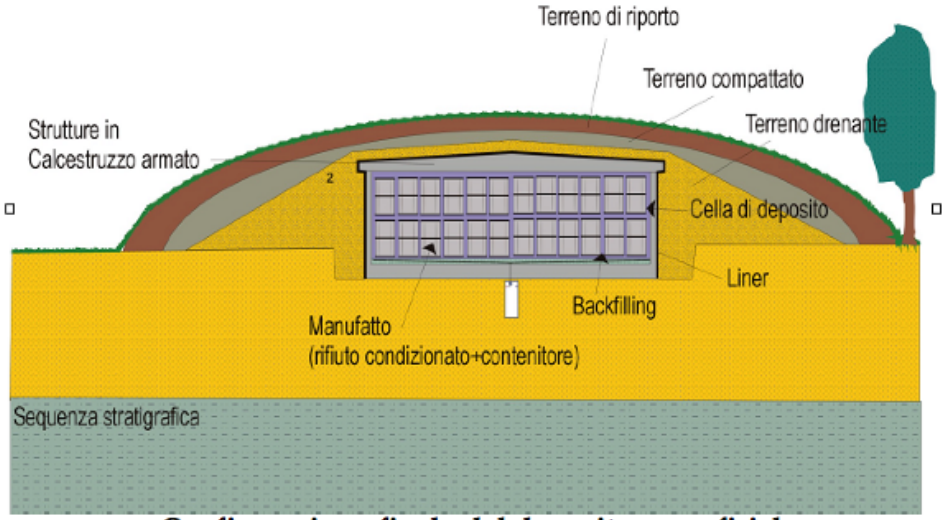

Condizionamento

Caratterizzazione e inventario

Modulo di isolamento



Cella di smaltimento



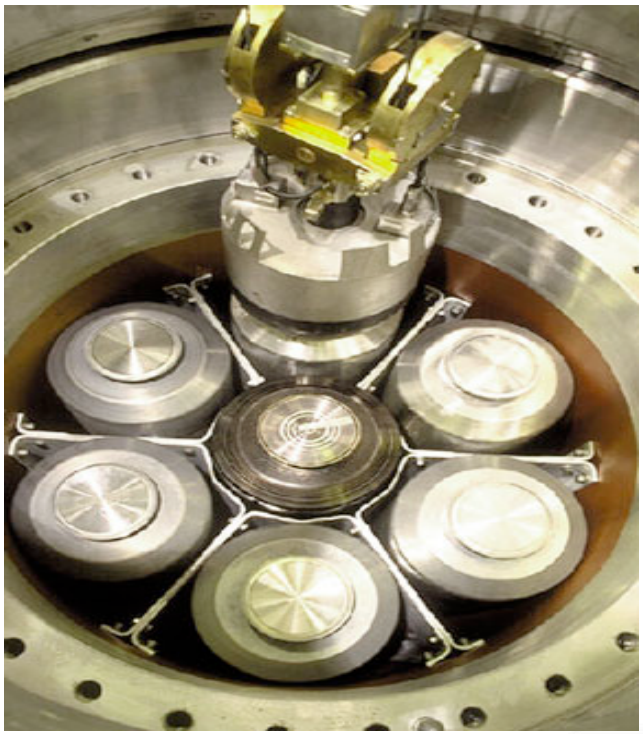

**Configurazione finale del deposito superficiale**

# Condizionamento rifiuti: Vetrificazione

## Vetrificazione

Fusione vetro e colata

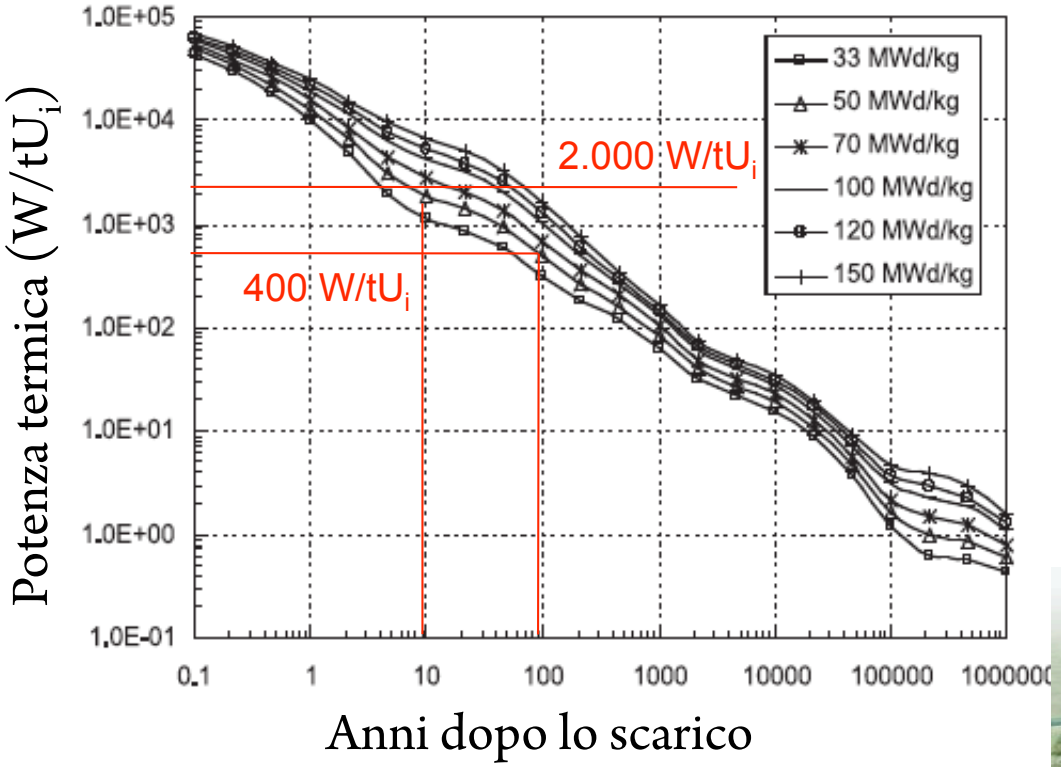
Contenitore
H = 1.3 m ø = 0.4 m



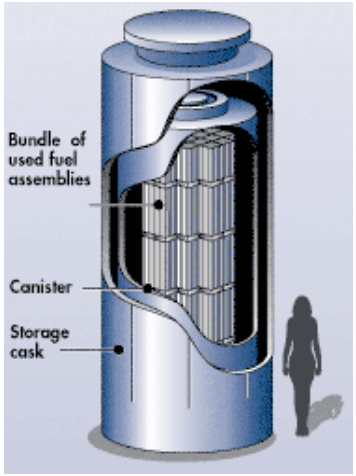
Contenitore di trasporto e stoccaggio

# Combustibile esausto: Potenza termica

Elaborazione dati: NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING: 151, 261–273 (2005)



THORP, Sellafield, UK




Cask, U.S. NRC

Deposito temporaneo Aomori, Giappone

Tempo di durata: 50 anni
Capacità: 5.000 tU
Dimensioni: 130 m x 60 m x 30 m (Fase I, 3.000 tU)

**Produzione Spent Fuel**

Fino al 2030, ~10.000 t/y; nel 2050 ~ 20.000 t/y.

Accumulo al 2050: ~ 700.000 t

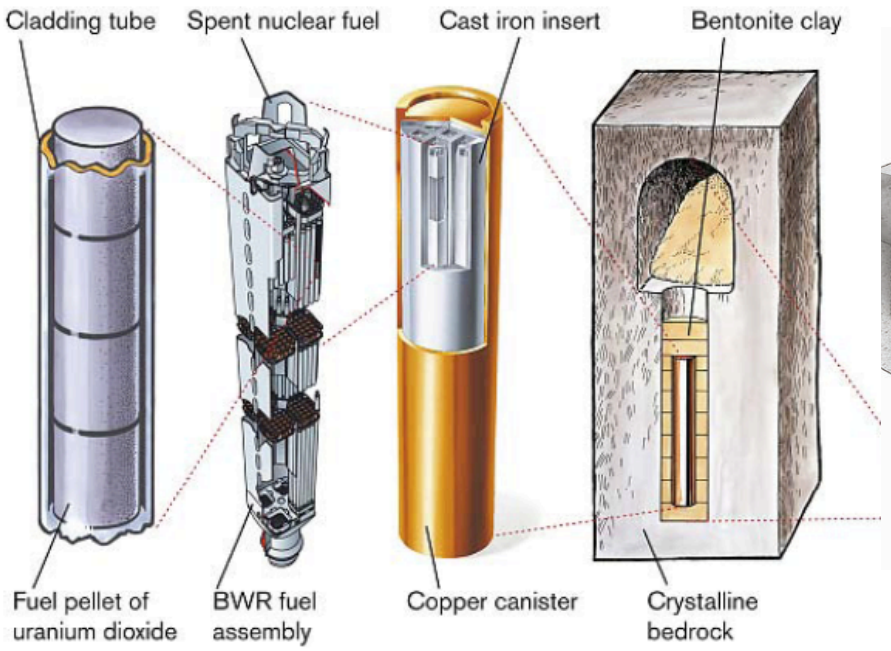
Un reattore da 1.600 MW in 60 anni produce

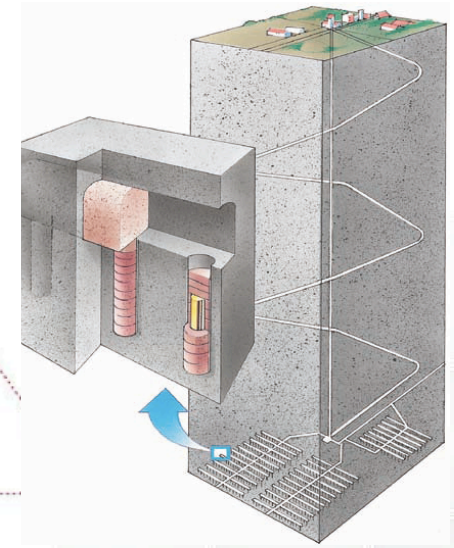
~ 3.200 elementi esausti (area ~ 450 m$^2$ x 6 m)

# Smaltimento geologico

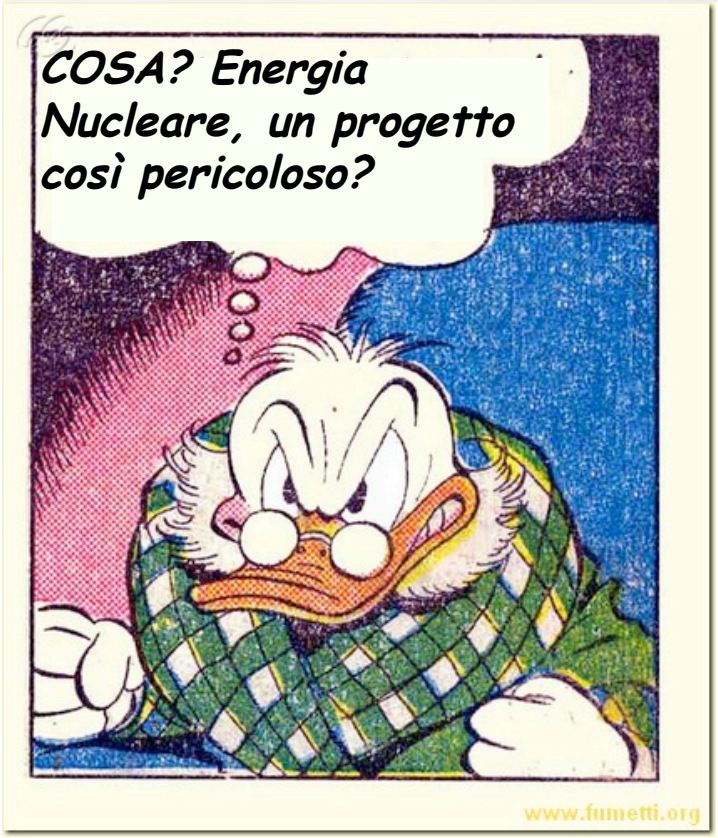
Lo smaltimento in profondità dei rifiuti radioattivi a lunga vita ed alta attività e del combustibile irraggiato è attivamente avviato in Finlandia, Svezia, Stati Uniti, mentre altri Paesi (Francia, Giappone, Belgio, etc) sono in una fase di studio e di progetto molto avanzata (**Laboratori Sotteranei**).
Le formazioni geologiche scelte sono principalmente i depositi salini, le sedimentazioni argillose e le rocce granitiche.

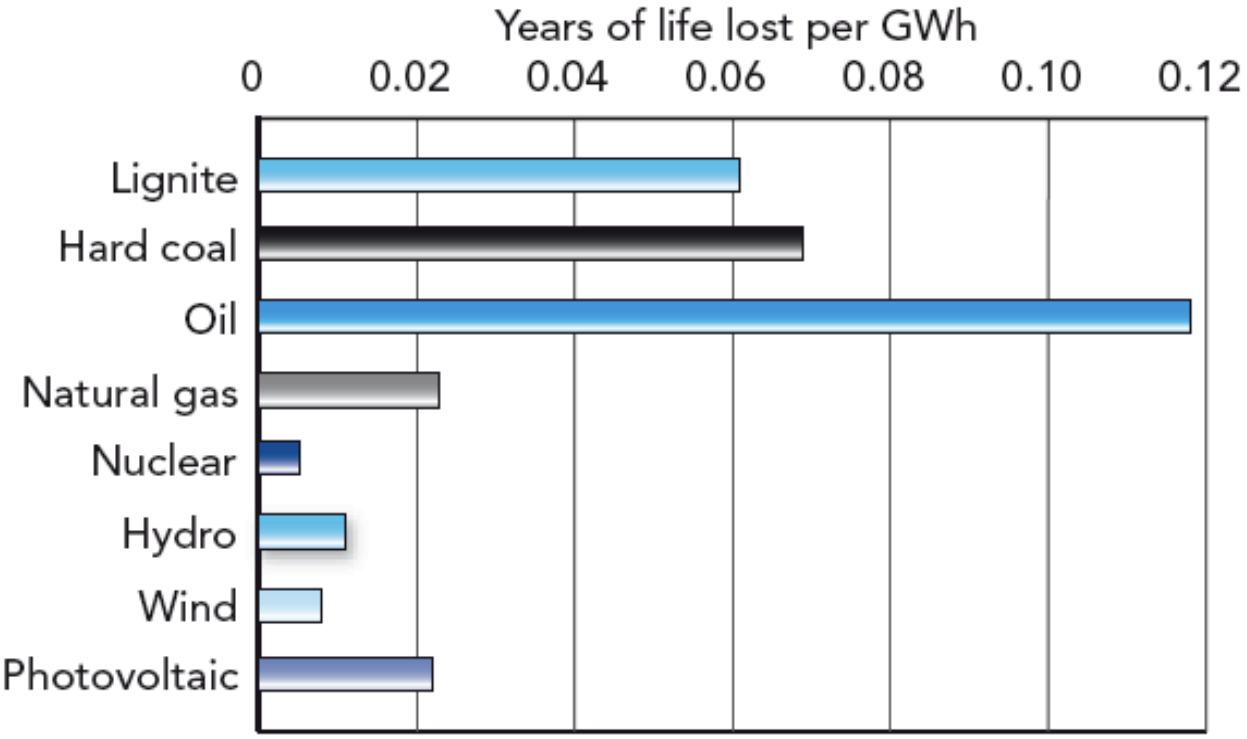
**Forsmark, Svezia**
Costruzione: 2015-2022
Esercizio: 2023-2070
Formazione di granito
500 m di profondità

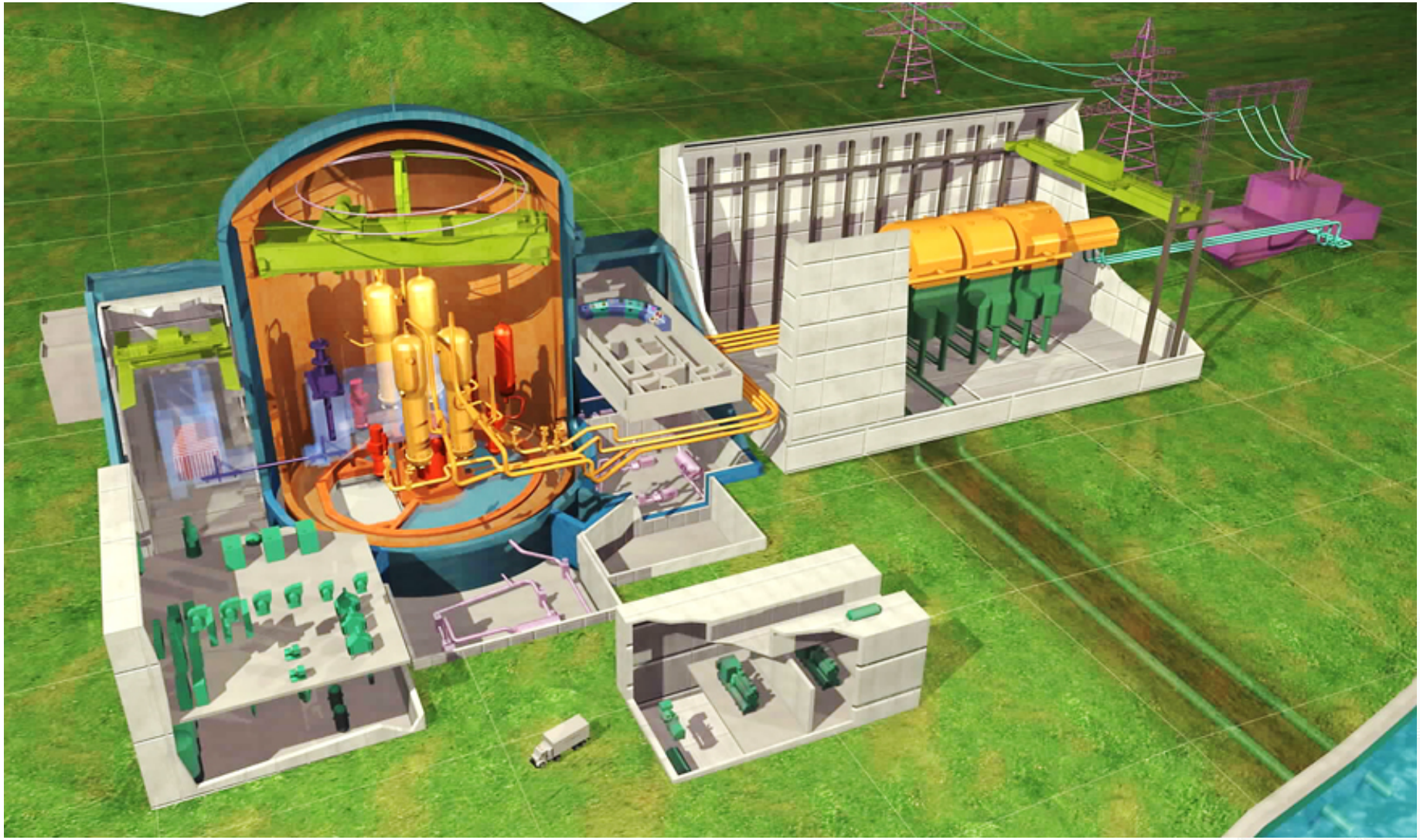


# Produzione elettronucleare ?




Source: based on Hirschberg *et al.* (2004).

# Reattori di generazione III+ (EPR)