



POLITECNICO
MILANO 1863

ENERGIA NUCLEARE: opportunità e problemi

Prof. Marco E. Ricotti
Politecnico di Milano, Dept. of Energy
CeSNEF-Nuclear Engineering division

2018 Febbraio

premesse

• FOSSILI

- Carbone
- Petrolio
- Gas Naturale



• NUCLEARE

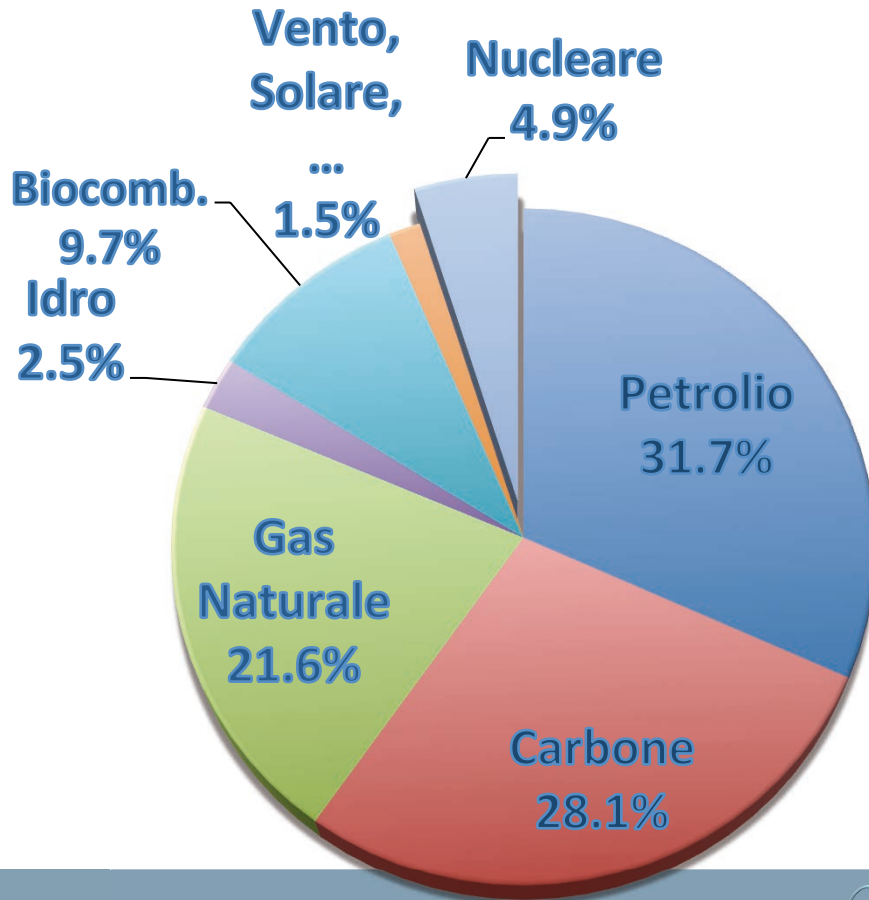


• RINNOVABILI

- Idro
- Vento
- Sole
- Maree
- Biomasse
- Geotermia



Consumo Mondiale di Energia – 2015 13 647 MTEP



PROBLEMATICHE

• AUMENTO POPOLAZIONE

- Aumento consumi
- Paesi in via di sviluppo

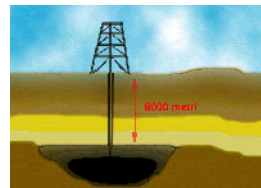


• IMPATTO AMBIENTALE

- Emissioni CO₂ e altri gas serra



• ESAURIMENTO FONTI?



LE SFIDE DELLO SVILUPPO

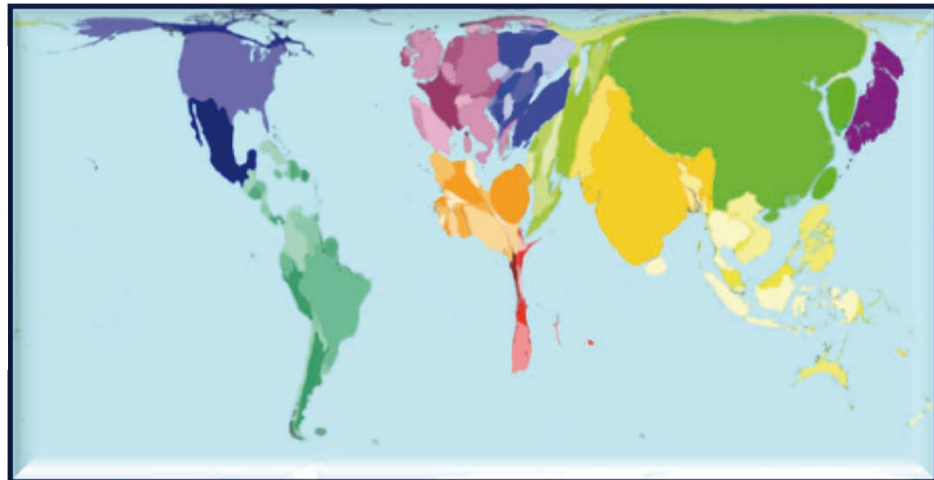
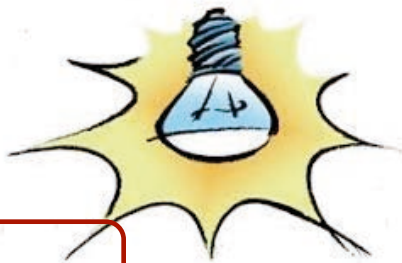
e la questione energetica: curiosità e numeri

2018 Feb.

5

Quante persone **NON** hanno accesso **all'elettricità**?

- * 20 Milioni
- * 200 Milioni
- * 1000 Milioni
- * 2000 Milioni



Quante persone **NON** hanno accesso **all'acqua**?

- * 20 Milioni
- * 200 Milioni
- * 1000 Milioni
- * 2000 Milioni



Qual è la **superficie necessaria** per produrre biocombustibile per il consumo annuale di una macchina media (15 000 km/anno, 8 l/100 km):

- * 100 m²
- * 1.000 m²
- * 10.000 m²
- * 1.000.000 m²

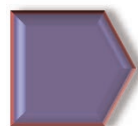


In Italia sono immatricolate 36.105.000 auto (*dati ACI al 31.12.2008*)

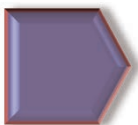
⇒ Se si considera una percorrenza media per auto di 15.000 km/anno, con un consumo medio di 8 l/100 km, sono **necessari 240.700 km²**

⇒ **L'Italia** ha una superficie di **301.338 km²** (di cui 50% coltivabile)

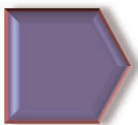
TUTTI dovrebbero avere accesso all'energia



1.4-1.6 miliardi **NON**
hanno accesso all'energia elettrica



1 altro miliardo **NON** ha accesso
a reti elettriche affidabili



2.8 miliardi si affidano alla
biomassa per i bisogni domestici

Ma non è così!

80% vive nei PVS

99% nelle zone rurali

90% periferie informali

5-15% blackout

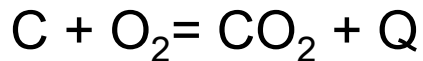
15% efficienza

1.4 milioni di morti/anno

perché interessa l'Energia Nucleare



Reazioni chimiche:



energia liberata

(Q=3.6 eV)

(Q=9.22 eV)

1

3

Reazioni nucleari:



235 nucleoni $\times$ 0.9 MeV =

(Q=211.5 MeV)

23 000 000

***Il fattore
"Mega"***



ENERGIA NUCLEARE – perché interessa?

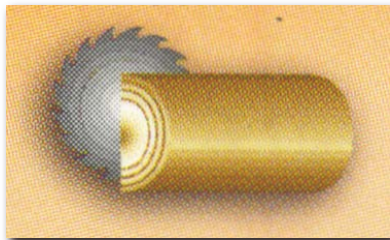
2018 Feb.

10



5 g

=



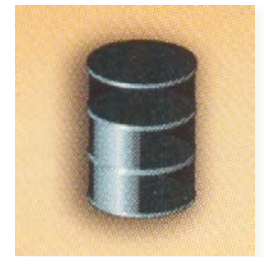
640 kg



360 m³



400 kg



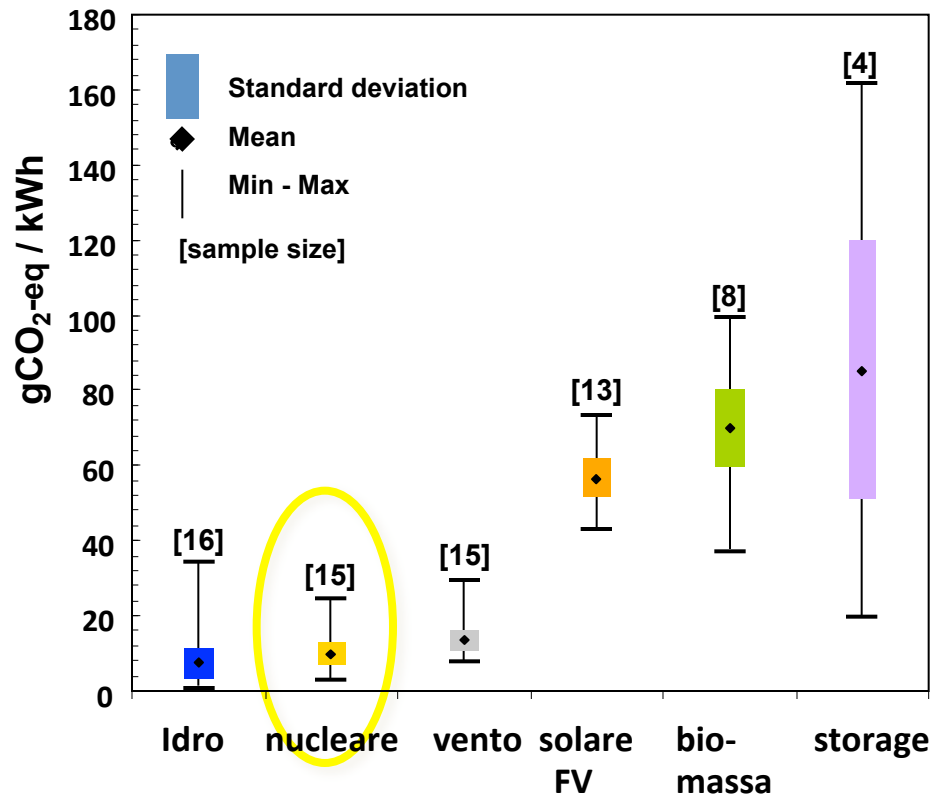
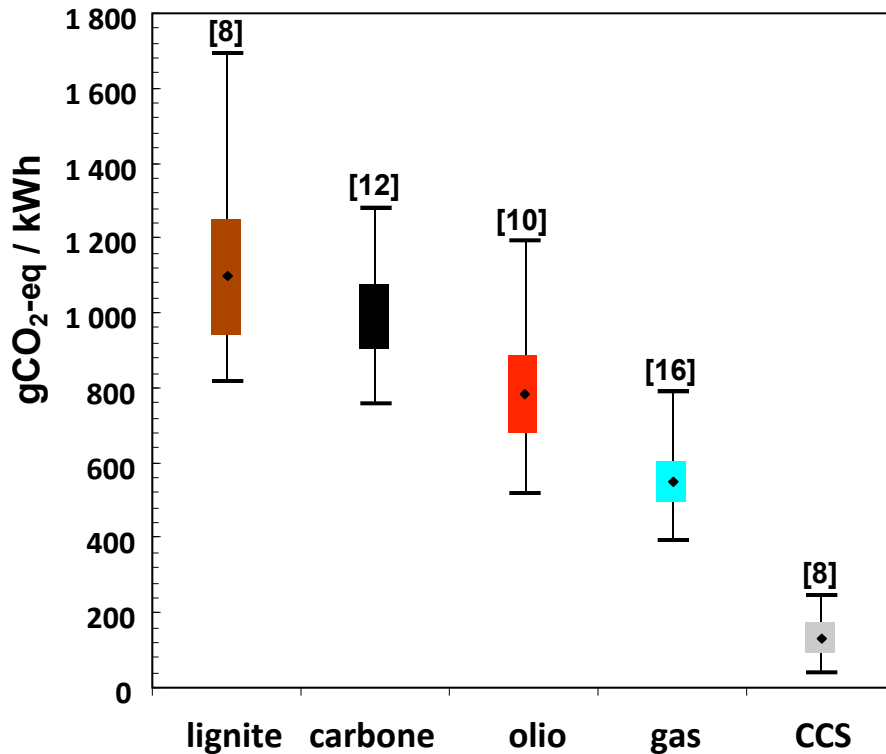
350 kg

ENERGIA NUCLEARE – perché interessa?

Produzione di CO₂ delle fonti energetiche

2018 Feb.

11



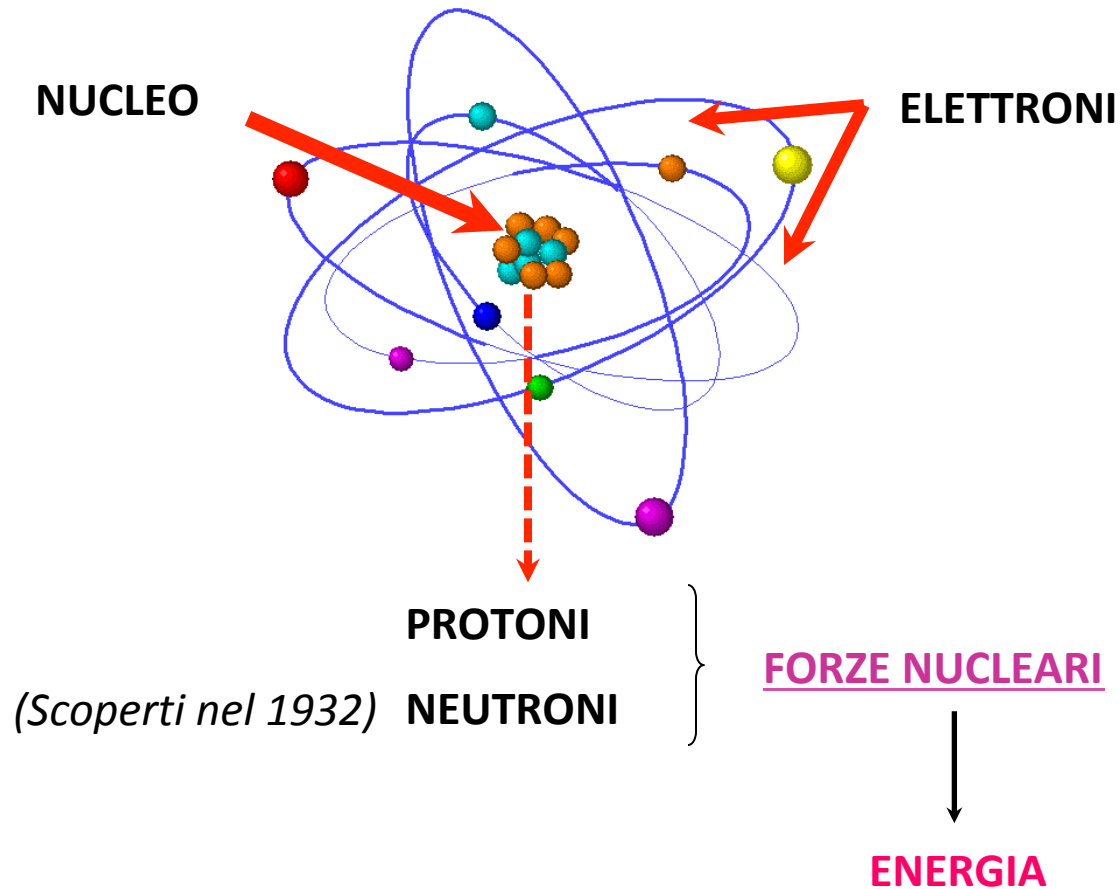
Energy Policy, 1997, vol.25, Joop F. van de Vate, "Comparison of energy sources in terms of their full energy chain emission factors of greenhouse gases"

Energy, 2007, vol 32, Daniel Weisser, "A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies"

- L'Energia è una equazione molto **complessa** – non ci sono soluzioni facili
- L'Energia Nucleare è di solito economica, o **competitiva** con le altre fonti, ma a certe condizioni
- L'Energia Nucleare, come le Rinnovabili, non emette (quasi) CO₂ e quindi **non contribuisce al riscaldamento globale**
- L'Energia Nucleare richiede alte competenze e una industria di qualità, quindi è usata anche per sviluppare **l'economia** di un Paese

come funziona l'Energia Nucleare





**Uranio in natura
(3 parti per milione nella terra):**

U^{234} : 0.006%

U^{235} : 0.7%

U^{238} : 99.2%



sfruttamento
dell'Uranio

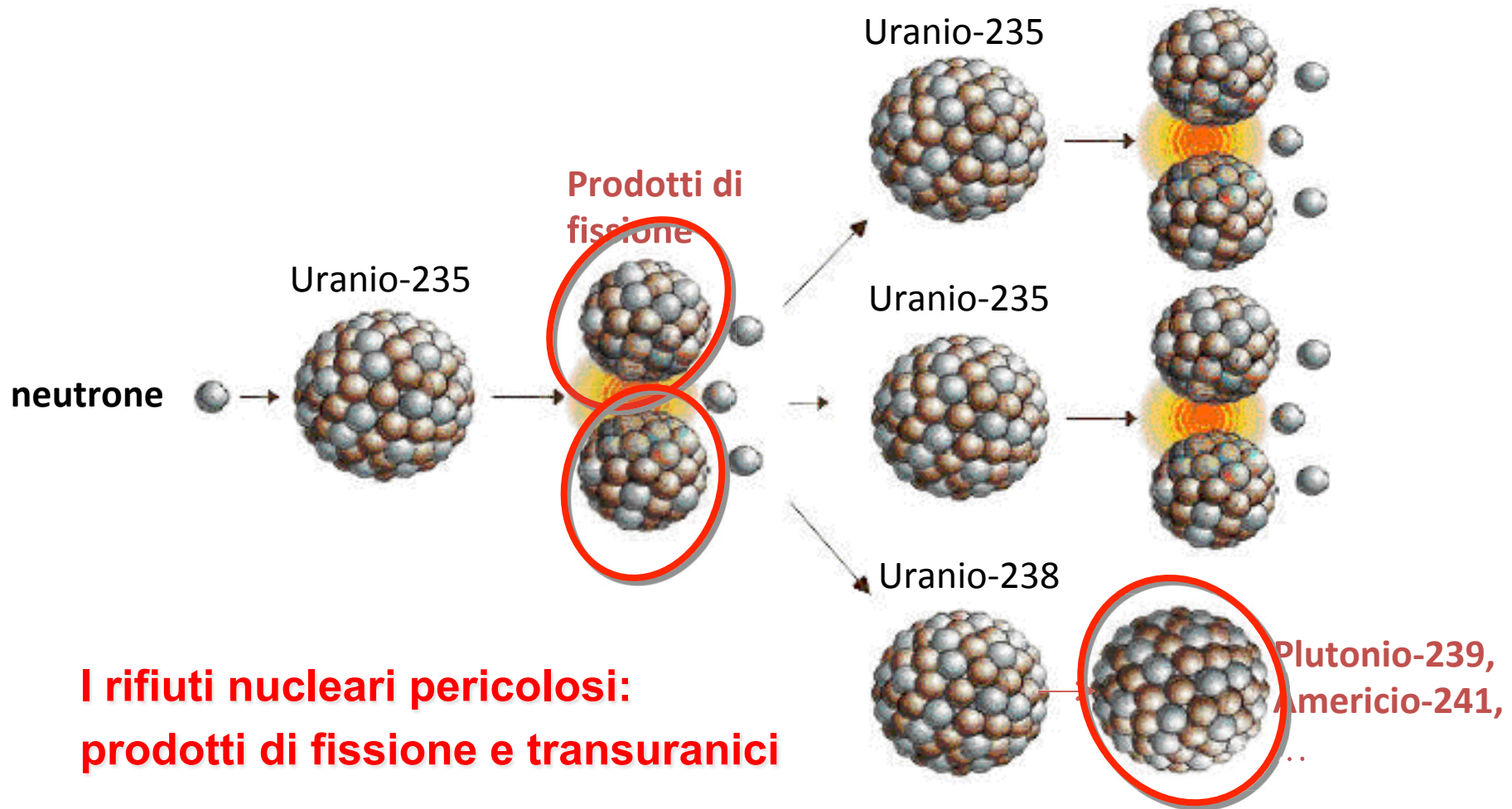
OGGI

0.7%



DOMANI

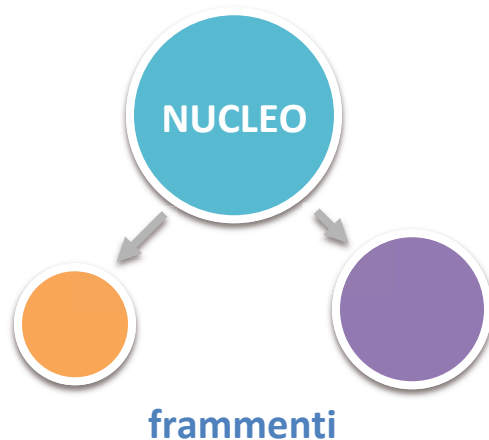
70%



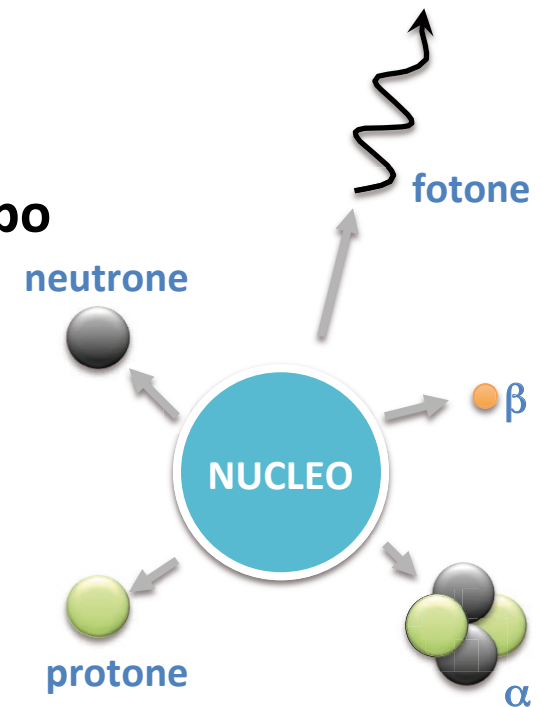


Nuclei **STABILI** → inalterati nel tempo

Nuclei **INSTABILI** → cambiano nel corso del tempo

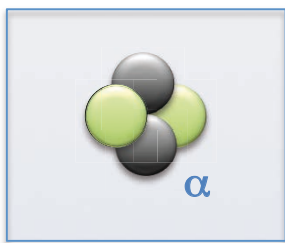


- si rompono in vari frammenti
- emettono PARTICELLE o RADIAZIONI



- Le particelle cariche pesanti, come i **protoni** e le **particelle α** perdono energia nella materia principalmente per collisioni con gli elettroni del mezzo

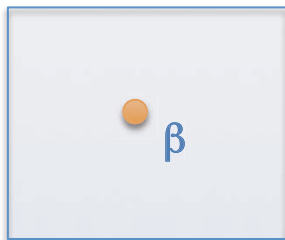
particella α : pesante



- pericolosa se inalata (*irraggiamento interno*)
- non pericolosa per irraggiam. esterno (bloccata da foglio di carta)
- in aria compie un percorso di 1 cm

- Le particelle cariche leggere, come gli **elettroni** e le **particelle β** perdono energia nella materia principalmente per collisioni con gli elettroni e i nuclei del mezzo

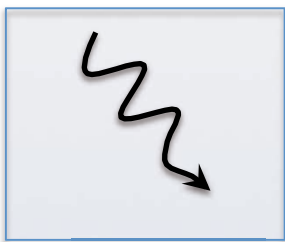
particella β : leggera



- attenzione anche all'irraggiamento esterno
- in aria compie un percorso di 330 cm

- Le radiazioni elettromagnetiche, come i **raggi X** e i **fotoni γ** perdono energia nella materia principalmente per collisioni con gli elettroni e i nuclei del mezzo

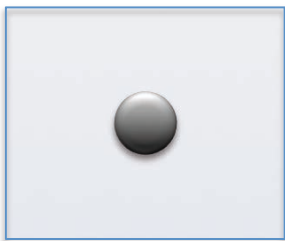
Raggi X e γ :



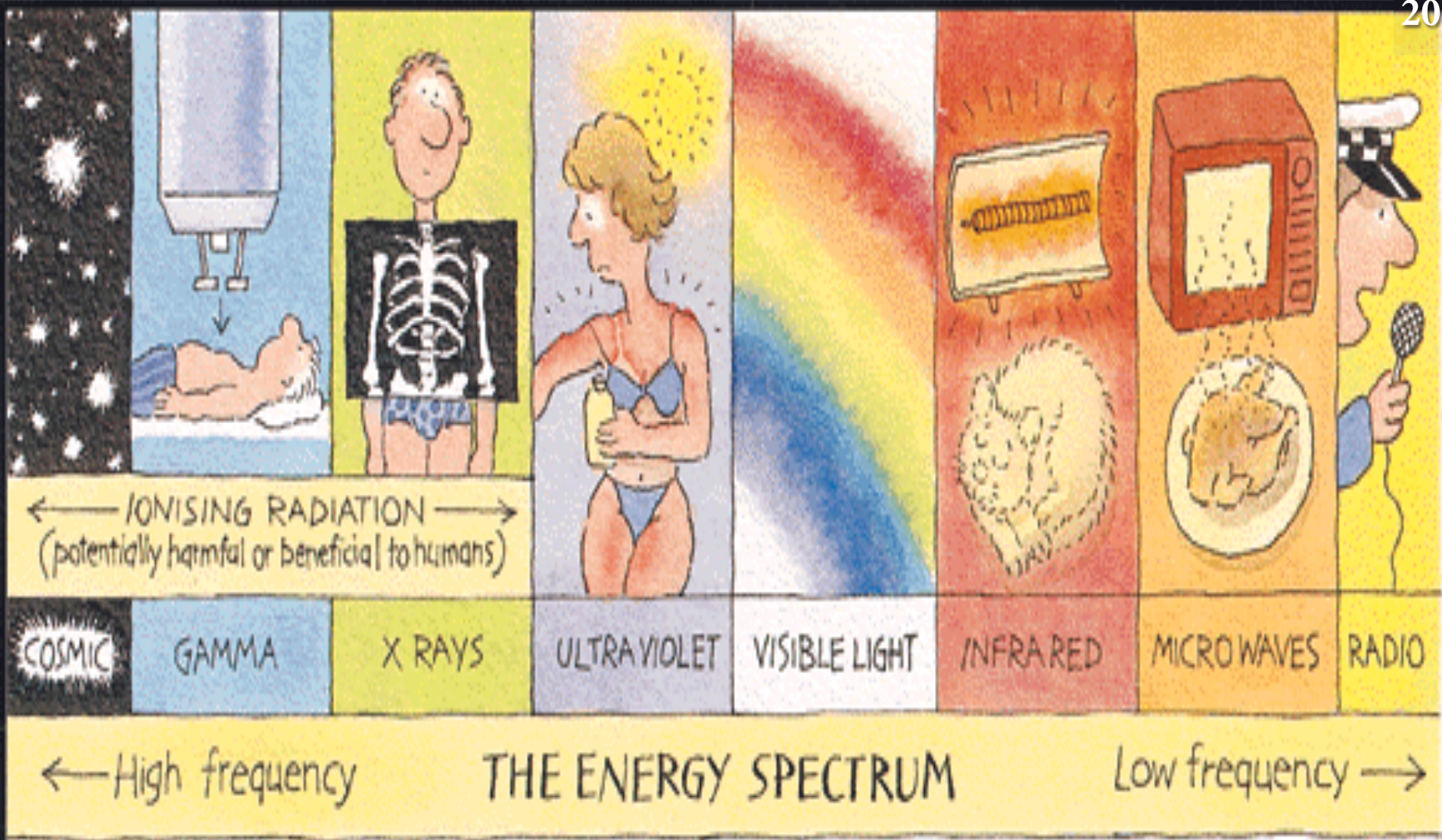
- interazioni *puntuali* con i bersagli**
- pericoloso l'irraggiamento esterno**
- per schermarle sono necessari spessori elevati di materiali pesanti**

- I **neutroni** interagiscono con la materia dando origine ad altre reazioni oltre alla fissione, tra cui cattura (con/senza espulsione di particelle cariche) e attivazione

Neutrone:



- non ha carica elettrica**
- attenzione anche all'irraggiamento esterno**



come è fatto un reattore nucleare



COSA SERVE PER FARE UN REATTORE NUCLEARE?

2018 Feb.

23



- Uranio
- Plutonio
- Torio



- Acqua
- CO₂
- Elio
- Sodio liquido
- Piombo liquido

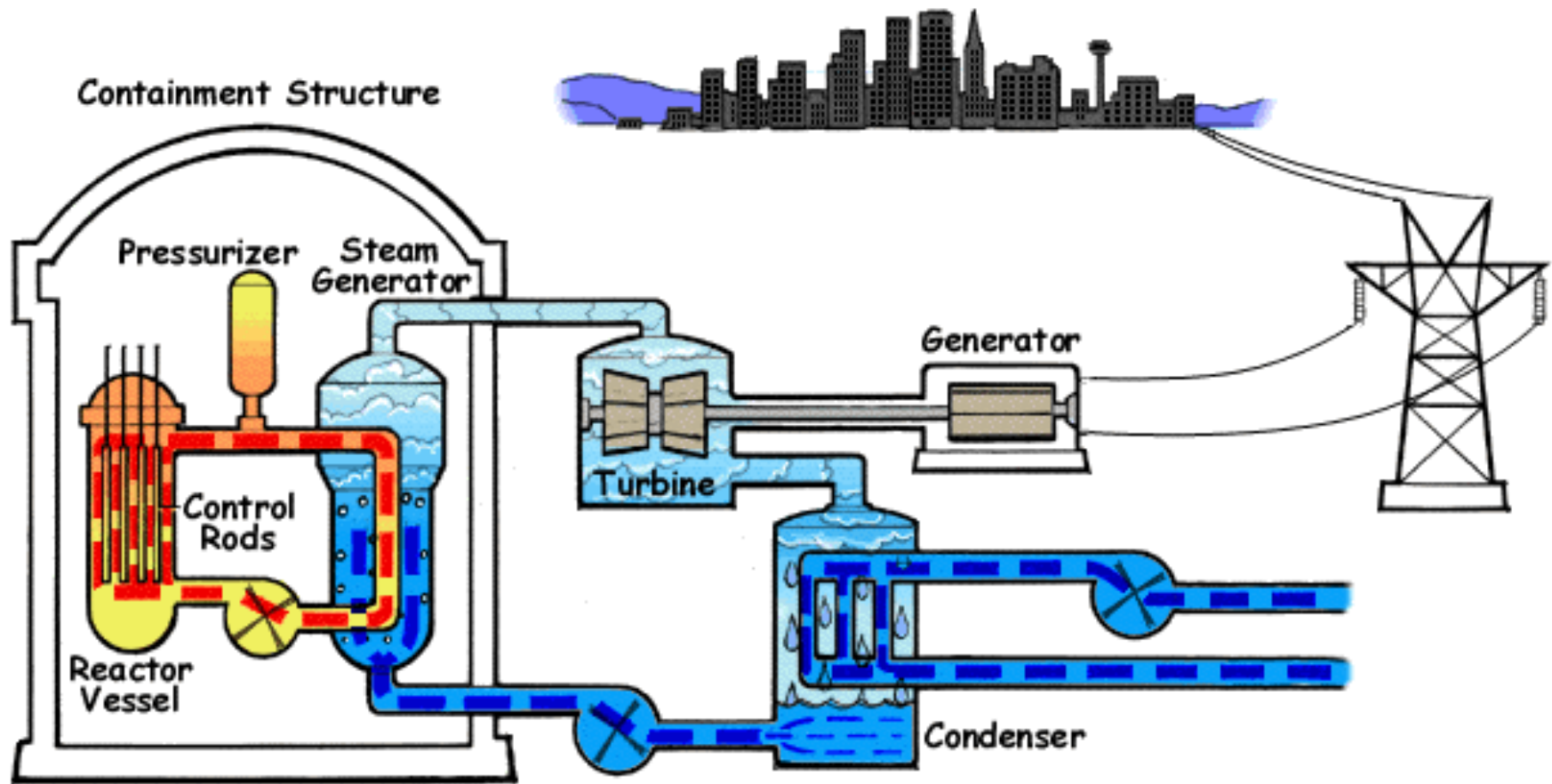


- Acqua
- Acqua "pesante"
- Grafite
- Berillio

Pressurised Water Reactor (PWR)

2018 Feb.

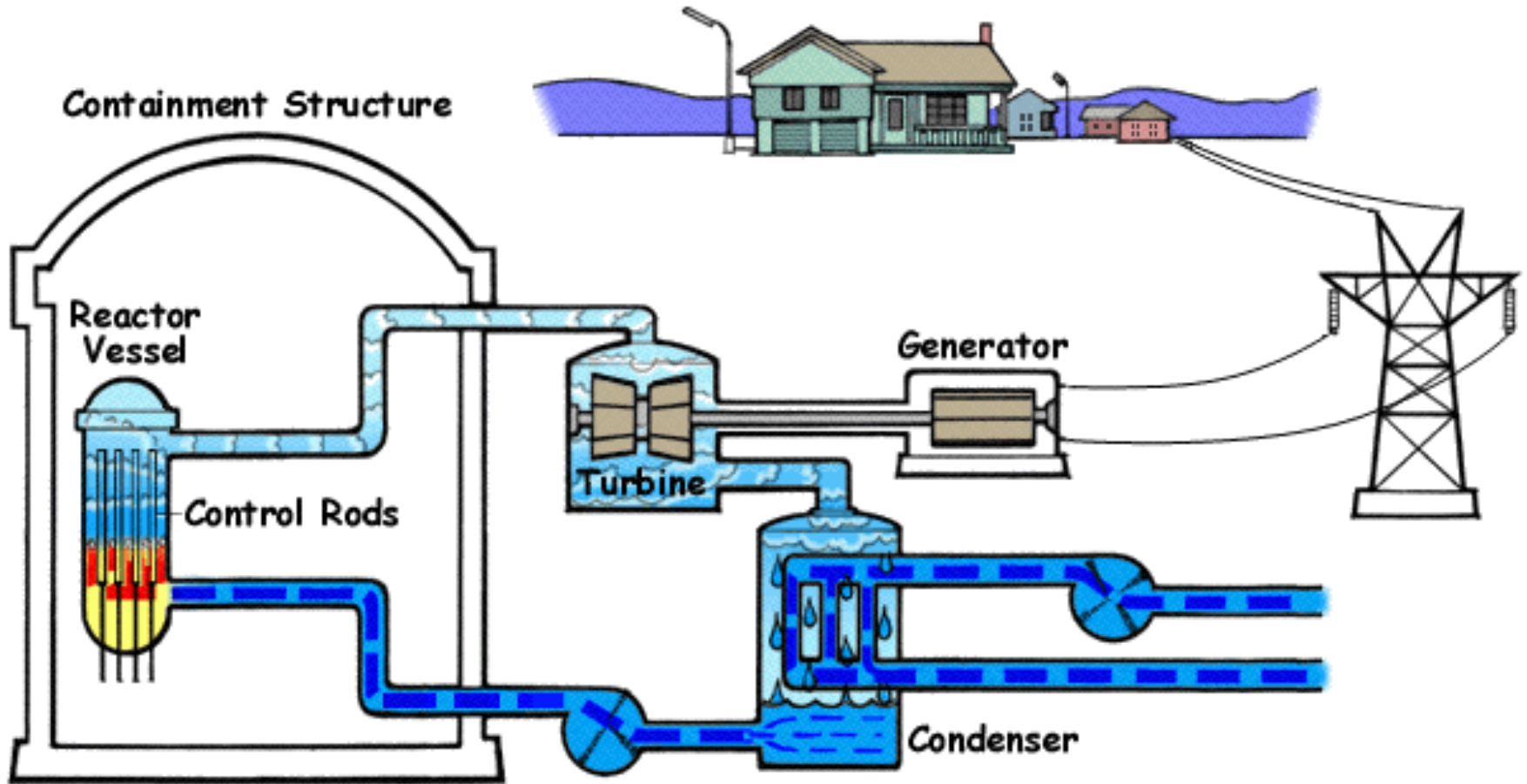
24



Boiling Water Reactor (BWR)

2018 Feb.

25



un reattore nucleare è sicuro



Perché una centrale nucleare è diversa dalle altre centrali?

2018 Feb.

27

Problemi del Reattore Nucleare:

1. UN REATTORE NUCLEARE PUO' AUMENTARE LA PROPRIA POTENZA OLTRE IL VALORE DI NORMALE FUNZIONAMENTO

2. UN REATTORE PRODUCE CALORE ANCHE DOPO LO SPEGNIMENTO ("POTENZA DI DECADIMENTO")

3. UN REATTORE NUCLEARE PUO' SVILUPPARE REAZIONI CHIMICHE ESOTERMICHE (PRODUZIONE DI H₂)

Sistemi di Sicurezza:

BARRE DI CONTROLLO (SCRAM)

SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO DI EMERGENZA

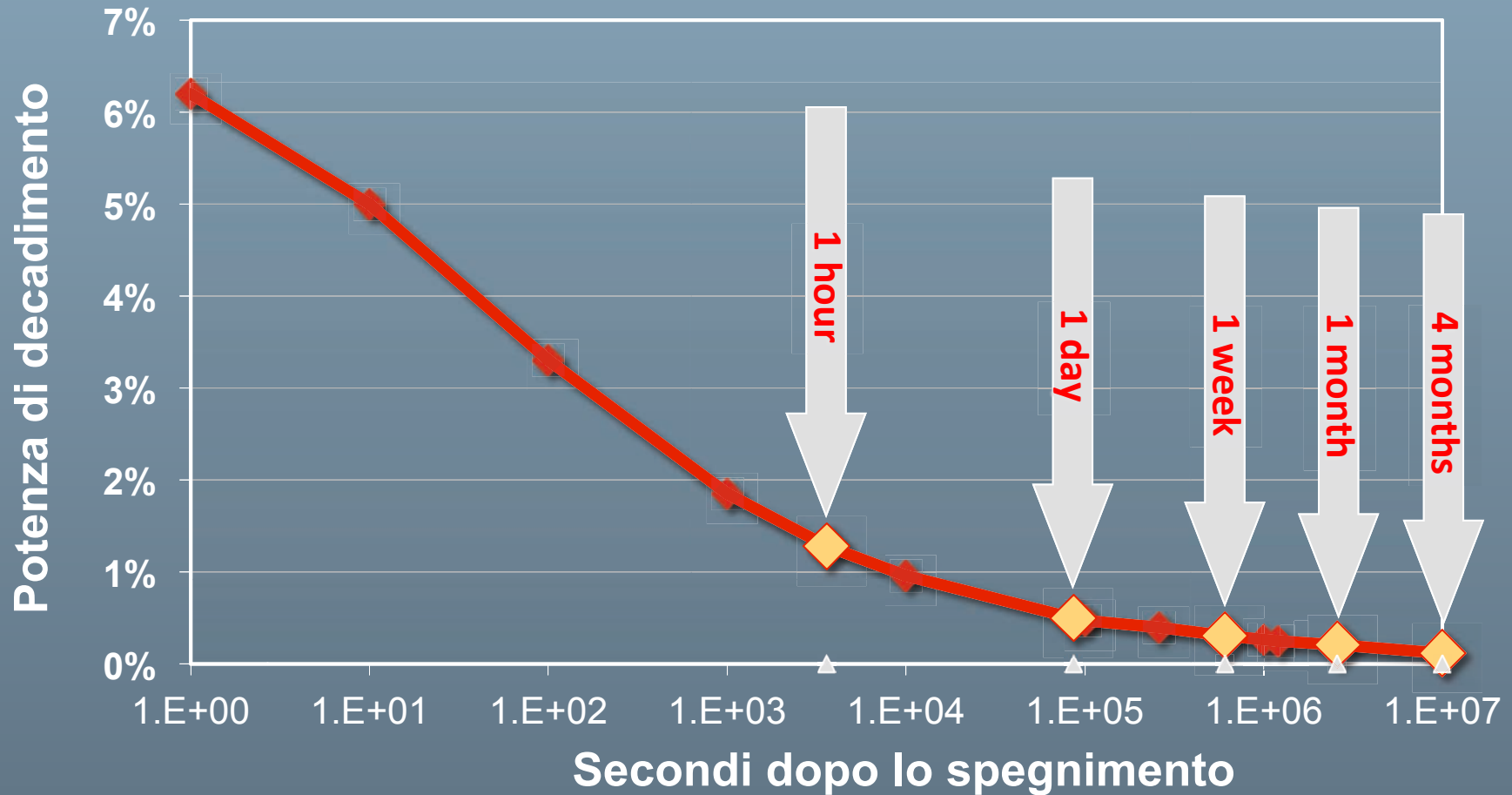
- **BRUCIAMENTO DI H₂**
- **CONTENITORE SENZA ARIA**

POTENZA DI DECADIMENTO

(% della potenza normale, dopo arresto rapido)

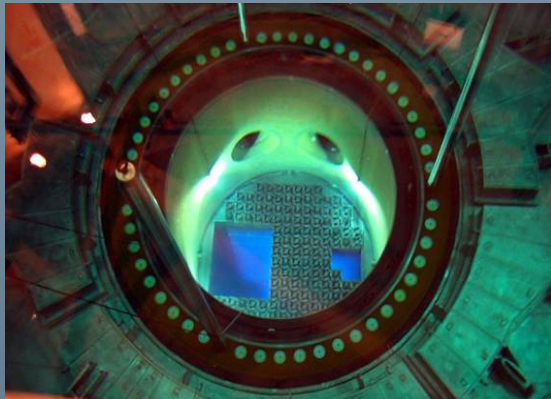
SPbPU
Winter School NE
2018.01.23-25

28



I criteri di Sicurezza Nucleare richiedono che 3 obiettivi vengano perseguiti in ogni condizione:

Il controllo della
reazione nucleare a
catena



CONTROL

Il raffreddamento
del combustibile



COOL

Il contenimento dei
prodotti di fissione



CONTAIN



Deposito geologico finale

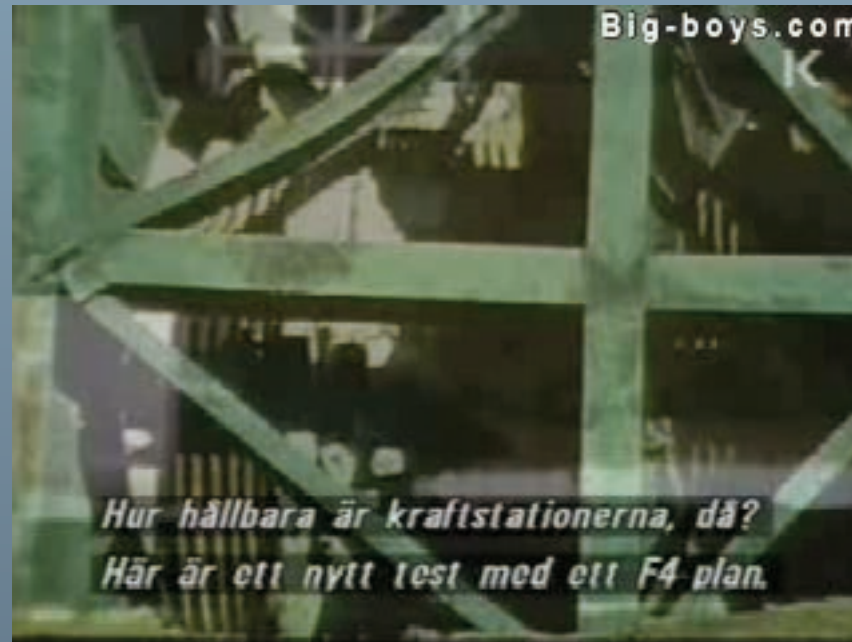
Barriere di Sicurezza

- Piani di emergenza
- Contenitore
- Sistemi di Sicurezza
- Guaina del combustibile
- Combustibile

**Sorgente del rischio
(prod. fissione)**

Altri principii chiave:

- Ridondanza
- Separazione fisica
- Diversificazione



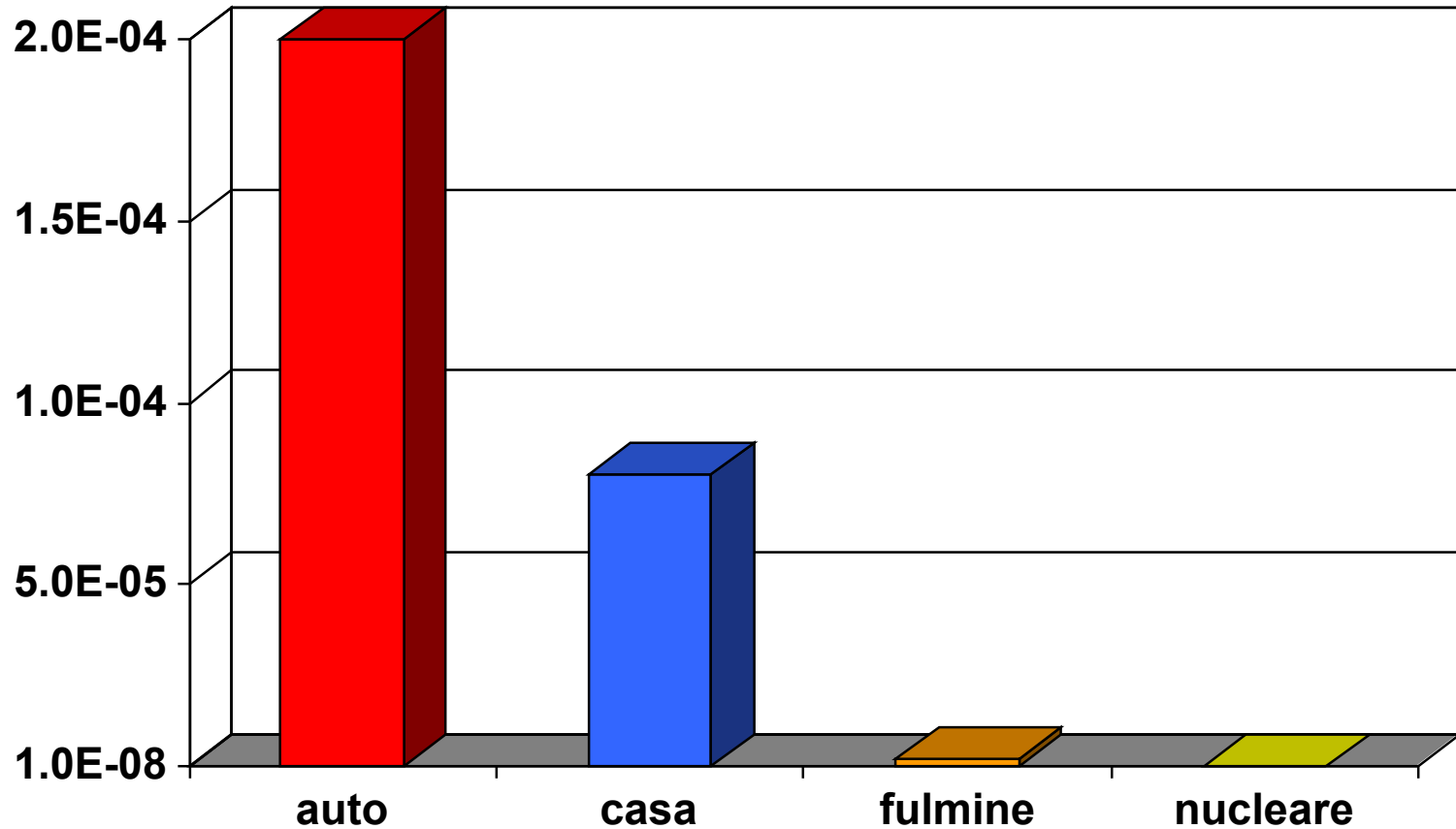
Video: <https://youtu.be/zPe-bKlid8w>

UNA NOTA SULLA SICUREZZA

(Frequenza attesa incidente letale, annuale)

2018 Feb.

32



Sisma e Tsunami *(dati al 25 aprile)*

Terremoto e Maremoto (Tsunami) del Tōhoku

11 Marzo 2011

e conseguente incidente a Fukushima

Fukushima NPP *(dati al 10 maggio)*

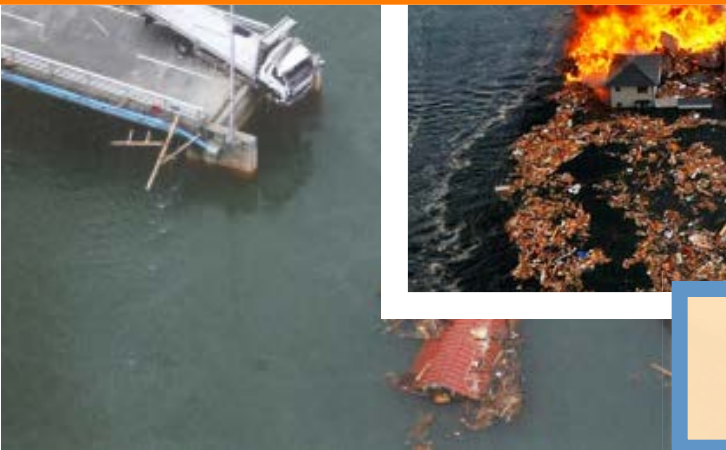


Sisma e Tsunami *(dati al 25 aprile)*

- 14 358 morti
- 11 889 dispersi
- 190 000 evacuati
- 12 485 case senza elettricità
- 79 000 case senza acqua
- 95 107 edifici completam. distrutti
- 1 700 strade danneggiate
- >50 ponti abbattuti
- 1 diga crollata



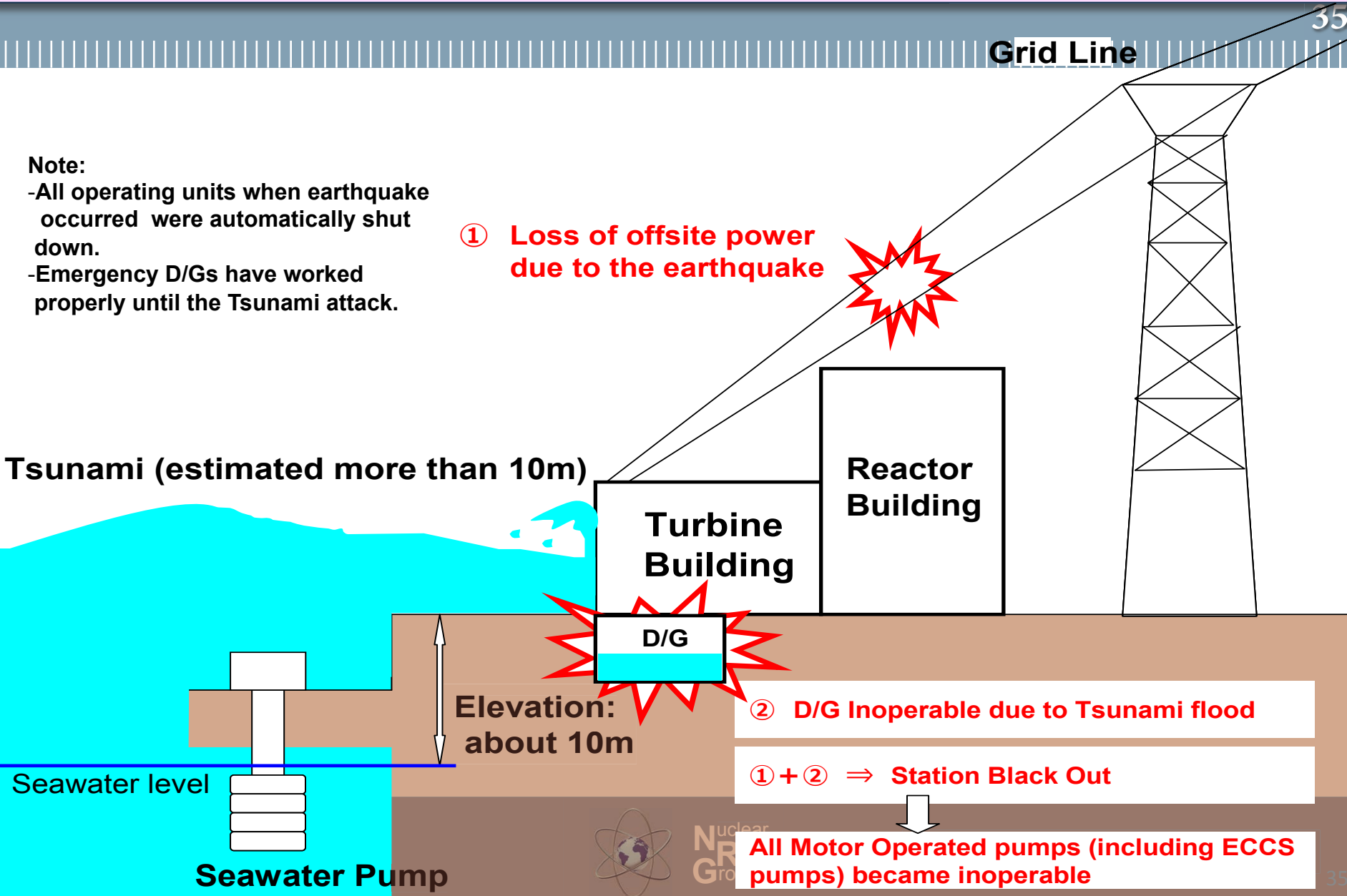
- 3 morti
- 21 lavoratori contaminati (quasi tutti sotto i limiti dell'Autorità di Sicurezza)
- 80 000 evacuati (area di 20 km)
- aria-acqua-suolo sotto monitoraggio (per effetti lungo termine)



Fukushima NPP *(dati al 10 maggio)*

3-2. Major root cause of the damage

Note:
-All operating units when earthquake occurred were automatically shut down.
-Emergency D/Gs have worked properly until the Tsunami attack.



FUKUSHIMA DAIICHI

Switchyard for Reactor
Units 5 and 6

Reactor Unit 6

Reactor Unit 5

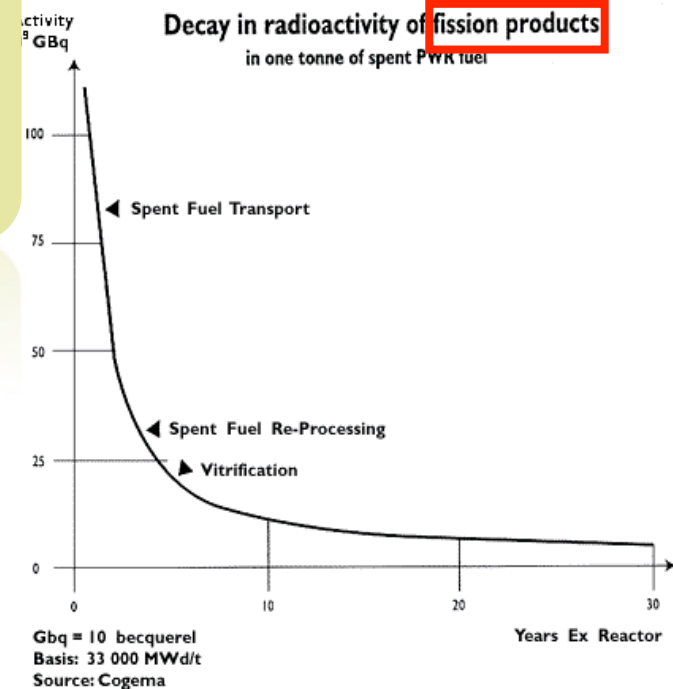
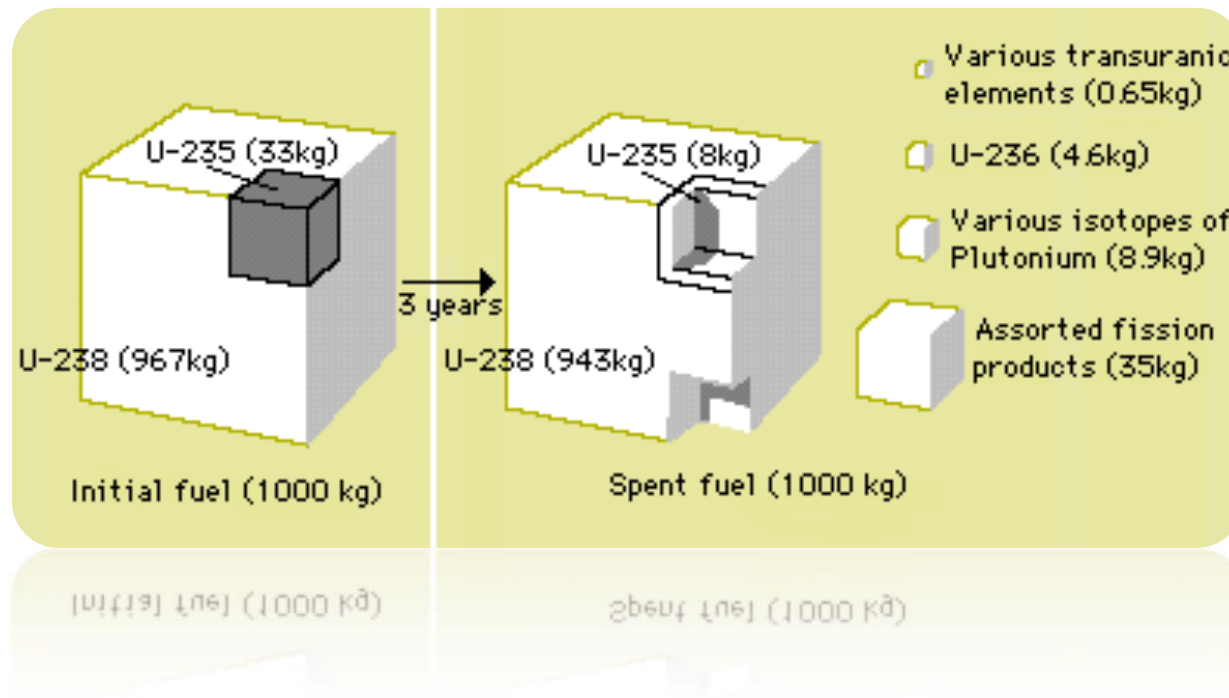
Diesel generator
building

Fukushima Daiichi, Reactor Unit 5 and Reactor Unit 6,
no blast or fire damage observed

18 MAR 2011, 10:19am local time

quanti sono e dove vanno i rifiuti nucleari





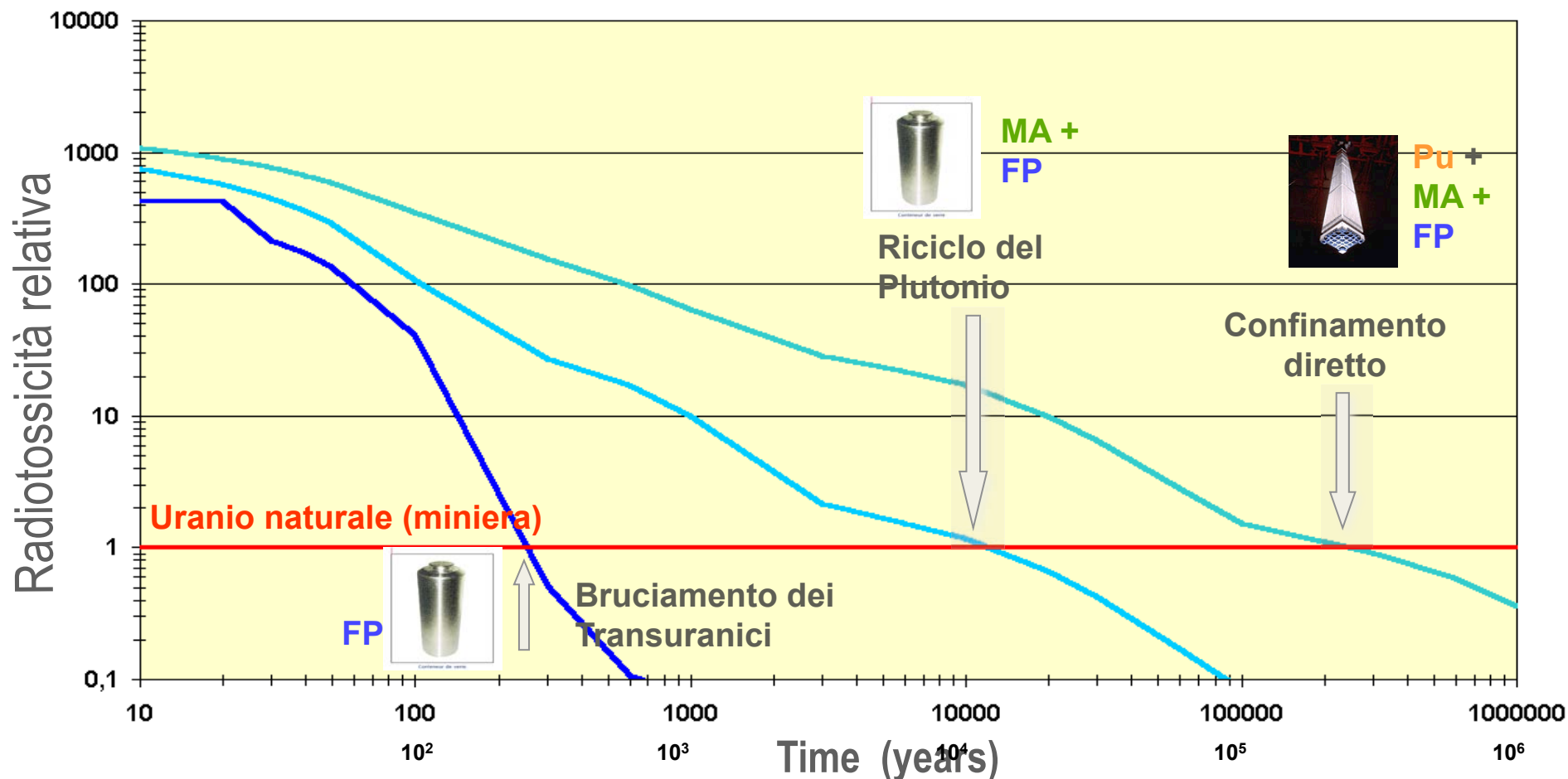
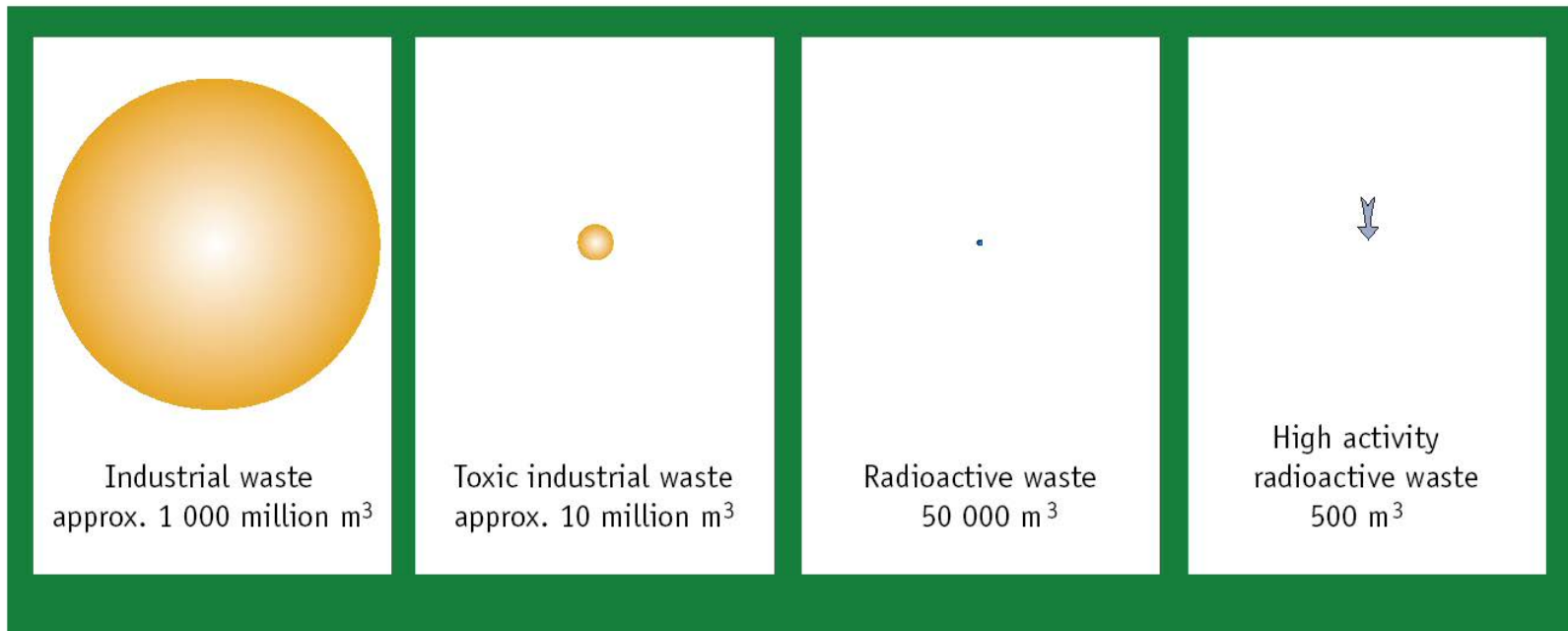


Figure 4.2: Waste generation comparison – yearly production of waste in the European Union



Source: *Nuclear and Renewable Energies* (Rome: Accademia Nazionale dei Lincei, 2000), updated with data from the European Commission, *Radioactive Waste Management in the European Union* (Brussels: EC, 1998).

RIFIUTI NUCLEARI PERICOLOSI: quanti sono?

2018 Feb.

41

Un cittadino francese ogni anno produce:

3000 kg di rifiuti (di ogni tipo, incluso:

100 kg di rifiuti tossico-nocivi (es. chimici, metalli pesanti come piombo, mercurio, cadmio, etc., non-degradabili), incluso:

1 kg di rifiuti nucleari, che includono:

0.05 kg di rifiuti radioattivi pericolosi (>30 anni vita)

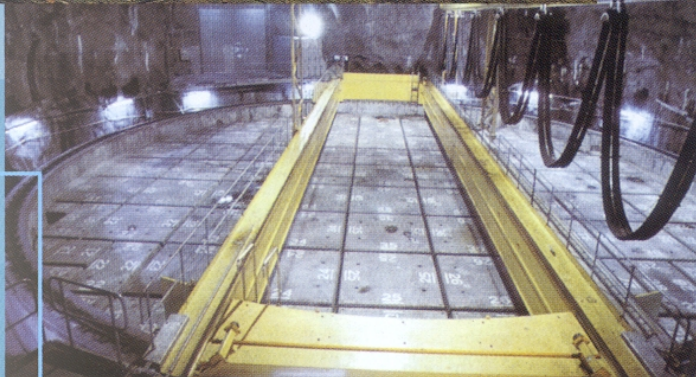
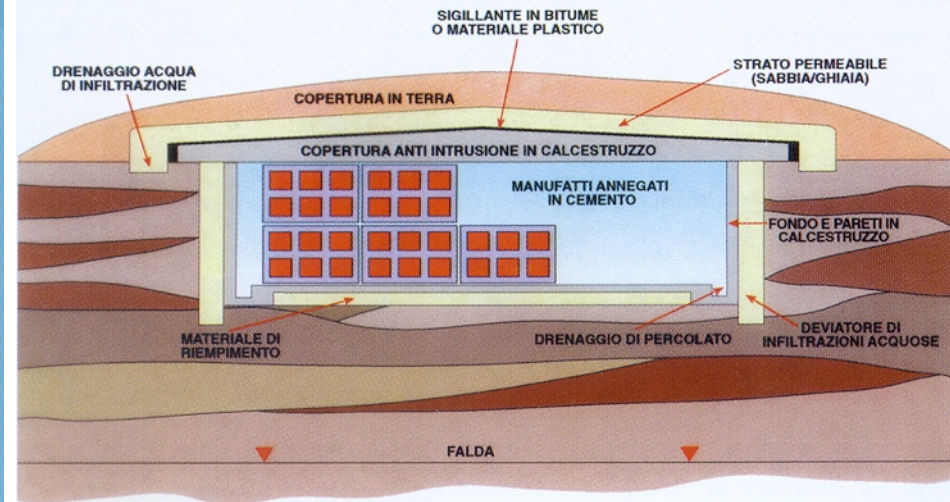
Quindi, durante la sua intera vita (es. 70 anni) un cittadino francese, che consuma elettricità prodotta quasi tutta da centrali nucleari, produce un volume totale di rifiuti radioattivi pericolosi pari a...



Esempi di depositi per rifiuti radioattivi

2018 Feb.

42



Esempi di Depositi di rifiuti radioattivi bassa e media radioattività

2018 Feb.

43



Forsmark (Sweden)



Oskarshamn (Sweden)



Gorleben (Germany)



Konrad (Germany)



Morsleben (Germany)



L'Aube (France)



El Cabril (Spain)

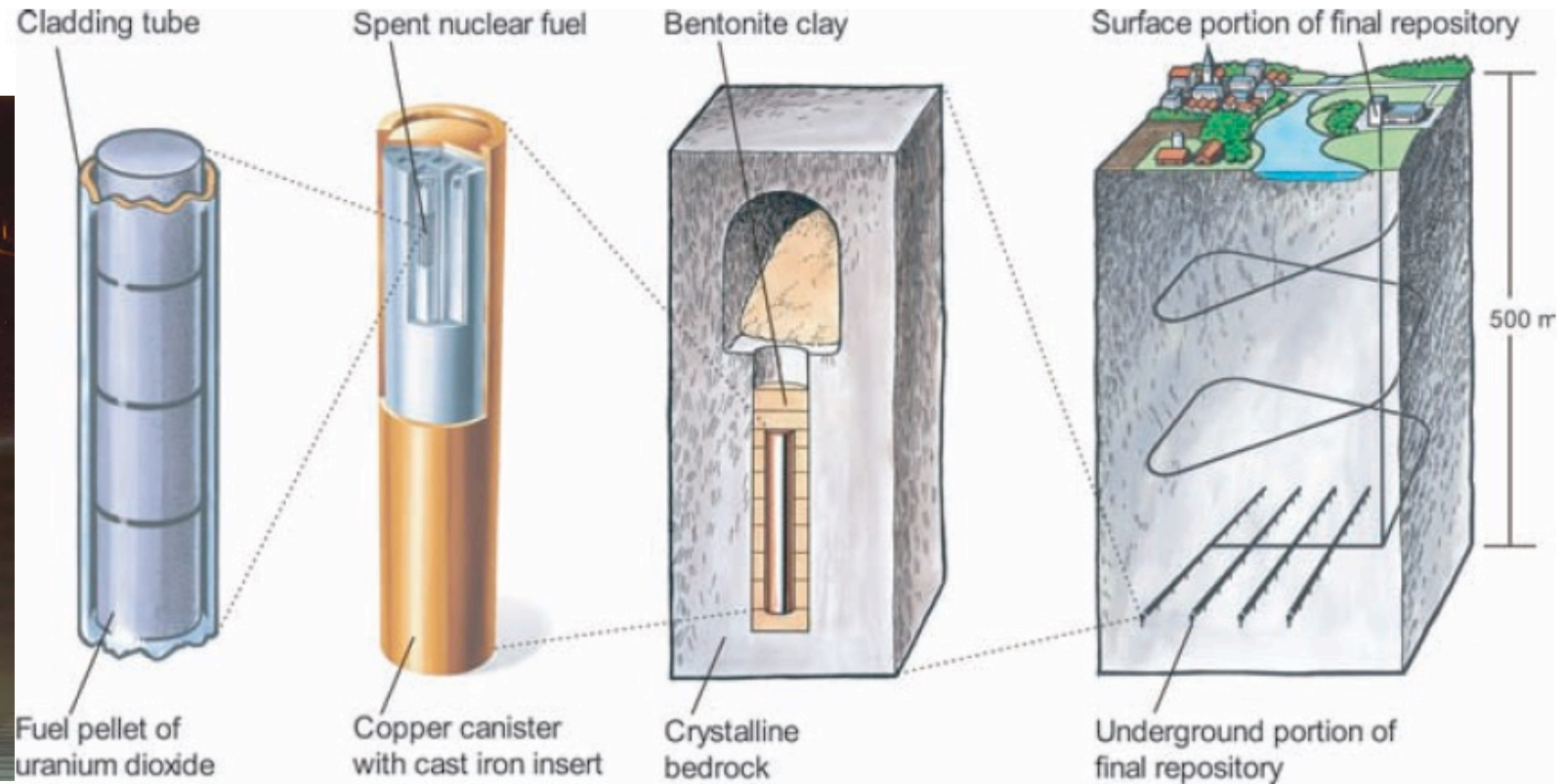


La Manche (France)

IL DEPOSITO GEOLOGICO FINALE per rifiuti ad alta radioattività

2018 Feb.

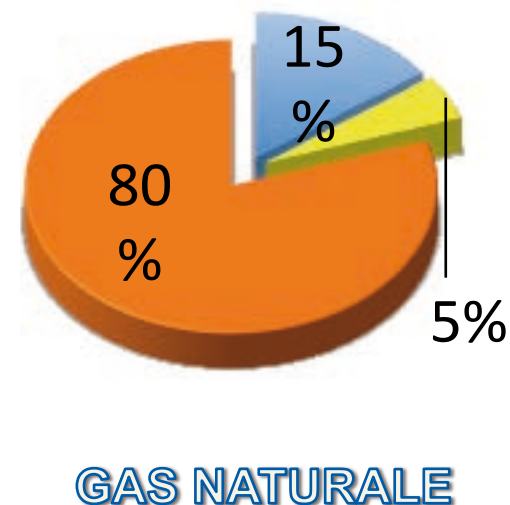
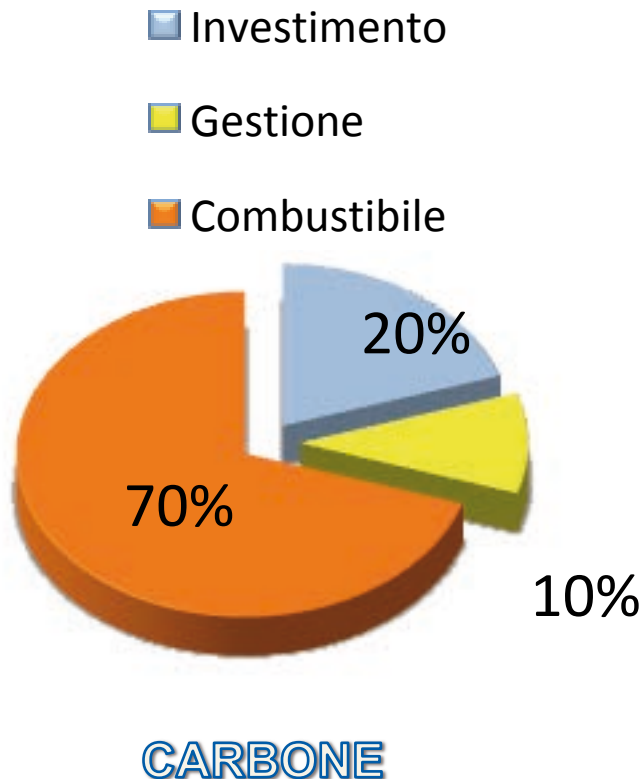
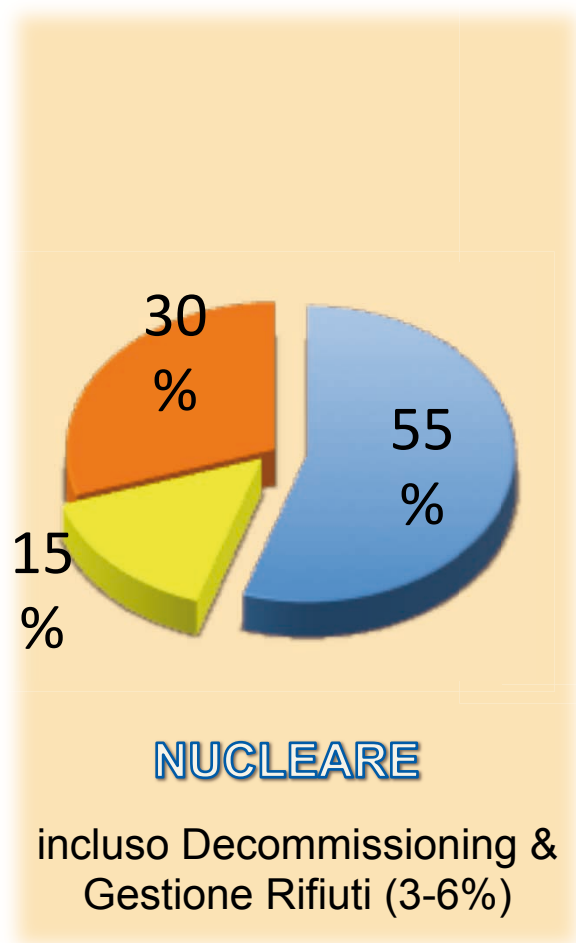
44



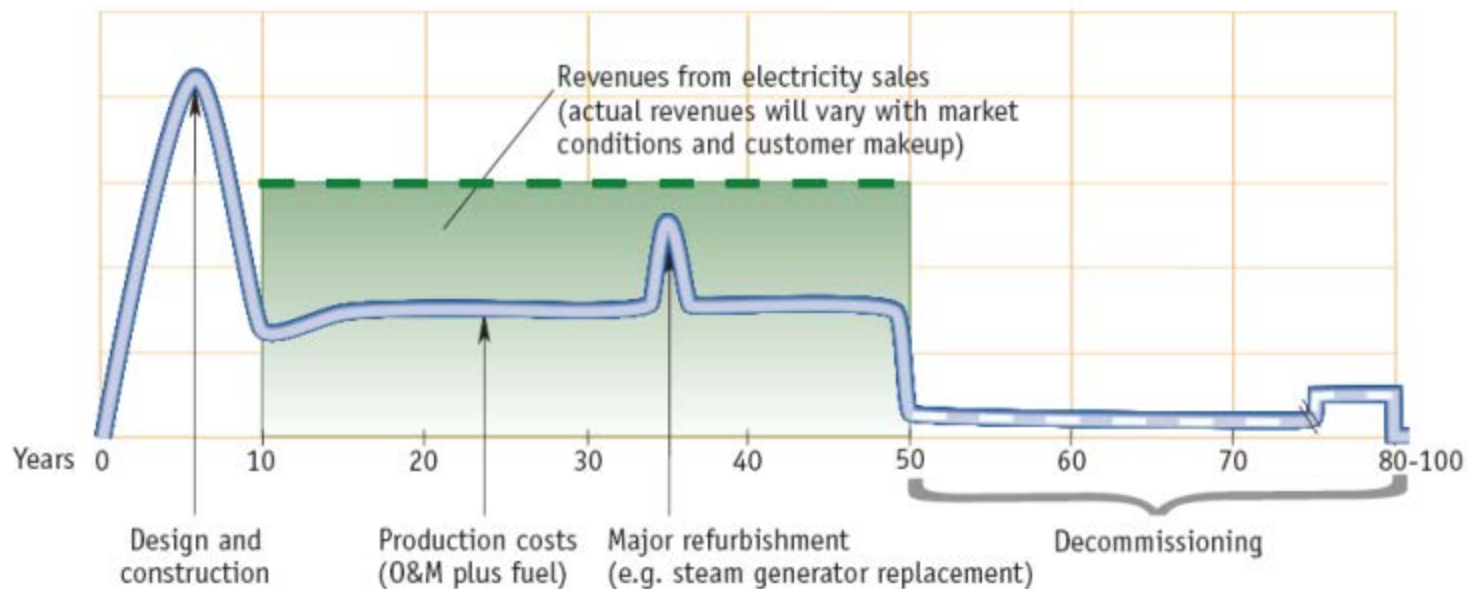
The Swedish concept for the disposal of spent nuclear fuel - the multi-barrier concept.

ma quanto costa l'energia nucleare





Profilo dei costi per una centrale nucleare: investimento lungo



- Rischio di “esposizione finanziaria”
- Vulnerabilità alle fluttuazioni del mercato elettrico

- **Olkiluoto (FIN):** costruzione iniziata nel 2005
Da completare nel 2009
3.2bn€ (costo originale)
+7 anni ritardi (2016)
+234% extra-costo (10.7bn€)
- **Flamanville (FRA):** costruzione iniziata nel 2006
Da completare nel 2012
3.3bn€ (costo originale)
+4 anni ritardi (2016)
+158% extra-costo (8.5bn€)
- **Vogtle (USA):** costruzione iniziata nel marzo 2013
Da completare 2017-18
14bn\$ (2 x AP1000)
>1 anno ritardi
+1.6bn\$
- **VC-Summer (USA):** sospeso



**Incertezza dei tempi-costi di costruzione
percepita come principale causa di rischio
finanziario**

reattori nucleari: cosa succede nel mondo

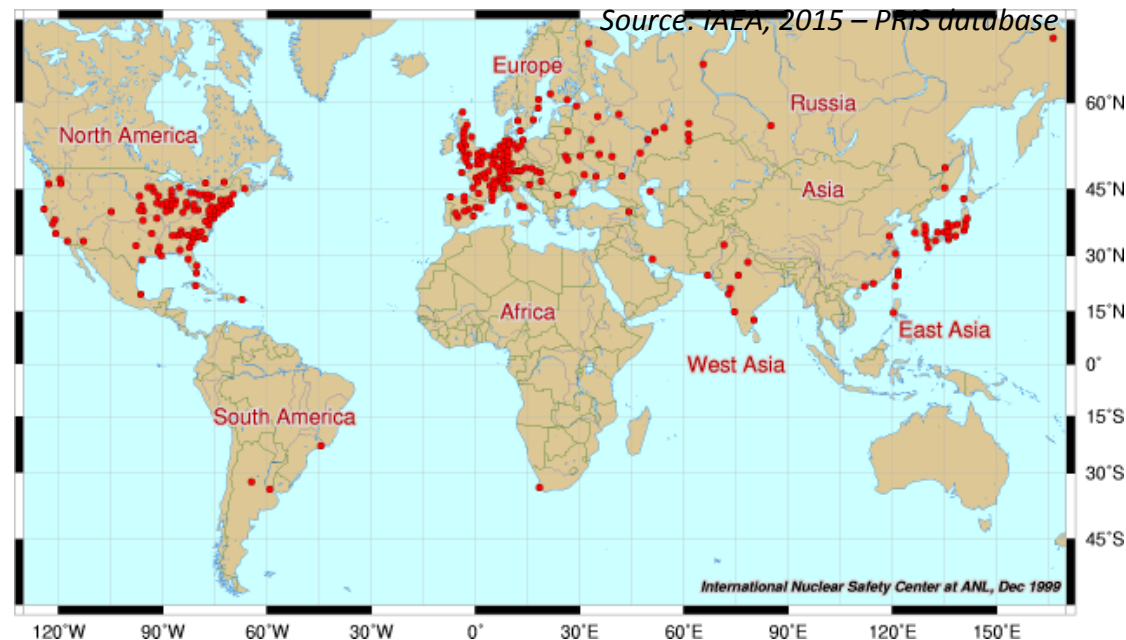


REATTORI NUCLEARI NEL MONDO (2017)

2018 Feb.

50

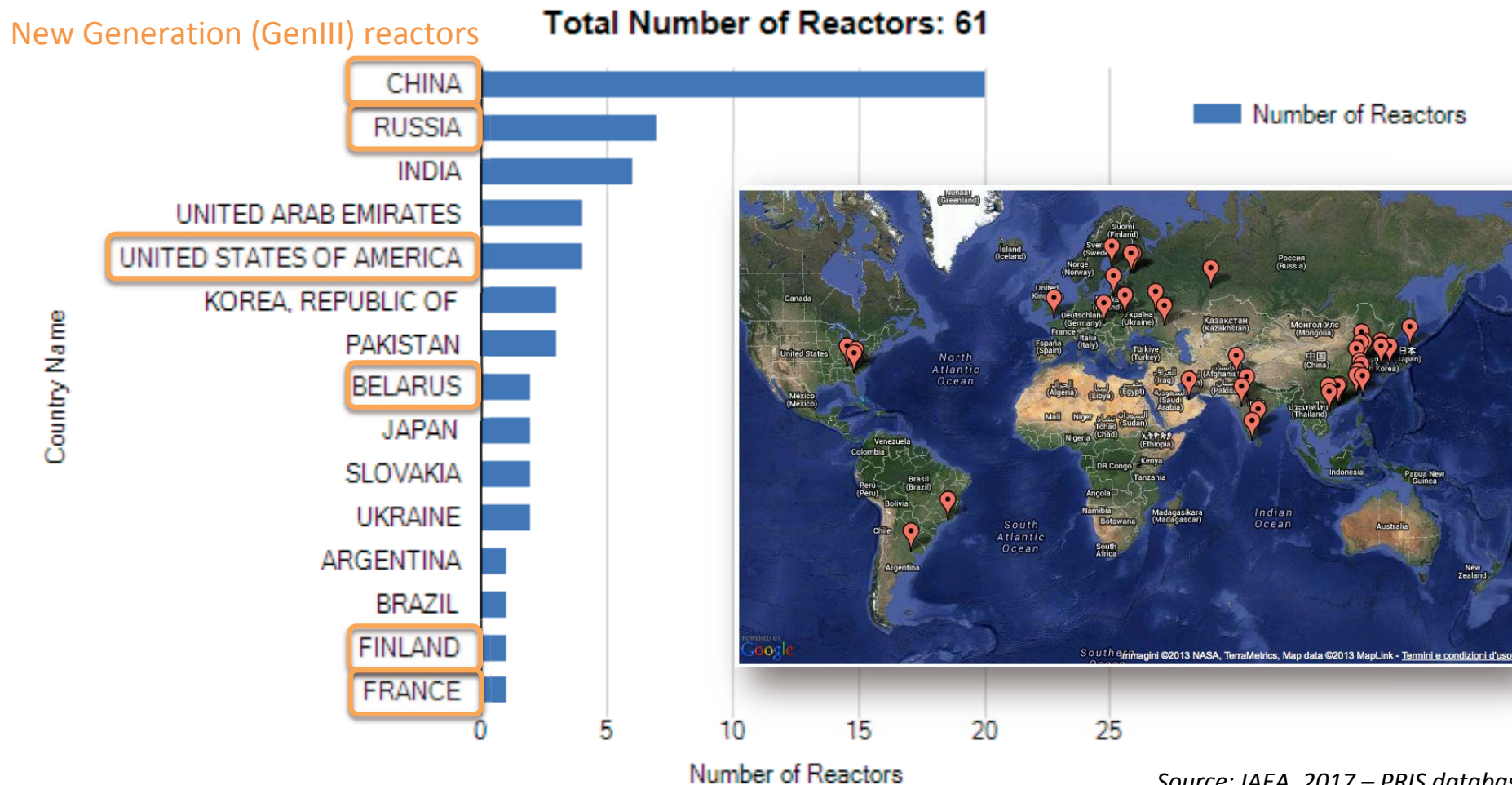
- **446** reattori nucleari in funzione (17 223 reattori-anno equivalenti)
- **390 429 MWe** potenza installata
- Load factor **>85%** (negli anni '70-'80 era 60%)
- **61 nuovi reattori in costruzione**
- **5%** energia totale mondo
- **16%** elettricità mondiale
- **30%** elettricità OECD
- OGGI: solo elettricità
- DOMANI: reattori di nuova generazione per settore trasporti (idrogeno, bio-fuel)



Reattori Nucleari in costruzione (2017)

2018 Feb.

51

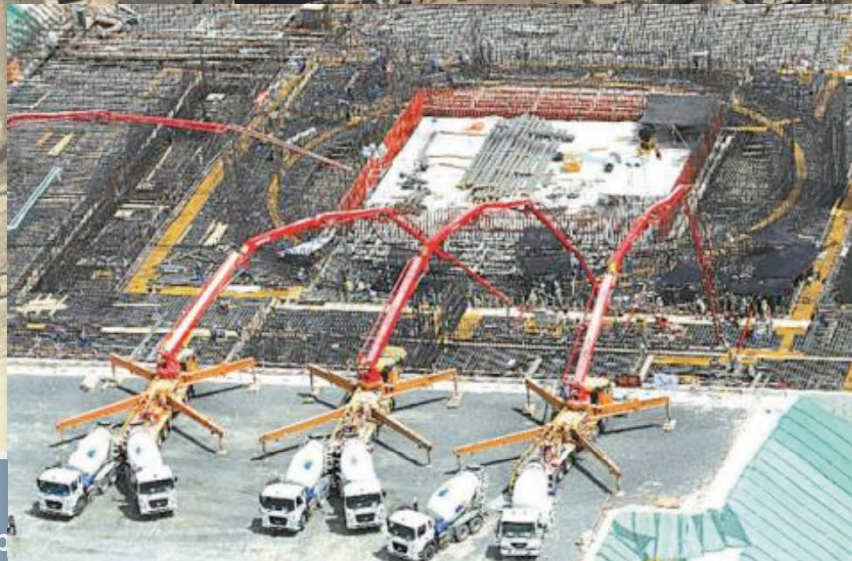
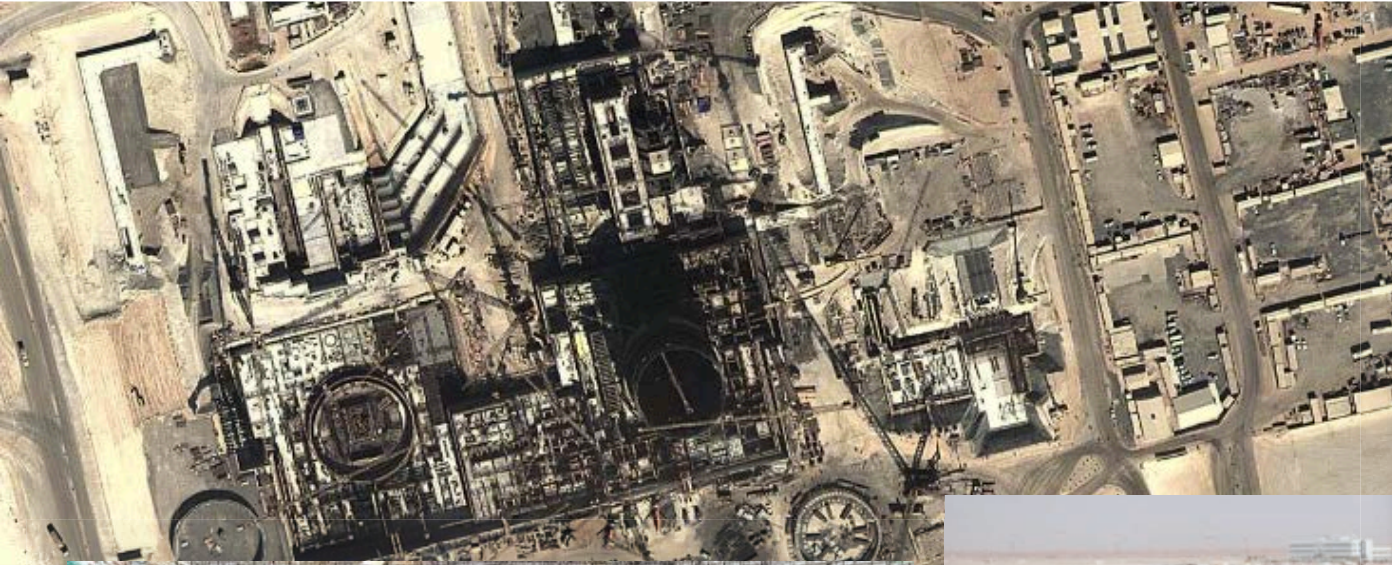


Note: The total number includes also 2 reactors in Taiwan, China.

APR-1400: in costruzione negli Emirati Arabi a Barakah (UAE)

2018 Feb.

52



EPR: Olkiluoto (Finlandia) e Flamanville (Francia)

2018 Feb.

53



Finland: 4500 workers+staff



AP1000: in costruzione a Sanmen (China)

SPbPU
Winter School NE
2018.01.23-25

54



AP1000: in costruzione* a Vogtle e a VC Summer (USA)

** problemi industriali-finanziari, futuro incerto*

SPbPU
Winter School NE
2018.01.23-25

55



ENERGIA NUCLEARE: un tema complesso, ma...

...da qualche parte funziona

Finlandia: sistema nucleare completo & alta accettabilità sociale



domande



EPR

Evolutionary (European) Pressurised Reactor

SPbPU
Winter School NE
2018.01.23-25

59

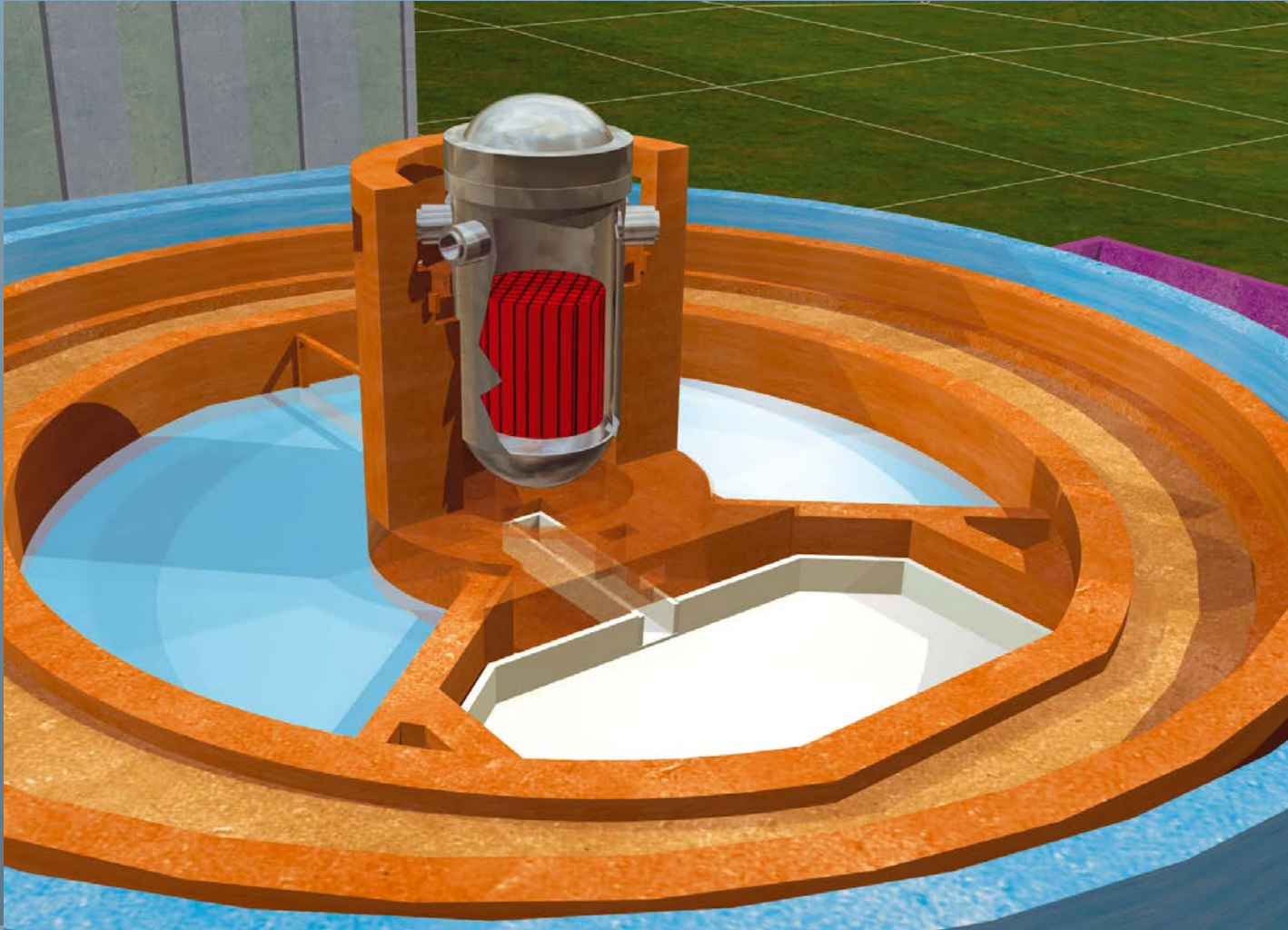


EPR: Active Safety Systems

SPbPU
Winter School NE
2018.01.23-25

60



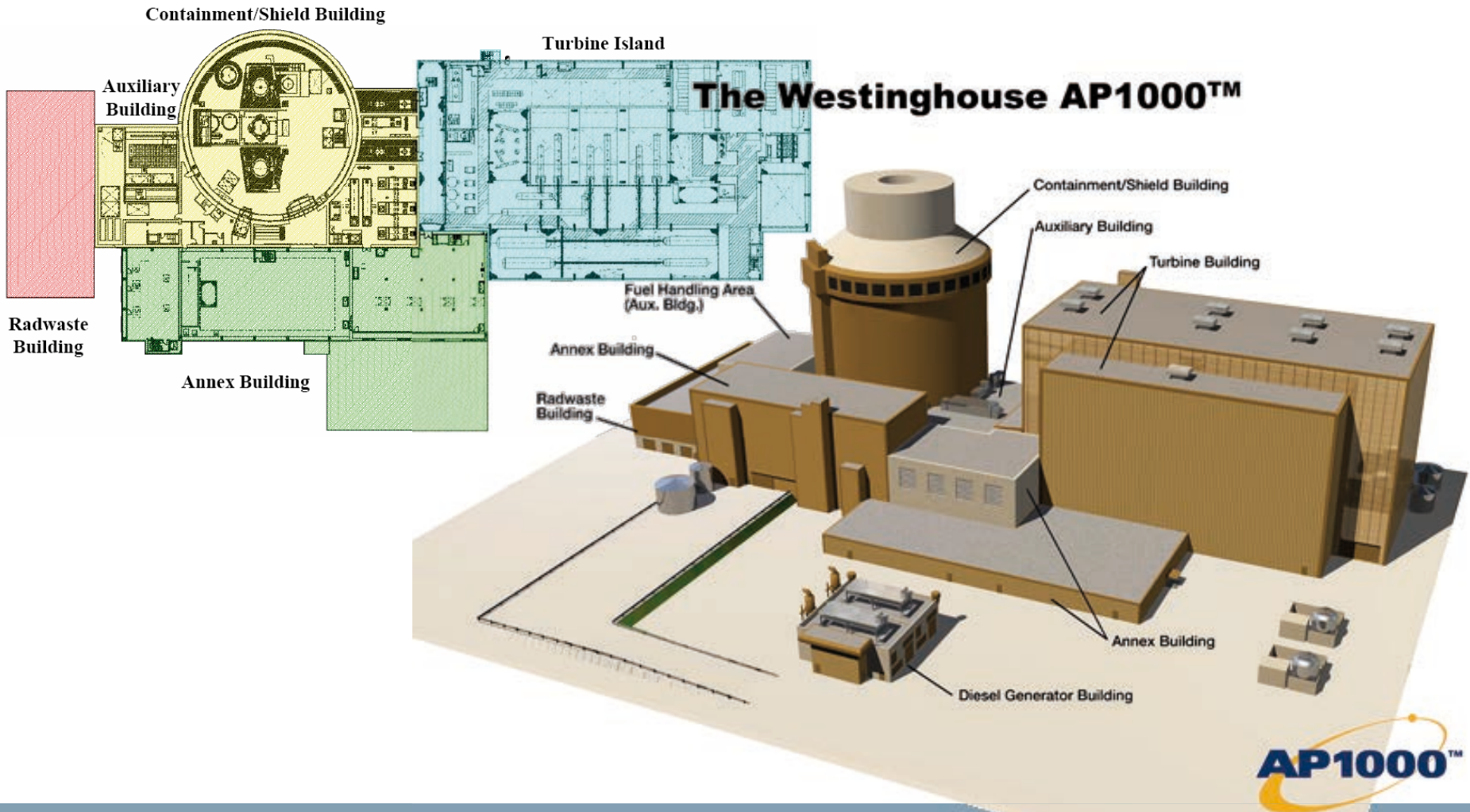


AP1000

Advanced Pressurised water reactor

2018 Feb.

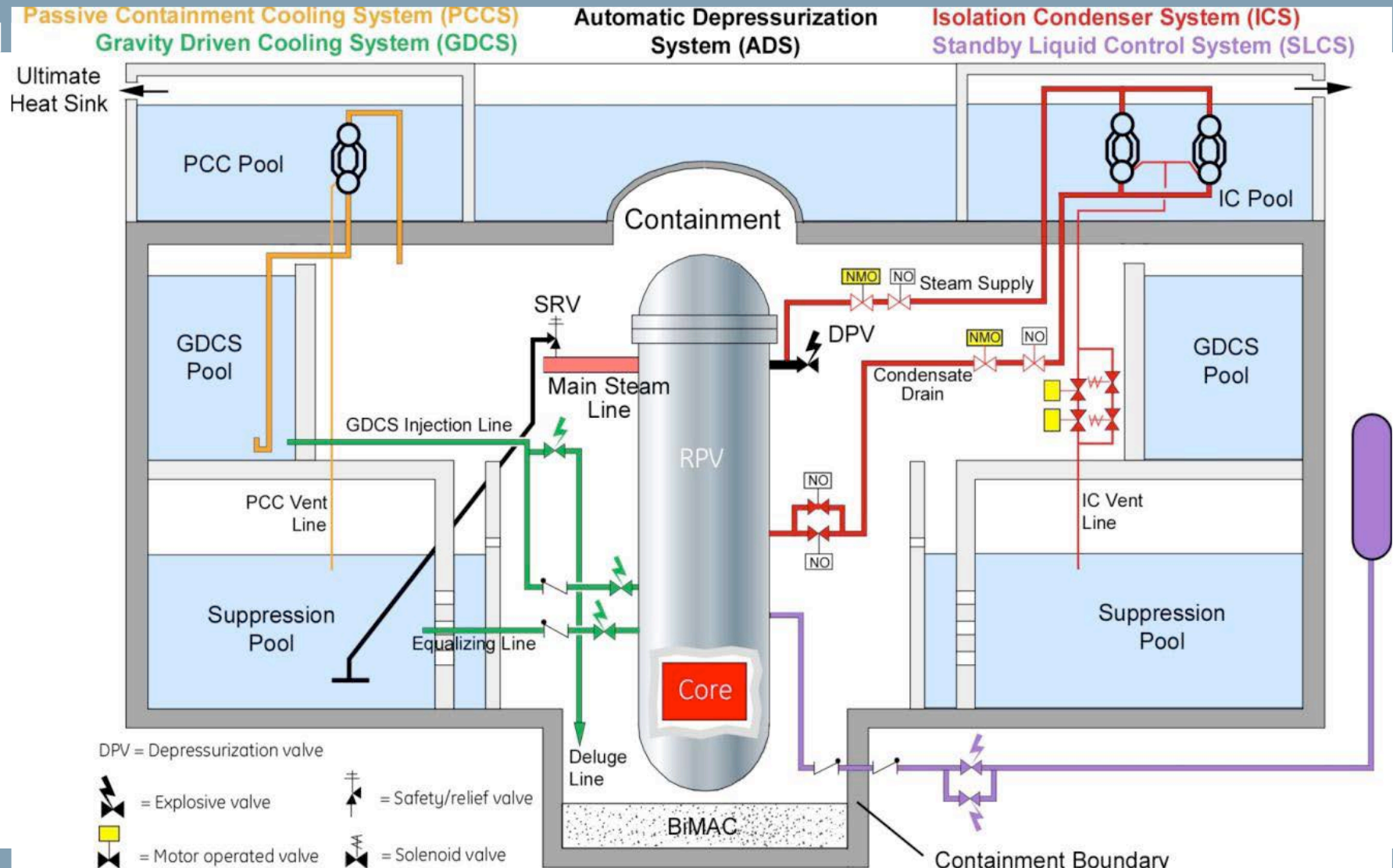
62



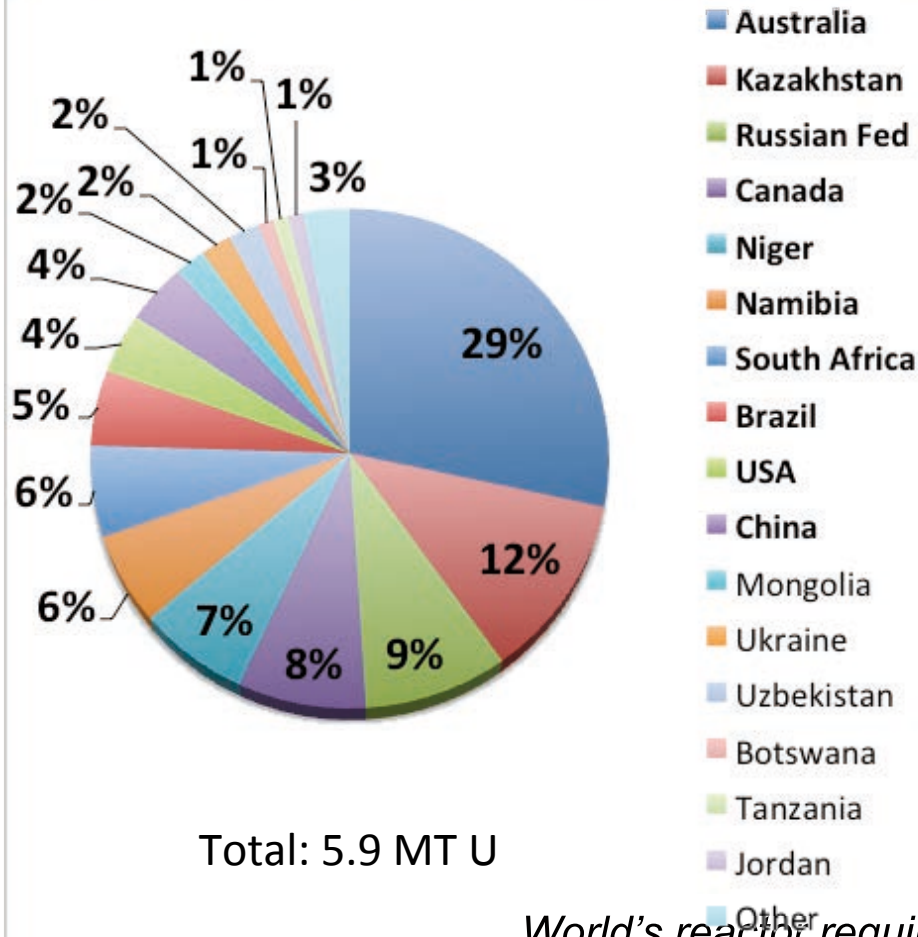
ESBWR: Passive BWR & Safety Systems

2018 Feb.

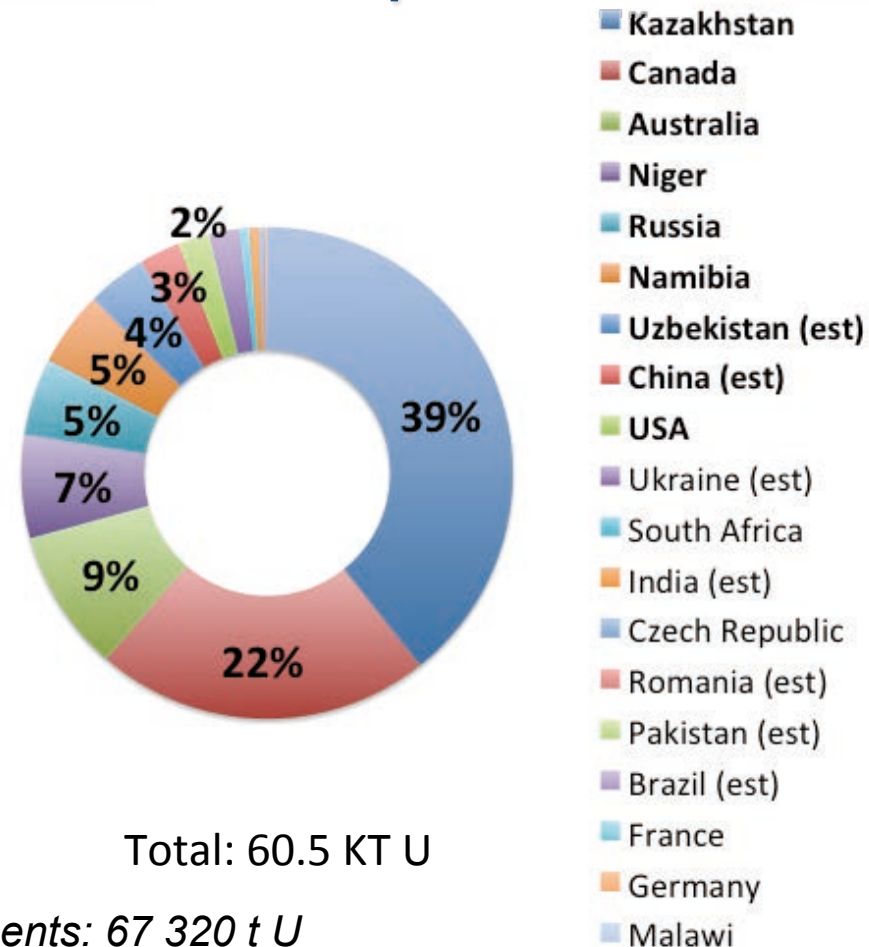
63



conventional uranium resources



uranium production



World's reactor requirements: 67 320 t U

2004 Uranium production: 40 263 t U (60%)

+ Stockpiles of natural+enriched uranium
(also military)