



STUDIO **MARIGO**

Sicurezza sul Lavoro, Direttive ATEX, Direttiva Macchine
Safety at Work, ATEX Directives, Machinery Directive

L'energia e gli impianti elettronuclearari

Breve introduzione

Ing. Marzio Marigo

20 Aprile 2011



**La gravità con la quale un sistema sbaglia è direttamente
proporzionale all'intensità del credo del progettista
che ciò non possa accadere**

The Titanic Effect (J. A. N. Lee)

Ogni soluzione genera nuovi problemi

Legge di Murphy, Corollario 7

- Energia, riserve e risorse

- Gli impianti elettronucleari

- La sicurezza degli impianti elettronucleari

- Conclusioni

L'energia elettrica nel mondo

Nel mondo, nel 2008, sono stati prodotti (circa) **20000 TWh** di energia elettrica ($1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh}$).

Tale produzione energetica risulta così suddivisa nei singoli paesi/aree economiche:

- USA: 21,3%
- Cina: 17,1%
- UE 27: 16,6%
- Giappone: 5,7%
- Germania: 3,1%
- Francia: 2,8%
- **Italia: 1,6%**
- Africa (intero continente): 3,1%

(Fonte: Terna, 2009)

Il bilancio energetico nazionale (2004)

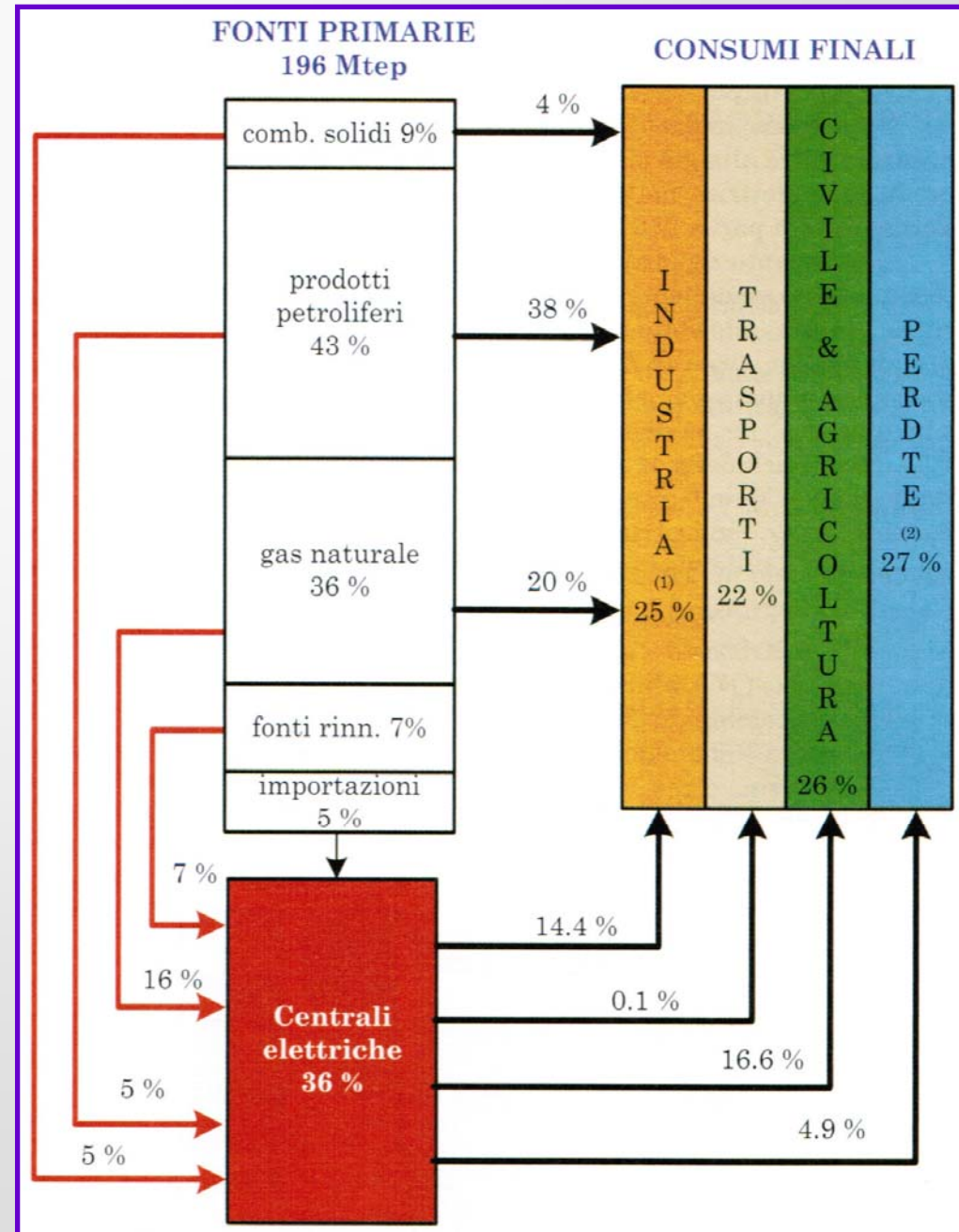
L'energia elettrica è solo una parte dell'intero fabbisogno energetico di una nazione

Esso viene espresso in Tep (Tonnellate di Petrolio Equivalente) → *Rendimenti!*

I consumi finali sono suddivisi in consumi per:

- a) *Industria*
- b) *Trasporti*
- c) *Civile ed agricoltura*
- d) *Perdite*

Assorbono circa $\frac{1}{4}$ (ciascuno) dell'intera "torta" dell'energia prodotta da una nazione



(Fonte: Bianchi et Al., 2008)

Produzione di energia elettrica

Mix energetico per paese/area geografica

Potenza efficiente lorda al 31/12/2008 (Fonte: Terna, 2009)

Potenza (GW)	Idrica	Eolica	Fotovoltaica	Termica	Geotermica	Nucleare
Mondo	20,3	2,6	0,3	68,7	0,2	7,9
USA	9,2	2,7	0,1	78,6	0,2	9,3
Cina	22,3	1,5	0,0	75,1	0,0	1,1
UE 27	17,2	7,9	1,2	57,6	0,1	16,1
Giappone	17,0	0,7	0,8	63,7	0,2	17,7
Germania	6,5	17,3	3,8	57,7	0,0	14,6
Francia	21,3	3,0	0,1	22,3	0,0	53,4
Italia	21,1	3,4	0,4	74,4	0,7	0,0

Dati in % sul totale di riga

Produzione energetica lorda al 31/12/2008 (Fonte: Terna, 2009)

Energia (TWh)	Idrica	Eolica	Fotovoltaica	Termica	Geotermica	Nucleare
Mondo	16,1	1,1	0,0	69,0	0,3	13,5
USA	6,5	1,2	0,0	72,4	0,4	19,5
Cina	16,9	0,5	0,0	80,6	0,0	2,0
UE 27	10,6	3,5	0,2	57,5	0,2	27,9
Giappone	7,0	0,3	0,0	71,4	0,2	21,1
Germania	4,3	6,4	0,6	65,2	0,0	23,5
Francia	11,9	1,0	0,0	10,5	0,0	76,6
Italia	14,8	1,5	0,1	81,9	1,7	0,0

Dati in % sul totale di riga

Il confronto tra fonti energetiche deve essere **SEMPRE** realizzato
sull'energia prodotta e non sulla potenza efficiente!!

Consumi energetici pro-capite (2003)

Paese	Popolazione		Consumo energetico		Consumo pro-capite	Energia elettrica		
	10 ⁶ ab.	%	Mtep	%	tep/ab	TWh	kWh/ab	%
1 USA	288.0	4.6	2297.8	23.6	8.0	4039	14024	24.2
2 Russia	145.0	2.3	670.8	6.9	4.6	912	6290	5.5
3 Giappone	127.0	2.0	504.8	5.2	4.0	1085	8543	6.5
4 Germania	82.3	1.3	332.2	3.4	4.0	597	7254	3.6
5 Canada	31.9	0.5	291.4	3.0	9.1	560	17555	3.4
6 Francia	60.0	1.0	260.6	2.7	4.3	567	9450	3.4
7 Gr. Bretagna	60.0	1.0	223.2	2.3	3.7	395	6583	2.4
8 Italia	58.0	0.9	181.9	1.9	3.1	293	5052	1.8
Totali parziali	852.2	13.7	4762.7	48.9	5.6	8448	3272	50.7
Resto del mondo	5377.8	86.3	4978.4	51.1	0.93	8215	1528	49.3
Totali mondo	6230.0	100.0	9741.1	100.0	1.56	16663	2675	100.0

(Fonte: *Mirandola, 2006*)

L'Italia manifesta uno **tra i minori consumi medi pro-capite dell'occidente** sia in termini di consumo energetico complessivo che di energia elettrica.

L'energia in quello che ci circonda

Tutti i manufatti che ci circondano sono **l'espressione concreta dell'utilizzo energetico delle risorse**. La filiera estrattiva dei materiali di comune utilizzo **richiede energia, in alcuni casi, molta energia (1 GJ/ton = 1 miliardo di joule per tonnellata)**:

- **Alluminio:** 280 GJ/ton
- **Plastica:** 85 ÷ 180 GJ/ton
- **Rame:** 140 ÷ 300 GJ/ton
- **Zinco:** 68 GJ/ton
- **Acciaio:** 55 GJ/ton
- **Vetro:** 20 GJ/ton
- **Cemento:** 7 GJ/ton
- **Mattoni:** 4 GJ/ton
- **Legname:** 2,5 ÷ 7 GJ/ton
- **Ghiaia:** 0,2 GJ/ton

(Fonte: Ashby et al., 1996)

Durata delle risorse fossili

<i>Rapporto tra risorse e consumi (anni)</i>	Petrolio	Gas Naturale	Carbone
1980	29,7	56,3	
1989	42,1	63,9	
1999	39,3	64,0	
2009	43,4	63,8	156,5

(Fonte: Ns. elab. su dati BP Statistical Review, 2010)

Le riserve di Uranio indicate nel *Red Book dell'IAEA* del 2009 (circa **6,3 milioni di tonnellate** al costo di estrazione minore di 260 USD/kgU) sono sufficienti a garantire il funzionamento dei reattori termici in esercizio nel 2009, per circa **120 anni** (Fonte: De Paoli, 2011)

Nel caso di utilizzo di tali riserve in reattori veloci, esse garantirebbero **alcune migliaia di anni di funzionamento.**

Da tenere in considerazione che i reattori veloci "potrebbero" funzionare pure a Torio, presente in natura in quantità (circa) **3-4 volte superiori all'Uranio.**

Il rapporto tra risorse e consumi (*Business as usual*) individua una **certa costanza del rapporto specifico di ogni forma di riserva energetica** (es. **40 anni** per il petrolio, **60 anni** per il gas naturale).

Riserve Vs. Risorse

Riserva: depositi di fonti di energia accumulate, la cui esistenza è stabilita, e che possono essere sfruttati con l'attuale tecnologia in modo economicamente compatibile

Risorsa: depositi di fonti di energia accertati, ma il cui sfruttamento richiede una tecnologia più avanzata per motivi tecnici o economici, ovvero non ancora accertati

Alla luce di queste definizioni è quindi ipotizzabile la seguente quantità di **risorse** disponibili, all'attuale ritmo di consumo:

- Petrolio: **50 – 80 anni** (Fonte: Meadows et al, 2006)
- Gas naturale: **160 – 310 anni** (Fonte: Meadows et al, 2006)
- Uranio (*circa 16 milioni di tonnellate*): **300 anni** (Ns. elab. su dati Red Book, 2009)

Un paio di considerazioni:

- Nel **caso del petrolio, riserve e risorse appaiono pericolosamente vicine!**
- Nel caso rapportassimo le **riserve specifiche ai consumi totali** (nell'ipotesi che la singola fonte debba, da sola, fornire tutta l'energia ora erogata dal mix petrolio, carbone, gas, nucleare e rinnovabili), **l'energia nucleare avrebbe un orizzonte di (circa) vent'anni.**

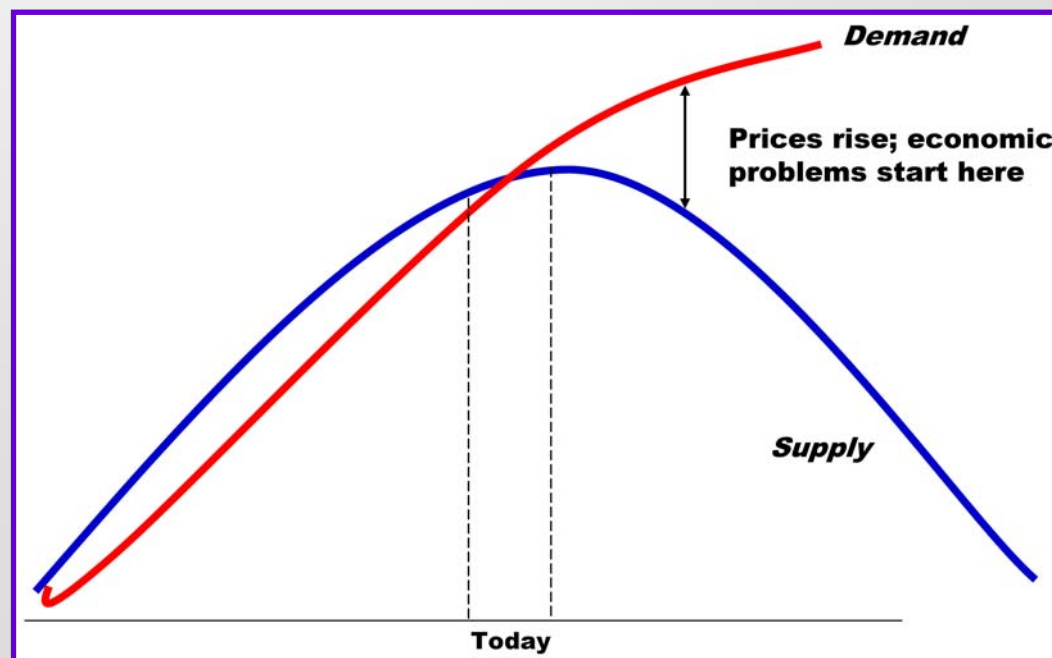
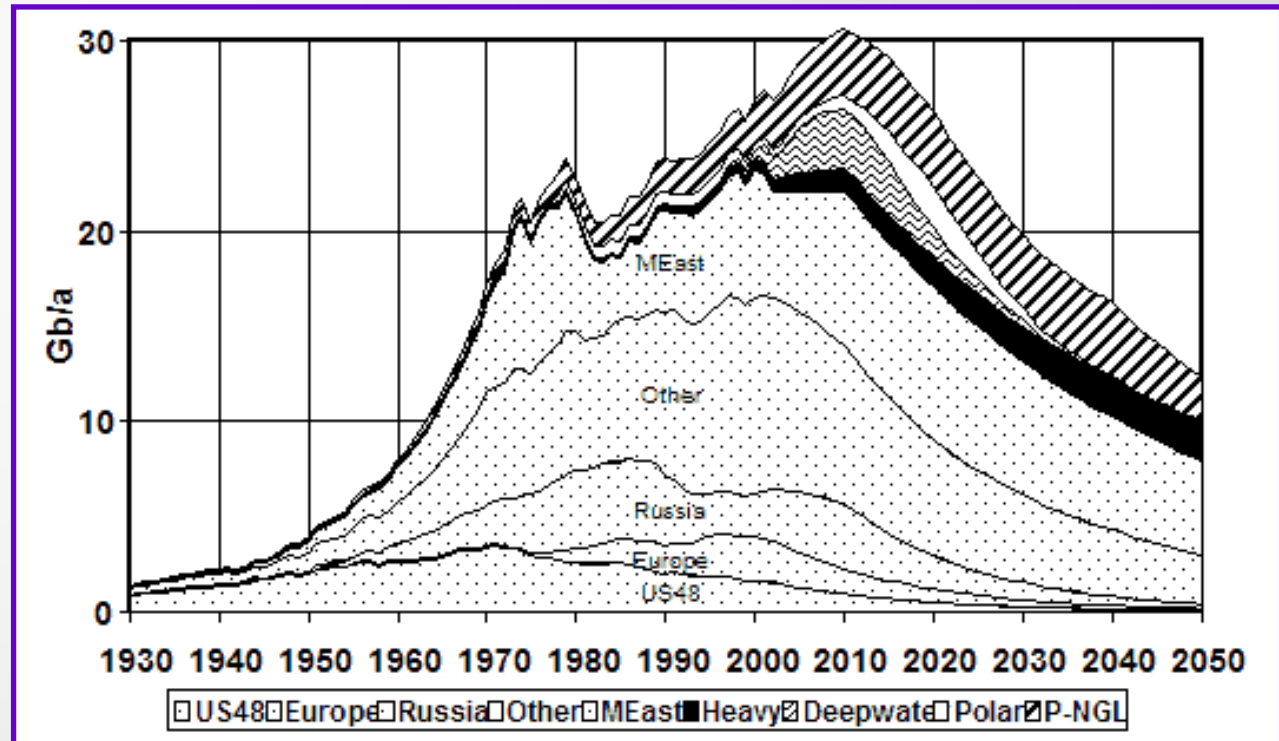
Il picco di Hubbert

Il picco di Hubbert è una teoria economica che prevede una **crisi petrolifera globale, di dimensioni mai sperimentate prima**, non in corrispondenza dell'estrazione dell'ultima goccia di petrolio, bensì **quando si saranno estratte circa la metà delle risorse fossili disponibili.**

La teoria conclusioni della teoria risultano tuttavia controverse.

Quanto manca al picco del petrolio? Poco, forse ci siamo già dentro.

(www.aspoitalia.it)



Macondo Vs. Fukushima?

Il recente disastro della piattaforma **Macondo**, nel **Golfo del Messico**, evidenzia come le nuove prospezioni geologiche *deep water*, possiedano **elevati tassi di rischio di incidente catastrofico**

Tali prospezioni sono la **risposta tecnologica al continuo incremento di consumo di petrolio**

Le prospezioni in **acqua profonda**, così come l'estrazione da **scisti petrolifere**, risultano molto **più costose della tradizionale estrazione da pozzo**

E le risorse rinnovabili?

Le **risorse rinnovabili** (es. fotovoltaico, eolico, geotermico), al contrario di quelle fossili o nucleari, risultano per definizione ***tecnicamente inesauribili***.

Esistono tuttavia limiti **economici** e **tecnici** nella cattura di tali fonti energetiche principalmente legati alla loro **aleatorietà**, alla loro **diluizione** ed all'attuale **mancanza tecnologica di adeguati sistemi di accumulo dell'energia prodotta**.

Limitando l'analisi alla variabile di **superficie impegnata dall'impianto**, ipotizziamo quanto territorio verrebbe occupato da un ipotetico impianto che produca **6,5 miliardi di kWh/a** (=energia prodotta da una centrale elettrotermica dal **1000 MWe**):

- Combustibile fossile: **2 km²**
- Nucleare: **5 km²**
- Geotermico: **10 km²**
- Solare (Termoelettrico/Fotovoltaico): **80 km²**
- Eolico: **100 km²**

(Fonte: Cumo, 2008)

I costi dell'energia

Table 1. Estimated Levelized Cost of New Generation Resources, 2016.

Plant Type	Capacity Factor (%)	U.S. Average Levelized Costs (2009 \$/megawatthour) for Plants Entering Service in 2016				
		Levelized Capital Cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission Investment	Total System Levelized Cost
Conventional Coal	85	65.3	3.9	24.3	1.2	94.8
Advanced Coal	85	74.6	7.9	25.7	1.2	109.4
Advanced Coal with CCS	85	92.7	9.2	33.1	1.2	136.2
Natural Gas-fired						
Conventional Combined Cycle	87	17.5	1.9	45.6	1.2	66.1
Advanced Combined Cycle	87	17.9	1.9	42.1	1.2	63.1
Advanced CC with CCS	87	34.6	3.9	49.6	1.2	89.3
Conventional Combustion Turbine	30	45.8	3.7	71.5	3.5	124.5
Advanced Combustion Turbine	30	31.6	5.5	62.9	3.5	103.5
Advanced Nuclear	90	90.1	11.1	11.7	1.0	113.9
Wind	34	83.9	9.6	0.0	3.5	97.0
Wind – Offshore	34	209.3	28.1	0.0	5.9	243.2
Solar PV ¹	25	194.6	12.1	0.0	4.0	210.7
Solar Thermal	18	259.4	46.6	0.0	5.8	311.8
Geothermal	92	79.3	11.9	9.5	1.0	101.7
Biomass	83	55.3	13.7	42.3	1.3	112.5
Hydro	52	74.5	3.8	6.3	1.9	86.4

¹ Costs are expressed in terms of net AC power available to the grid for the installed capacity.

Source: Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2011, December 2010, DOE/EIA-0383(2010)

Ritorno energetico sull'Investimento Energetico (EROEI)

L'**EROEI** indica quanta energia si ottiene da un impianto di produzione in rapporto all'energia necessaria alla costruzione ed all'esercizio dell'impianto stesso.

Tale calcolo è realizzato nell'ipotesi di una **vita media caratteristica** dell'impianto di produzione energetica.

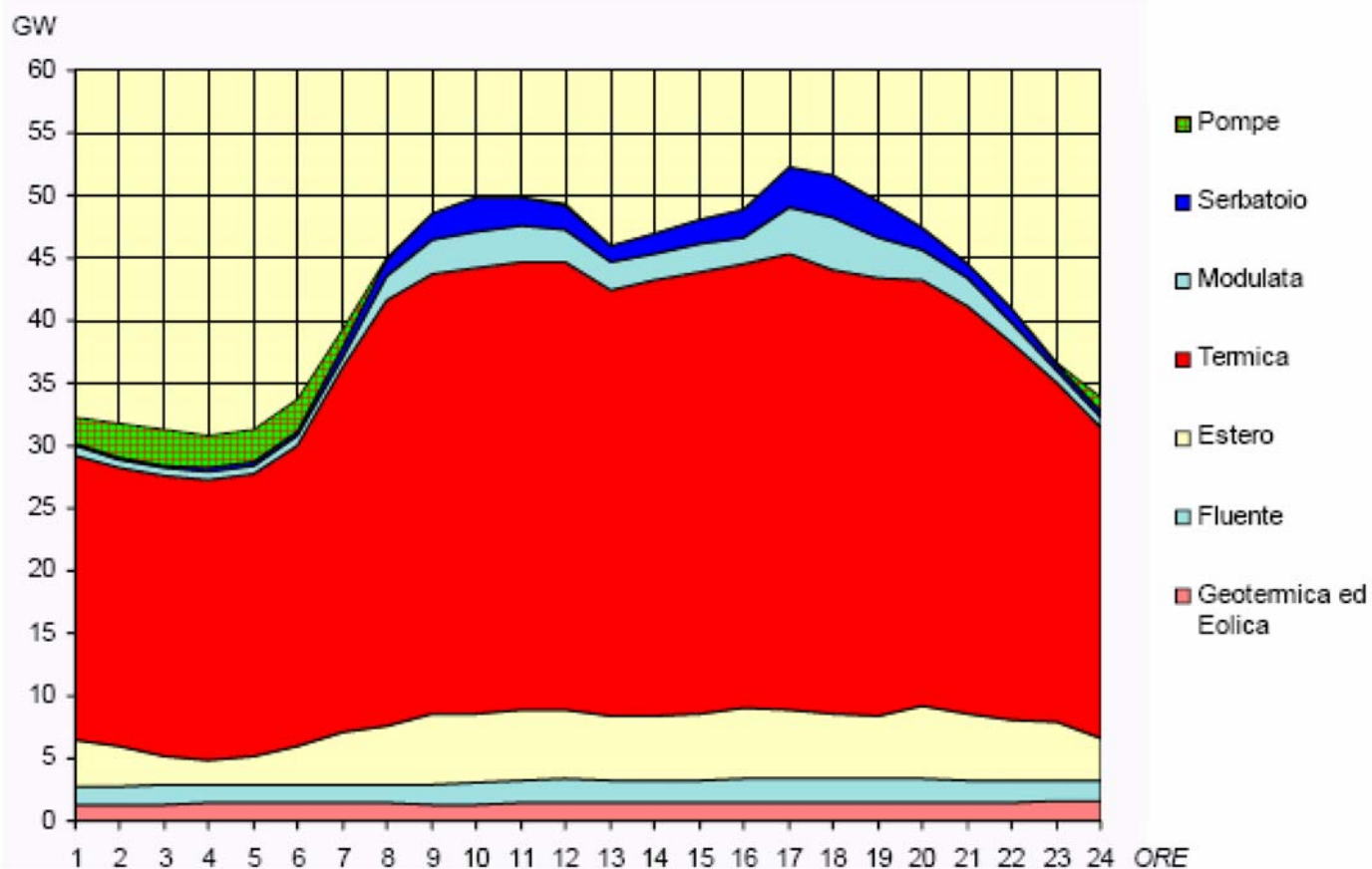
Tecnologia	EROEI (Elliott)	EROEI (Hore-Lacy)	EROEI Altri autori	Note
Grande idroelettrico	50-250	50-200		Decade con il degrado dei bacini
Mini idro	30-270			
Petrolio "anni d'oro"	50-100			Fino al 1970, circa
Petrolio oggi			5-15	Pozzi in esaurimento rendono l'estrazione sempre piu' costosa
Eolico	5-80	20		Dipende dai siti. Potrebbe essere un ottimo valore, 50 -100, per le coste del Mare del Nord. E' minore (forse intorno a 20) per un tipico sito in Italia.
Nucleare	5-100	10-60	<1	Come ovvio, ci sono infinite controversie su questo valore. Secondo alcuni, la tecnologia nucleare standard, "reattori ad acqua leggera" potrebbe avere una resa energetica minore di 1. Tuttavia, quasi certamente i reattori nucleari moderni hanno una resa energetica discretamente buona anche se non necessariamente superiore a quella di molte tecnologie rinnovabili
Fotovoltaico a film sottile			25-80	
Fotovoltaico convenzionale (silicio)	3-9	4-9	<1	Il valore < 1 è tratto da un lavoro di Odum del 1994 ed è sicuramente obsoleto. Ha dato però origine alla diffusa leggenda urbana che ci vuole più energia per produrre un pannello fotovoltaico di quanto questo ne possa ridare nel corso della sua vita operativa. Ovviamente, questa è solo una leggenda, completamente falsa per le ultime generazioni di pannelli.
Carbone	2-7	7-17		
Gas Naturale		5 - 6		
Biomassa	3-5	5-27		
Etanolo			0.6-1.2	Ci sono molte controversie sull'EROEI dell'etanolo. Secondo Patzek e Pimentel è minore di 1, ma altri autori ritengono che sia intorno a 1.2 con particolari accorgimenti. Potrebbe non essere una cattiva idea, ma la cosa va fatta con molta cura
Sabbie bituminose			<1?	Anche sulle sabbie bituminose ci sono molte controversie. Può darsi che l'EROEI di estrazione sia maggiore di 1, ma è sicuramente basso e, secondo alcuni, minore di 1

(Fonte: Bardi, 2005)

Fabbisogno di potenza in Italia

Diagramma del fabbisogno nel giorno di punta del mese di dicembre 2008

(Punta massima: 52,2 GW alle ore 17.00 del 10-12-2008)



A fronte di un fabbisogno massimo di potenza di circa **53 GW** l'Italia possiede una potenza efficiente lorda di circa **100 GW**.

- Energia, riserve e risorse

- Gli impianti elettronucleari

- La sicurezza degli impianti elettronucleari

- Conclusioni

La classificazione delle filiere nucleari

Possono esistere **più forme di distinzione tra le filiere nucleari**. Le due prevalenti differenziano i reattori o in funzione **dell'energia dei neutroni utili alla fissione** oppure in relazione alla **tipologia di trasmissione del calore attraverso il fluido termovettore**.

- **Reattori termici**: Utilizzano prevalentemente neutroni di bassa energia. Poiché i neutroni di fissione “nascono” veloci, **i reattori termici necessitano di un moderatore per rallentarli**
- **Reattori veloci**: Utilizzano prevalentemente neutroni di energia dell'ordine dell'energia di fissione (~ 2 MeV) per sostenere la reazione. **Non hanno il moderatore**. Possono essere utilizzati per convertire materiale fertile in materiale fissile (autofertilizzanti o “Breeder”).
- **Reattori a ciclo diretto**: Il fluido termovettore che asporta il calore dal nocciolo del reattore **viene immesso direttamente in turbina**.
- **Reattori a ciclo indiretto**: Il fluido termovettore che asporta il calore dal nocciolo del reattore **cede il calore attraverso uno scambiatore/generatore di vapore ad un secondo fluido termovettore** che viene immesso in turbina.

Le principali filiere

La maggioranza dei reattori oggi in esercizio si possono suddividere tecnologicamente in una delle seguenti tipologie.

Reattori termici moderati ad acqua leggera (LWR – Light Water Reactor)

- Reattori ad acqua in pressione (**PWR** – Pressurized Water Reactor)
- Reattori ad acqua bollente (**BWR** – Boiling Water Reactor)

Reattori termici moderati ad acqua pesante (HWR – Heavy Water Reactor)

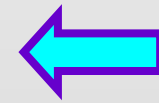
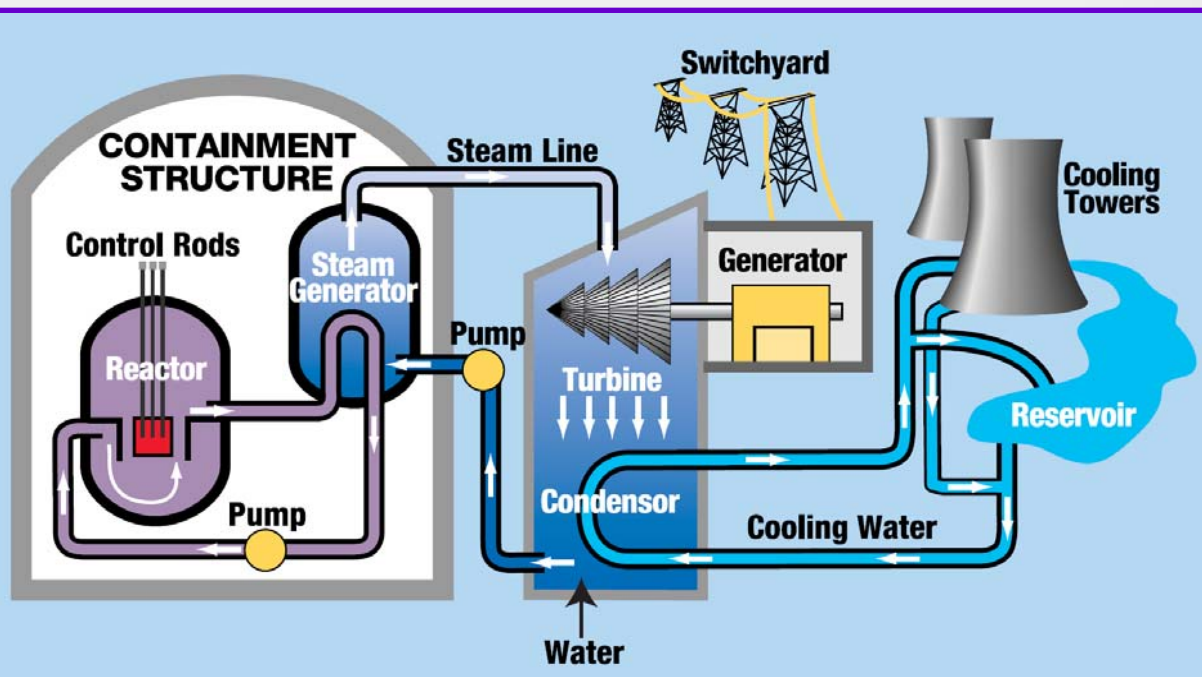
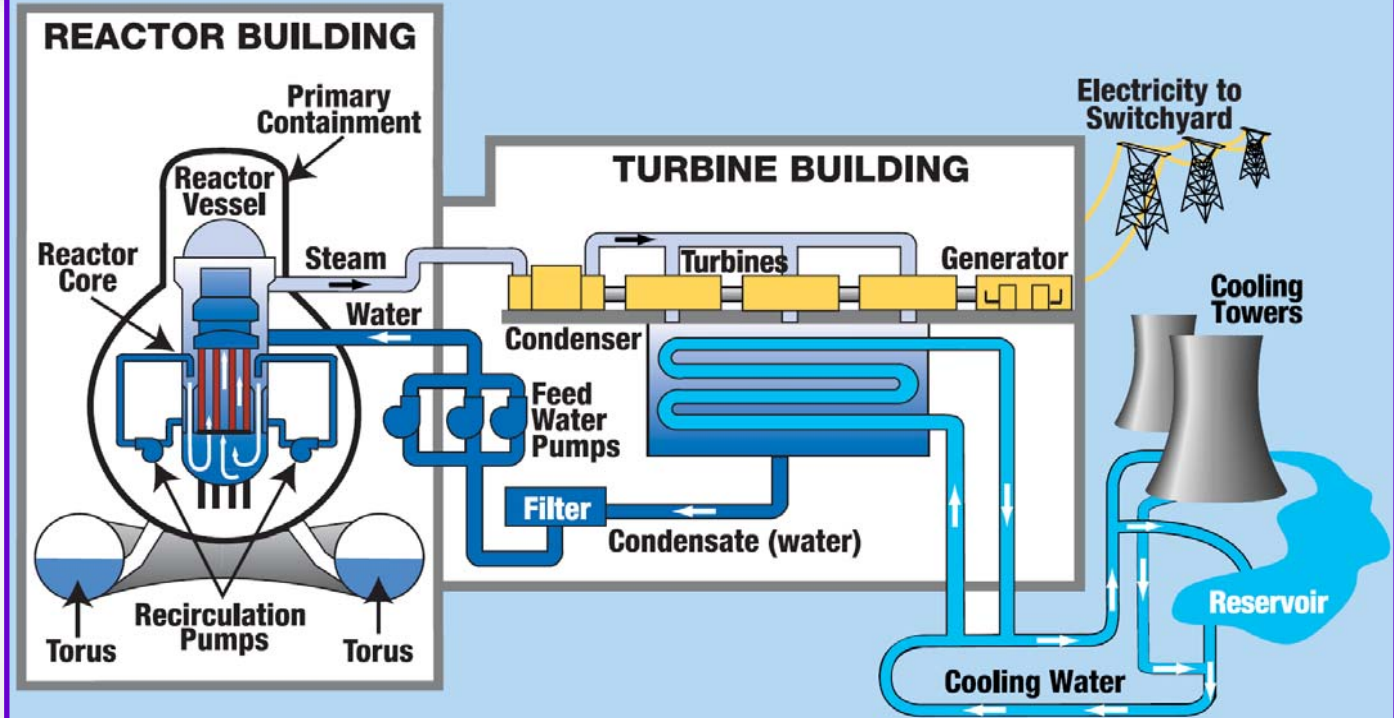
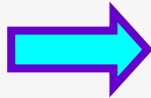
- Reattori **CAN.D.U.** (CANadian Deuterium Uranium)

Reattori veloci non moderati (FBR – Fast Breeder Reactor)

(In fase di studio dopo l'esperienza conclusa del Superphoenix)

Tipologie di LWR

Reattore ad acqua bollente (BWR)

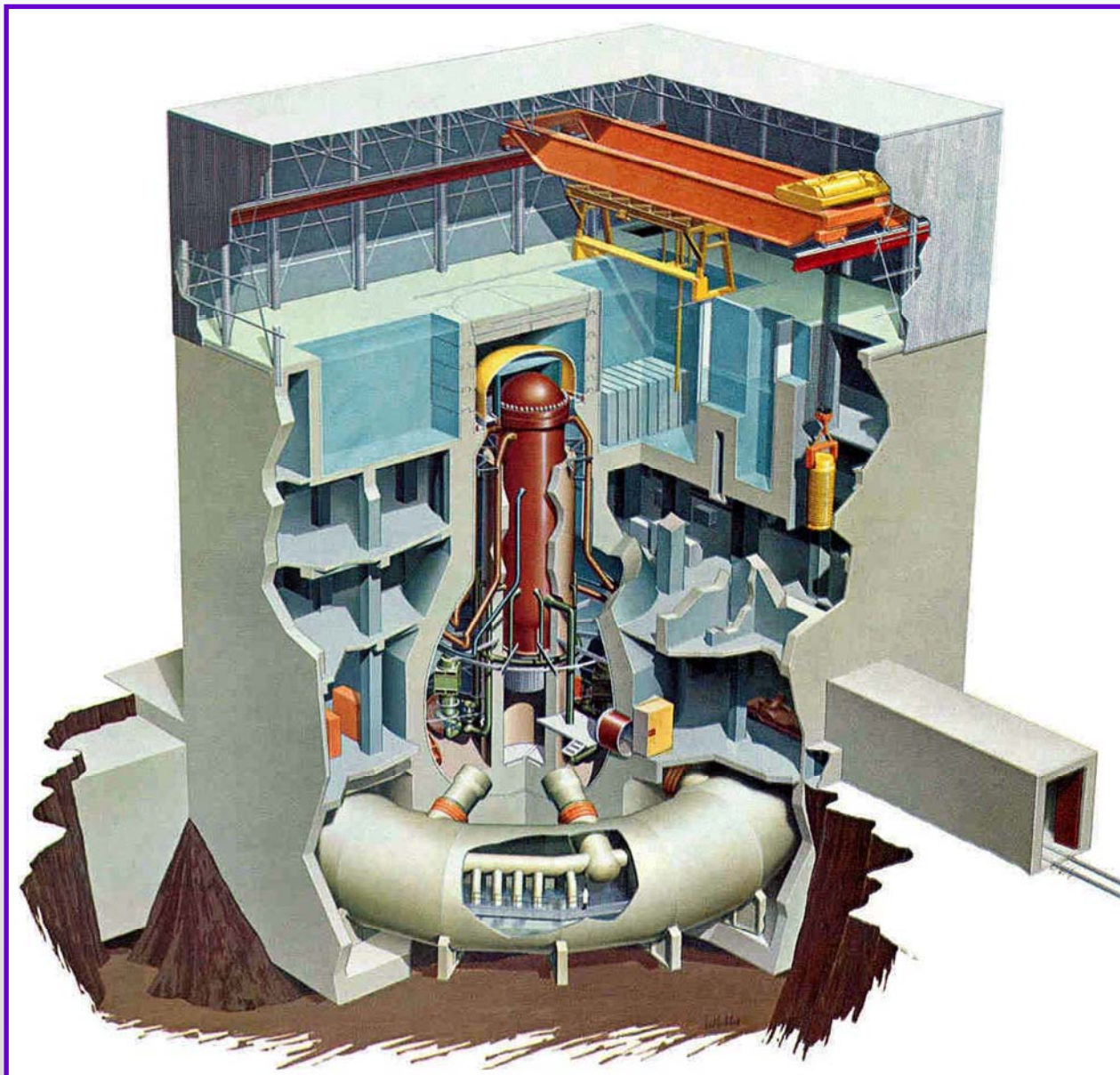


Reattore ad acqua in pressione (PWR)

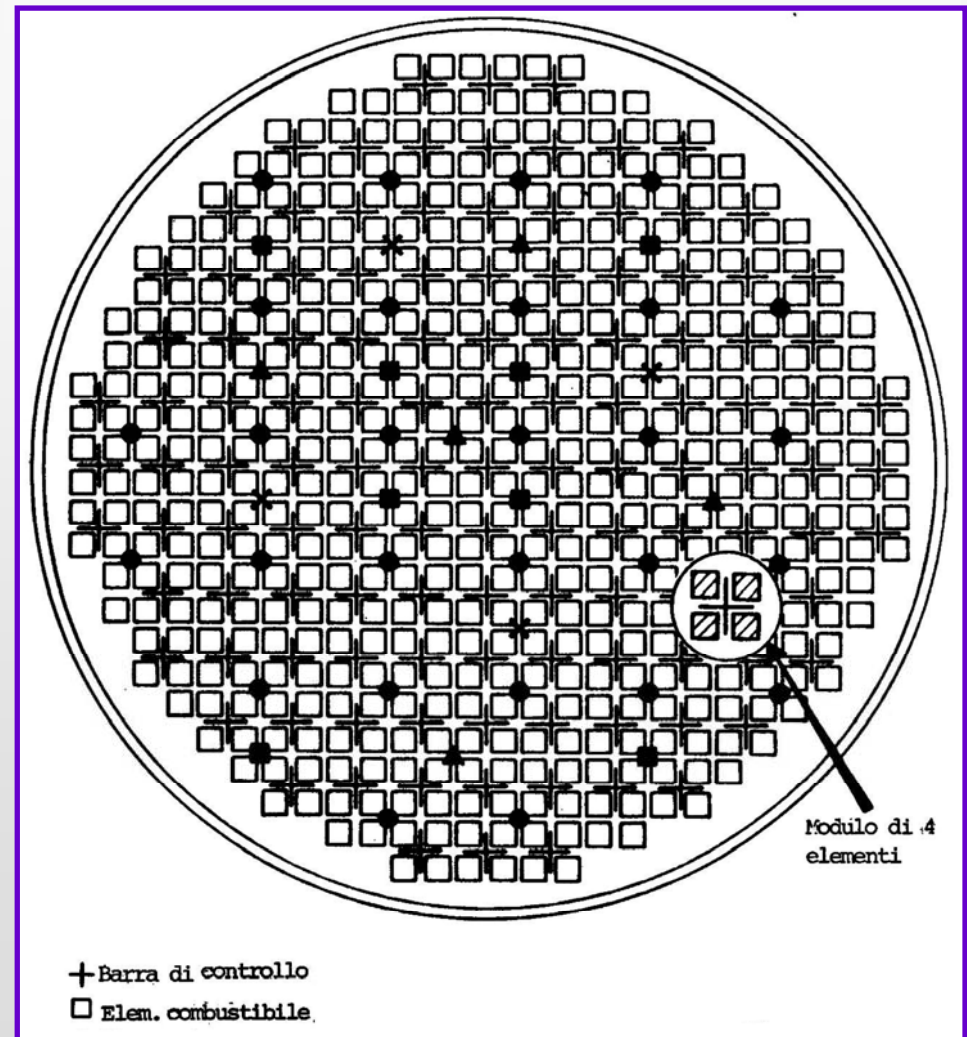
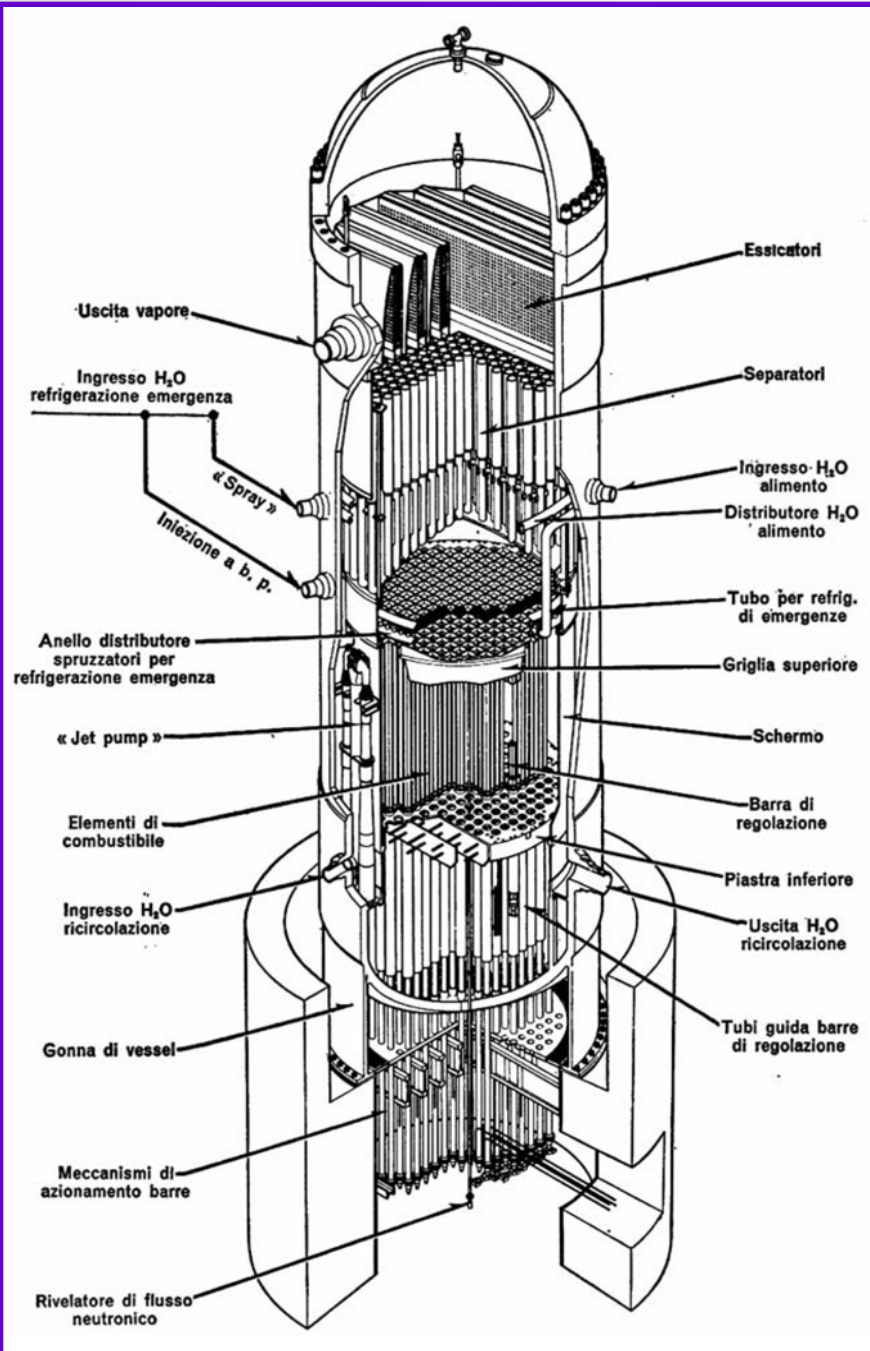
Componenti di un reattore nucleare

- **Combustibile:** Guaine cilindriche in Zircalloy (leghe di zirconio) contenenti pastiglie di ossido d'uranio UO_2 (Uranio-238 arricchito di Uranio-235 al 2-3%), cd. Barre di combustibile
- **Moderatore:** Acqua naturale (H_2O), Acqua pesante (D_2O), Grafite
- **Fluido termovettore:** Acqua naturale (H_2O), Acqua pesante (D_2O), Sodio liquido (FBR), Leghe eutettiche di Piombo-Bismuto (reattore sperimentale CIRCE) , Anidride Carbonica
- **Organi di controllo:** Barre di controllo, Veleni nucleari (acido borico)
- **Schermi:** Massicce strutture protettive del nocciolo primarie e secondarie realizzate in acciaio legato o calcestruzzo armato.

Esempio: Reattore GE BWR-4 in edificio di contenimento Mark I



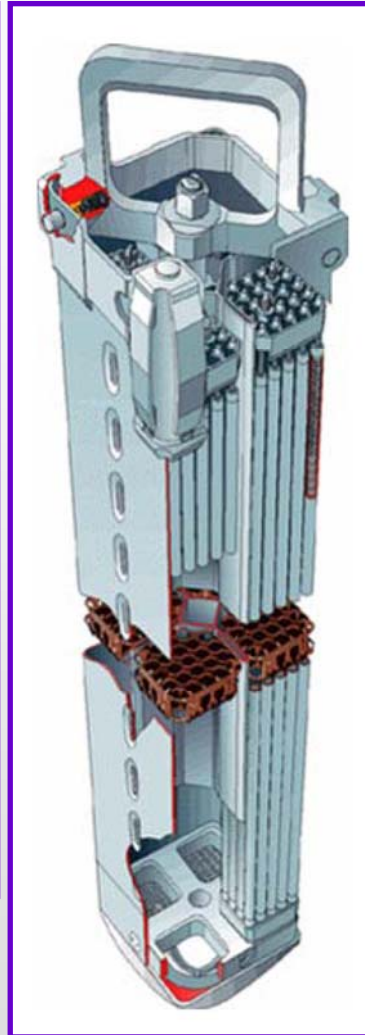
Il nocciolo del reattore in assonometria e sezione (BWR)



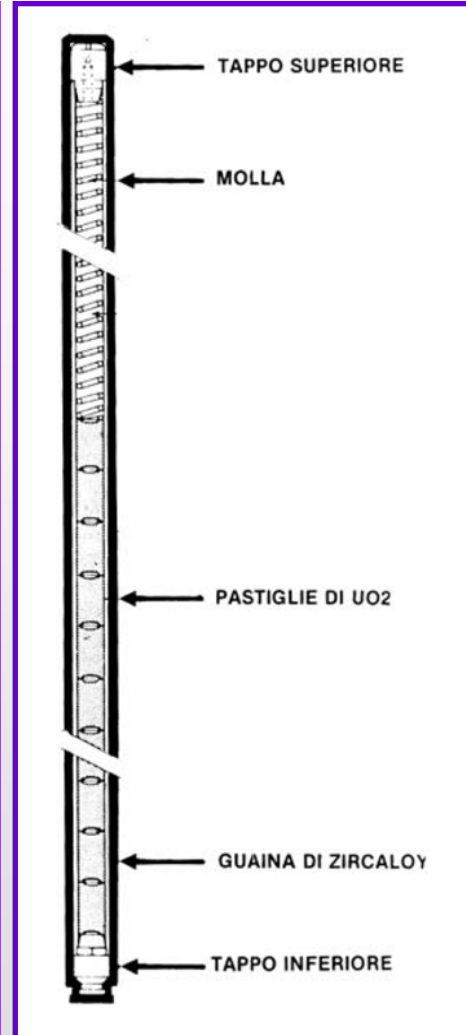
Dal modulo alla barra di combustibile



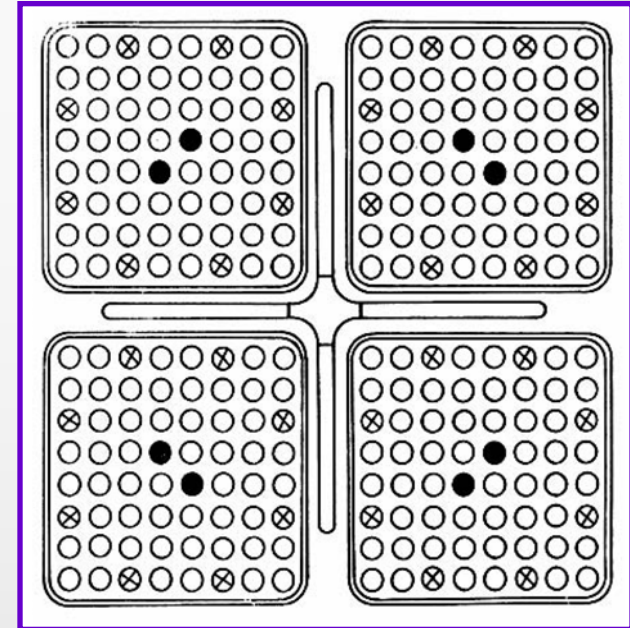
Modulo di combustibile



Elemento di combustibile



Barra di combustibile



Modulo di combustibile con barra di controllo inserita

Il ciclo del combustibile – Carico e scarico

In generale, il primo nocciolo di un reattore BWR da 1000 MW_e è caricato con **110 t di U²³⁸ arricchito al 2,1% di U²³⁵**

La ricarica annuale verrà effettuata con circa **30 t di U²³⁸ arricchito al 2,7% di U²³⁵**

L'intero nucleo verrà quindi rinnovato ogni **4 anni**

Il combustibile irradiato in uscita dal reattore conterrà:

- **95% di Uranio riciclabile**
- **1% di Plutonio riciclabile**
- **4% di prodotti di fissione (Iodio-131, Cesio-137, Stronzio-90)**

Tale combustibile in uscita viene poi lasciato *raffreddare* in piscina per almeno **5 mesi** in attesa del riprocessamento (quando è previsto).

Il ciclo di combustibile – Attività nucleare

Il primo nocciolo di un reattore LWR da 1000 MW_e possiede un'attività di circa **150 – 300 Curie**

Nel punto di massimo irraggiamento, il nocciolo del reattore può arrivare a **17 miliardi di Curie**

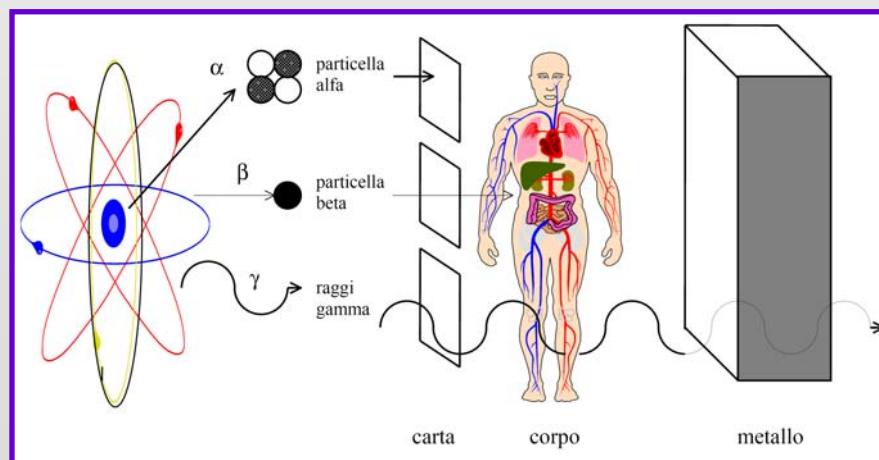
(Fonte: Lombardi, 2009)

La commissione **Rasmussen** indica come riferimento per l'incidente di progetto una fuoriuscita dal reattore pari ad **1 miliardo di Curie**. Nell'incidente di Chernobil sono stati rilasciati **300 milioni di Curie**.

Le sostanze radioattive possono raggrupparsi in due grandi specie:

- Prodotti o frammenti di fissione (Cesio-137, ecc.), con **tempi di dimezzamento inferiori ai 30 anni e tipica emissione gamma**
- Nuclei formati per assorbimento neutronico (Plutonio 239, Americio-243) con **tempi di dimezzamento molto superiori a 30 anni e tipica emissione alfa**

La radiazione gamma è pericolosa per irraggiamenti esterni mentre quella alfa per ingestione o inalazione.

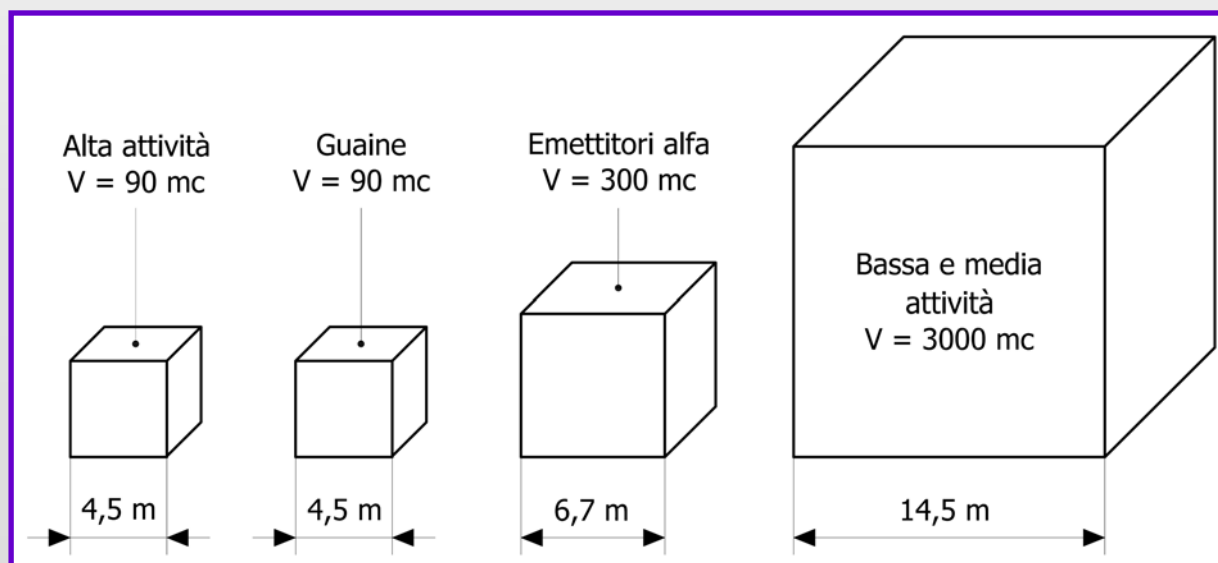


Il ciclo del combustibile – Quantità in gioco

I rifiuti prodotti in un anno da una centrale nucleare LWR da 1000 MW_e sono riassumibili nei seguenti:

- Circa **3 mc di rifiuti ad alta attività solidificati (scorie)** con una attività complessiva di **150 MCi beta-gamma**
- Circa **3 mc di rifiuti compattati di deguainaggio**, con un'attività complessiva di **1,5 MCi beta-gamma più attinidi**
- Circa **10-100 mc di rifiuti solidi a bassa e media attività**, con attività complessiva di **0,01 MCi beta-gamma, più contaminazione alfa**
- Circa **1-10 mc di rifiuti alfa solidi** o solidificati contenenti da **1 a 5 kg di plutonio**

Il totale dei rifiuti prodotti dalla medesima centrale in **30 anni di esercizio** è riportato nello schema seguente (*Fonte: ENEA, 1990*)



Il ciclo del combustibile – Strategie di gestione

Esistono tre principi base nella gestione dei rifiuti radioattivi:

- a) **Diluizione e dispersione** nell'ambiente sotto forma di radionuclidi in quantità inferiore ai limiti di radioprotezione vigenti
- b) **Custodia e decadimento** dei rifiuti che contengono solamente radionuclidi a vita breve
- c) **Concentrazione e confinamento** dei rifiuti che contengono significative quantità di radionuclidi a lunga vita

Il ciclo del combustibile – Stoccaggio

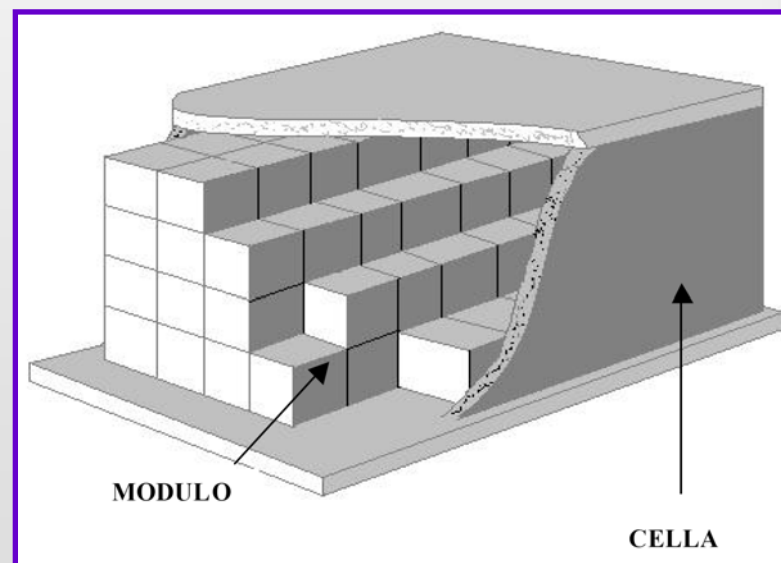
Rifiuti a bassa e media attività (I Categoria): decadimenti nell'ordine dei mesi o anni. Si attende il decadimento della radioattività a tempi trascurabili e poi sono gestiti come rifiuti convenzionali o speciali (oltre alla provenienza elettronucleare si sommano i rifiuti di origine medica).

Rifiuti con decadimenti nell'ordine delle centinaia di anni (II Categoria): si procede al condizionamento in matrice cementizia che verrà incapsulata in contenitori anch'essi di cemento (oltre alla provenienza elettronucleare si assommano rifiuti dovuti a reattori di ricerca, smantellamento di centrali, ecc.)

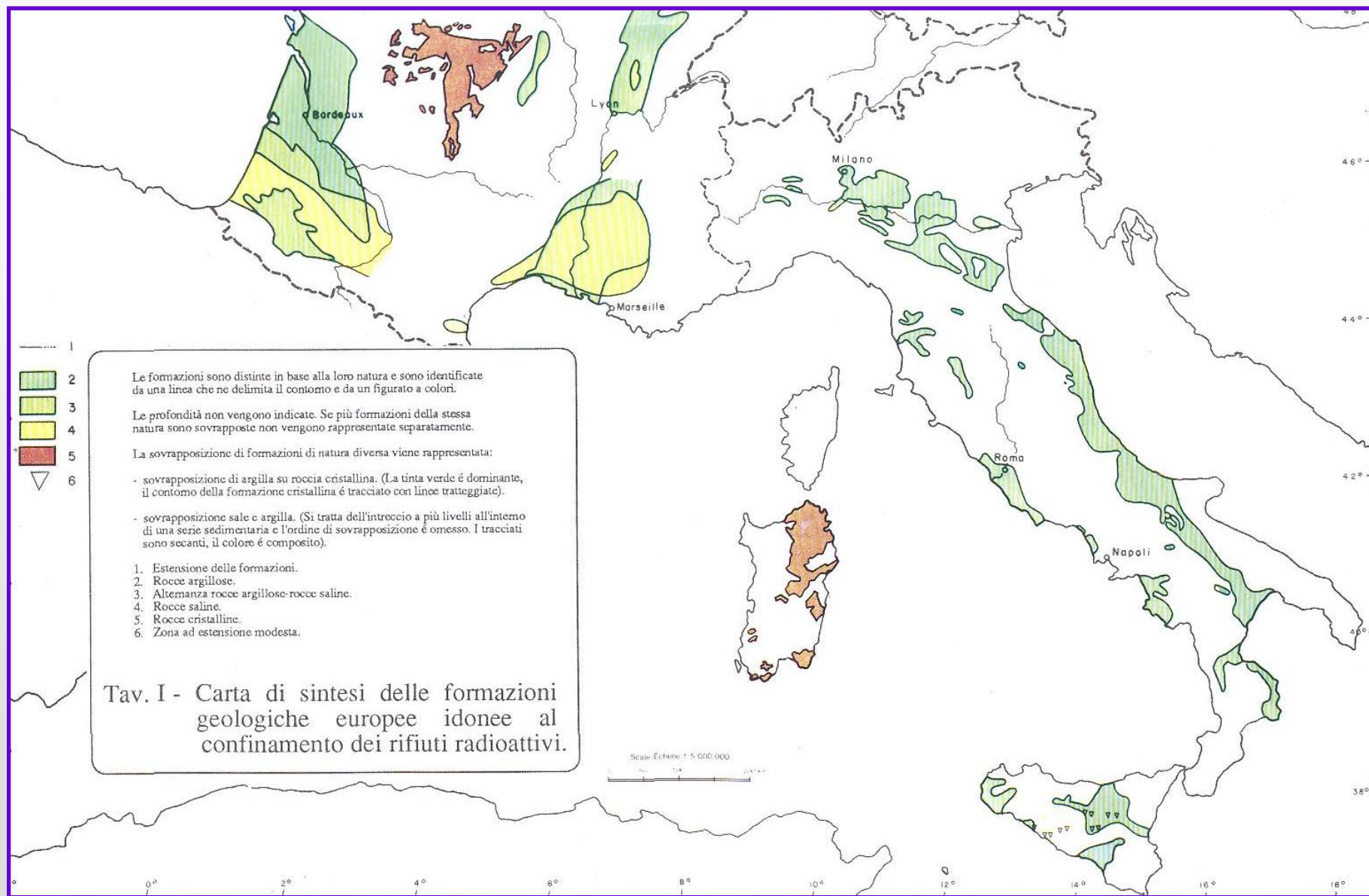
Le strutture di deposito dei rifiuti di II categoria sono realizzate in superficie, in edifici appositi.

Rifiuti ad alta attività (III Categoria):

Nessun deposito per tipo di rifiuti è attualmente in funzione nel mondo. E' previsto, nel caso di concentrazione e confinamento, **l'incapsulamento in matrice vetrosa e lo stoccaggio definitivo in miniere di salgemma.** Tali rifiuti "potrebbero" divenire combustibile nucleare per i reattori di IV generazione



Formazioni geologiche idonee al confinamento dei rifiuti radioattivi in Italia (Fonte: ENEA, 1990)



Decommissioning (Smantellamento)

Ad oggi, secondo dati dell'IAEA (2005), risultano smantellate o in fase di smantellamento:

- **8 centrali elettronucleari (completamente)**
- **17 centrali elettronucleari (parzialmente)**

Il costo di decommissioning varia dal **10% al 20% del costo totale di costruzione** (arrivando **fino al 150%** nell'ipotesi peggiore in una centrale con 40 anni di esercizio)

(Fonte: Cumo, 2008)

I reattori veloci (FBR)

Il più importante reattore civile veloce (Superphoenix) è stato costruito ed esercito in Francia a Creys Malville, al confine con la Svizzera a partire dal 1986 (1200 MWe). A seguito dei numerosi guasti legati, prevalentemente, al fluido termovettore, il reattore cessò la produzione elettrica nel 1997.

I reattori veloci, non moderati, rappresentano senz'altro la *nuova frontiera* dell'energia da fissione.

Essi consentirebbero di **produrre più energia di quanta ne consumano, rendendo fissile l'Uranio-238 con la trasformazione in Plutonio-239.**

Aumentando quindi di un **fattore 100** le attuali riserve energetiche di Uranio e **potrebbero funzionare anche a Torio**, minerale più abbondante dell'Uranio.

Esistono tuttavia alcune particolari criticità:

- **Il sodio liquido, utilizzabile come termovettore, corrode l'acciaio e reagisce violentemente con l'acqua**
- **Il piombo-bismuto eutettico liquido (termovettore anch'esso) corrode l'acciaio e l'assorbimento neutronico trasforma il bismuto in polonio**
- **L'incidente di progetto di un reattore FBR può determinare il rilascio, all'interno del contenimento a pressione, di un'energia equivalente a 100 kg di tritolo**

Tali problematiche **rappresentano una sfida alla luce della prossima IV generazione dei reattori.**

Il futuro dell'energia nucleare

La IV generazione

Sicurezza passiva
Autofertilizzanti
Produzione di energia + H₂



Generation I



Early Prototype Reactors

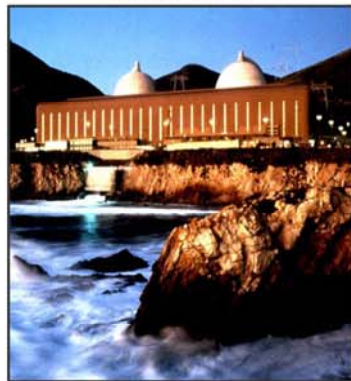


- Magnox
- Shippingport
- Dresden

Generation II



Commercial Power Reactors



- LWRs: PWR, BWR
- CANDU
- AGR

Generation III



Advanced LWRs

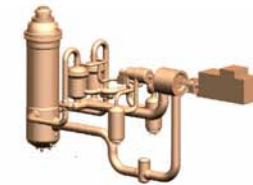


- ABWR
- AP1000
- EPR

Generation III+



Evolutionary Designs

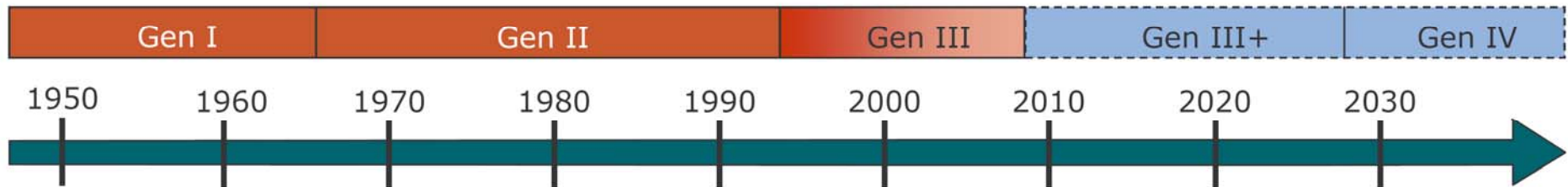


- PBMR
- IRIS

Generation IV

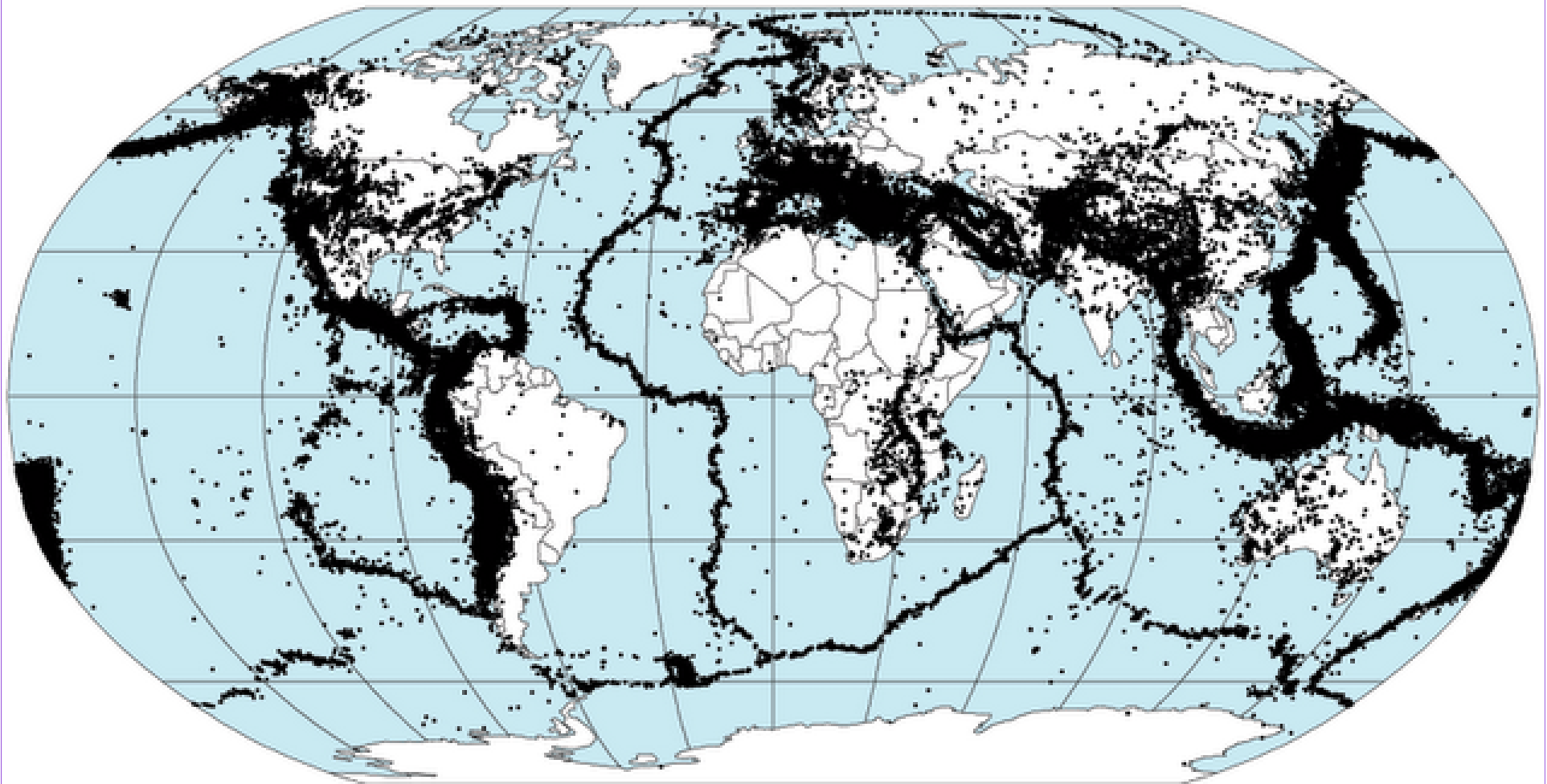


- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimize Wastes
- Proliferation Resistant



Dove NON costruire una centrale elettronucleare...

Preliminary Determination of Epicenters
358,214 Events, 1963 - 1998



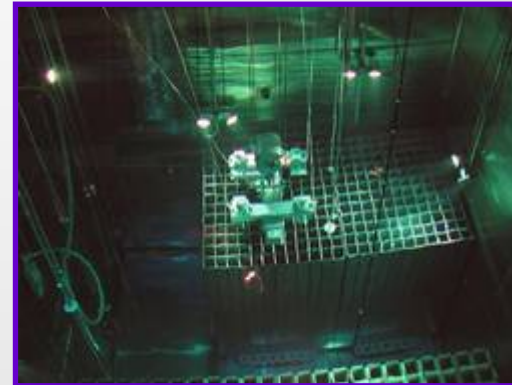
Nuclear Power Plant *Near* "Treviso"?

A Krsko, in Slovenia (a circa 250 km in linea d'aria da Treviso), è in funzione dal 1983 un impianto elettronucleare avente le seguenti caratteristiche:

- **Costruttore: Westinghouse**
- **Tipo di reattore: n. 1 PWR**
- **Potenza elettrica: 730 MW_e**
- **Carica nocciolo: 48,7 t**
- **Data inizio prod: 1 Gennaio 1983**
(NB - All'epoca esisteva la Jugoslavia di Tito)

La durata dell'impianto, inizialmente di **40 anni**, è stata estesa dal parlamento sloveno a **60 anni**. Il termine dell'esercizio sarà dunque il **2043**.

Nel **2008 l'impianto subì uno shut-down di emergenza** a causa di una perdita dal circuito di raffreddamento. Non ci furono rilasci di radioattività all'esterno del Plant.



- Energia, riserve e risorse
- Gli impianti elettronucleari

• La sicurezza degli impianti elettronucleari

- Conclusioni

I possibili incidenti

I prodotti di fissione sono separati dall'ambiente esterno dalle **seguenti barriere**:

- **La guaina dell'elemento combustibile**
- **La matrice ceramica delle pastiglie di combustibile**
- **Il vessel e il contenimento a pressione del fluido termovettore**
- **I contenimenti (primario e secondario)**

Un incidente è un qualsiasi evento che può determinare una lesione all'integrità di una delle barriere.

Esistono poi almeno due fenomeni che possono aggravare l'evoluzione dell'incidente:

1. **Guasti nell'asportazione del calore di decadimento**, come accaduto a Fukushima
2. **Possibilità che il reattore divenga sovracritico** (malfunzionamenti del sistema di controllo, variazioni non volute di parametri di controllo, ecc.) come accaduto a Three Mile Island

Cosa può andare storto in un impianto nucleare?

- **Incidenti di reattività:** erronea estrazione delle barre, variazione dei parametri del termovettore che fanno aumentare la criticità
- **Incidenti di mancato raffreddamento:** arresto pompa, ostruzione di un canale di potenza
- **Rottura della barriera a pressione del circuito termovettore:** negli LWR gli incidenti più gravi appartengono a questa categoria. In particolare il LOCA (Loss Of Coolant Accident) è sicuramente il più temibile
- **Incidente durante la movimentazione del combustibile:** le barre irraggiate possono rilasciare prodotti di fissione per danneggiamento meccanico o per scarso raffreddamento. Tale aspetto è aggravato dal fatto che l'esecuzione delle operazioni avviene all'esterno della barriera a pressione del circuito termovettore.

Il calore di decadimento

Un impianto nucleare non si spegne estraendo le chiavi da cruscotto, ok?

Un reattore nucleare, anche quando spento con barre di controllo inserite, **eroga sempre una frazione di potenza termica dovuta al decadimento degli elementi irraggiati.**

Tale potenza decade lentamente con il tempo. Dopo un paio di minuti dallo spegnimento essa ammonta al 2,5% della potenza termica di targa.

$$W/W_0 = 0,06 \cdot t^{-0,2}$$

ATTENZIONE: Poca percentualmente ma non in termini assoluti.

Una centrale LWR da 1000 MW_e (3000 MW_t) emette, dopo circa 15 minuti dallo spegnimento, la considerevole potenza di 56 MW_t

La potenza equivalente a quella generata da circa 2300 caldaie domestiche funzionanti a piena potenza.

Il combustibile in piscina, stoccato in attesa di successivo riprocessamento, emette **40 kW_t/t dopo circa 6mesi** e **10 kW_t/t dopo un anno.**
Dopo **dieci anni** il combustibile naturale continuerà ad emettere fino ad **1 kW_t/t.**

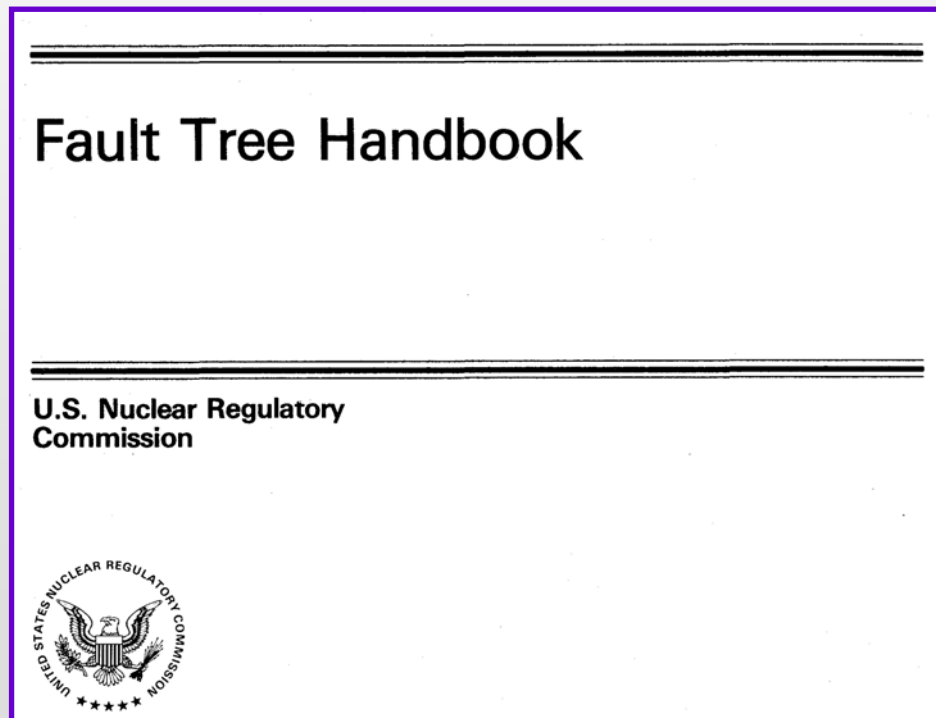
Il combustibile nucleare irradiato necessita SEMPRE di continuo raffreddamento!

Metodologia di valutazione del rischio in impianti nucleari

La metodologia di valutazione del rischio in impianti nucleari (così come in impianti a rischio di incidente rilevante), si basa su una serie di strumenti tra i quali:

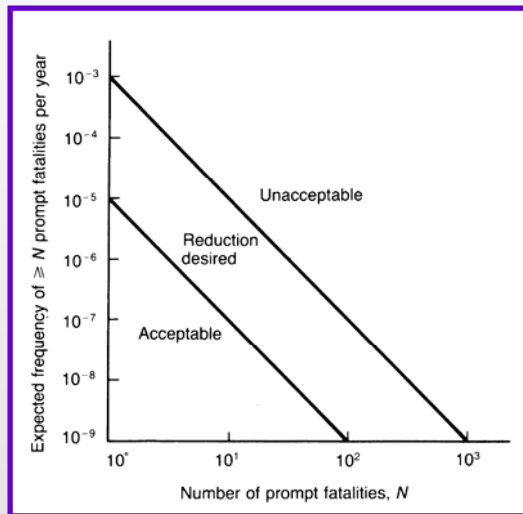
- FMEA (Failure Mode Effects Analysis)
- ETA (Event Tree Analysis)
- **FTA (Fault Tree Analysis)**

Quest'ultima, in particolare, è utilizzata per stimare le **frequenze incidentali di accadimento noto che sia uno scenario di rischio.**



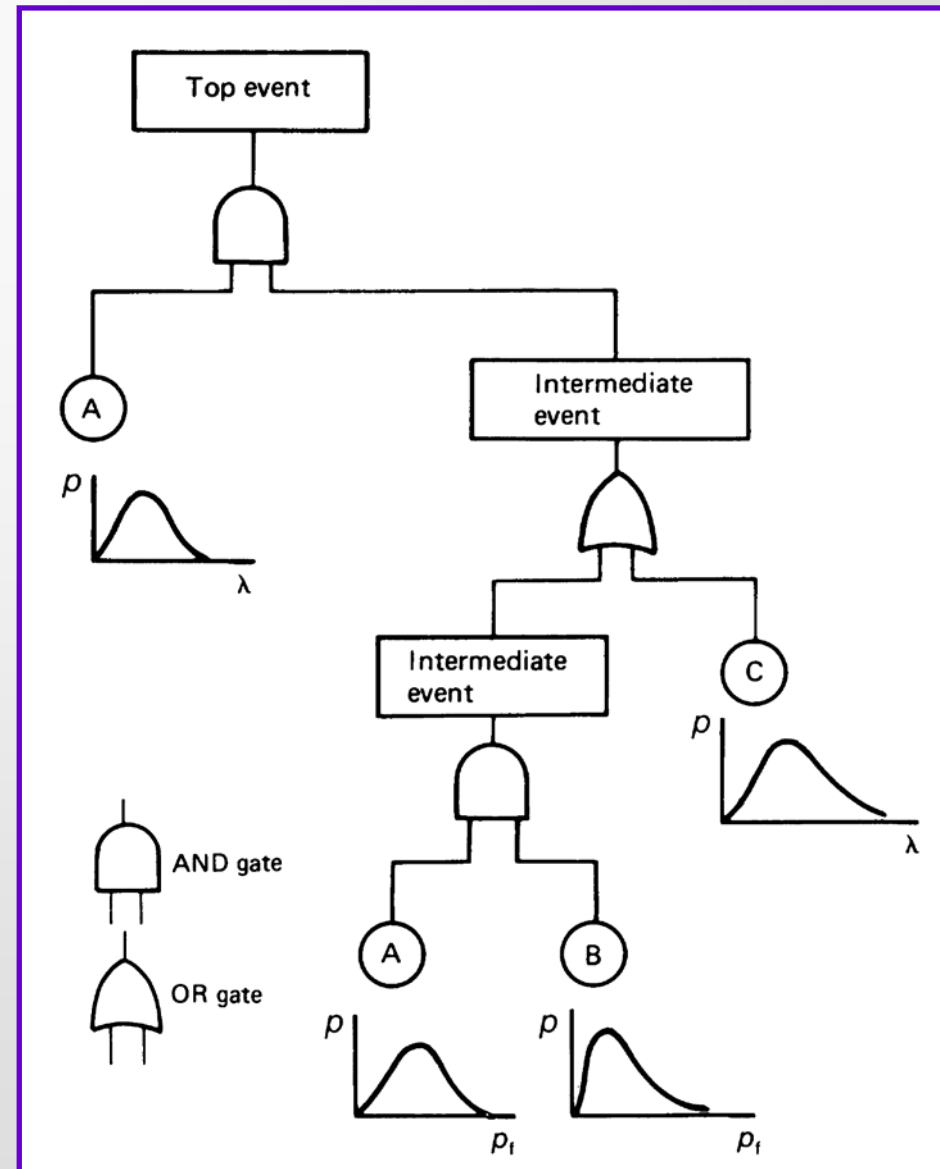
Rischio e FTA

Il rischio nell'ambito dei settori nucleari, chimici, aeronautici, può essere definito come il prodotto tra una probabilità di accadimento ed un danno potenziale ($R=p \cdot D$).



La metodologia FTA permette, una volta definito il Top Event da analizzare, di risalire:

- Alle **cause prime** dell'evento apicale
- Alla **probabilità** che tale evento si manifesti (accettabili $p \leq 10^{-6}/\text{plant} \cdot \text{year}$)



La scala degli incidenti INES

Liv.	Definizione	Criterio	Eventi
7	Incidente molto grave	Rilascio all'esterno di una frazione elevata del contenuto del nocciolo (Attività di Iodio-131 in quantità superiore a 10.000 TBq)	Chernobil (URSS), 1986 Fukushima (J), 2011
6	Incidente Grave	Rilascio all'esterno di prodotti di fissione (Attività di Iodio-131 di alcune migliaia di TBq)	Kyshtym (URSS), 1957
5	Incidente con rischio esterno al sito	Rilascio all'esterno di prodotti di fissione (Attività di Iodio-131 di alcune centinaia di TBq). Grave danneggiamento del nocciolo a causa di effetti meccanici e/o fusione	Windscale (UK), 1957 Three Miles Island (USA), 1979
4	Incidente con rischio prevalentemente interno al sito	Rilascio di radioattività all'esterno con dosi dell'ordine di alcuni mSv. Possibili effetti acuti ai lavoratori (ordine di grandezza di 1 Sv). Qualche danno al nocciolo a causa di effetti meccanici e/o fusione	Tokaimura (J), 1999 Saint Laurent (F), 1984
3	Guasto grave	Rilascio di radioattività all'esterno con dosi dell'ordine di alcuni decimi di mSv. Sovraesposizione dei lavoratori (ordine di grandezza superiore a 50 mSv). Un ulteriore danneggiamento può determinare un incidente.	Vandellós (E), 1989
2	Guasto	Guasti tecnici o anomalie che, pur non incidano direttamente o immediatamente sulla sicurezza, impongono una rivalutazione delle misure di sicurezza.	
1	Anomalia	Anomalie funzionali ed operative che non pongono rischi ma che segnalano la mancanza di misure di sicurezza (Guasti apparecchiature, errori umani, inadeguatezze procedurali).	

Gli incidenti maggiori

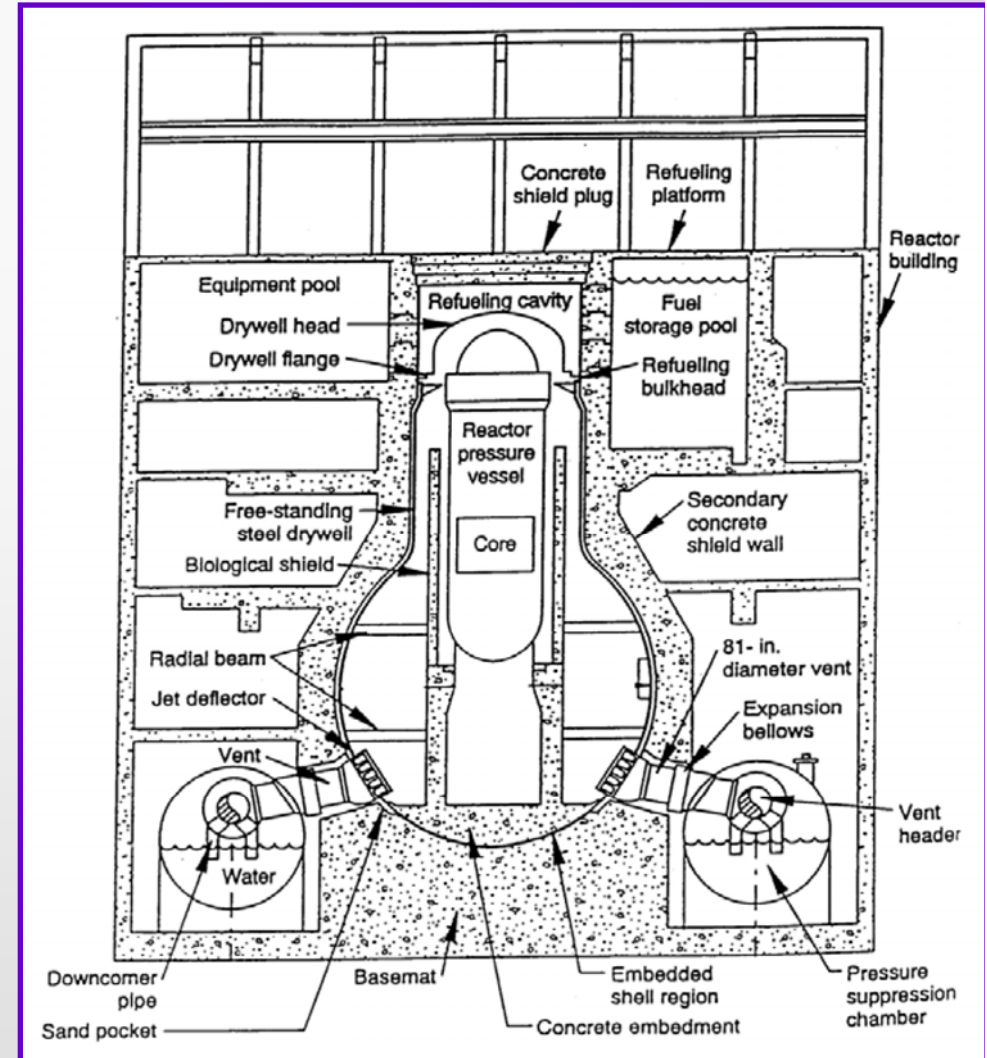
I principali incidenti ad installazioni nucleari di cui si è avuta conferma ufficiale sono:

- **Kyshtym** (Unione Sovietica 1957) - scala **INES 6**. Un bidone di rifiuti radioattivi prese fuoco ed esplose contaminando migliaia di Km² di terreno. Risultarono esposte alle radiazioni circa 270.000 persone.
- **Windscale** (Gran Bretagna 1957) - scala **INES 5**. Un incendio nel reattore dove si produceva plutonio per scopi militari causò una nube radioattiva imponente. La nube attraversò l'intera Europa. Sono stati ufficializzati soltanto 300 morti per cause ricondotte all'incidente (malattie, leucemie, tumori) ma il dato potrebbe essere sottostimato.
- **Three Mile Island** (Harrisburgh, Usa 1979) - scala **INES 5**. Il surriscaldamento del reattore provocò la parziale fusione del nocciolo rilasciando nell'atmosfera gas radioattivi pari a 15.000 TBq. In quella occasione vennero evacuate 3.500 persone.
- **Chernobyl** (Unione Sovietica, 1986) - scala **INES 7**. L'incidente nucleare in assoluto più grave di cui si abbia notizia. Il surriscaldamento provocò la fusione del nocciolo del reattore e l'esplosione del vapore radioattivo. Fu proiettata in atmosfera una nube di materiale radioattivo, pari a circa 800 volte la radioattività rilasciata da Three Mile Island. Le morti immediate furono circa 30 e l'intera Europa fu esposta alla nube radioattiva.
- **Tokaimura** (Giappone, 1999) - scala **INES 4**. Un incidente in una fabbrica di combustibile nucleare attivò una reazione a catena incontrollata. Tre persone morirono all'istante e altre 400 risultarono esposte alle radiazioni.

L'incidente di Fukushima

L'impianto nucleare di Fukushima è composto da **6 reattori nucleari** con le seguenti caratteristiche:

- Inizio costruzione: 1967-73
- Inizio attività: 1971-79
- Pot. elettrica F1 (BWR3): 460 MW
- Pot. elettrica F2-5 (BWR4): 784 MW
- Pot. elettrica F6 (BWR5): 1100 MW



I dettagli dell'incidente sono reperibili al seguente link:

<http://www.enea.it/speciale-Giappone/sequenza-incidentale.html>

- Energia, riserve e risorse
- Gli impianti elettronucleari
- La sicurezza degli impianti elettronucleari

- Conclusioni

Conclusioni – 1 di 3

- **Senza cambiamento non c'è futuro:** dovremo adattarci alla variazione di clima, ed avere il coraggio di modificare i modi di soddisfare i bisogni, **riducendo la quantità di energia necessaria a soddisfarli e rendendo i processi efficienti**
- **Senza nuove idee non saremo in grado di procurarci l'energia di cui avremo bisogno:** dovremo **investire in conoscenza** e nella promozione della **ricerca scientifica e tecnologica**
- E' una sfida ed un'opportunità per le nostre e le generazione che verranno. **Noi e i nostri figli.**
- Esistono parecchi sistemi di razionalizzazione e risparmio energetico **già maturi e sfruttabili nell'immediato** (es. *microgenerazione, solare termico a collettore, eolico in-shore, pompe di calore, rifasamento impianti elettrici, promozione del trasporto pubblico, illuminazione a basso consumo*) e **nel prossimo futuro** (es. *auto elettrica, pile a combustibile*)
- **Integrazione e coordinamento dei sistemi energetici**

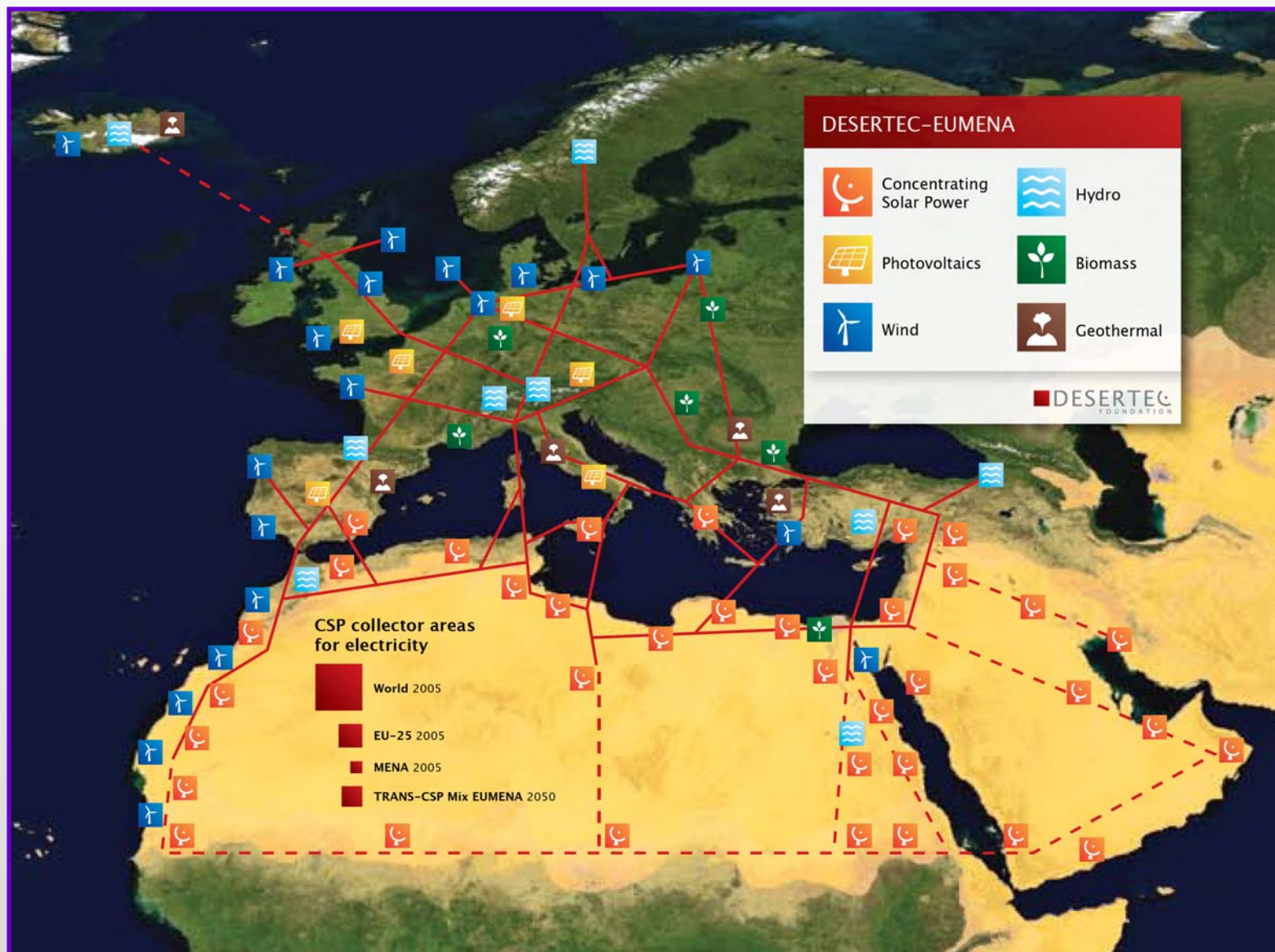
Conclusioni – 2 di 3

- La scelta e l'individuazione delle risorse energetiche deve essere realizzata sulla base di un piano di sviluppo credibile per il Paese. La risorsa nucleare *può* essere un'opzione giustificata solo a valle di nuovo **Piano Energetico Nazionale** (l'ultimo è del 1988) alla cui elaborazione devono contribuire **le migliori intelligenze del Paese**
- **Ridurre la dipendenza** dal gas naturale fornito da **gasdotti** a favore di quello **proveniente da nave metaniera**
- Visto l'attuale configurazione energetica del nostro paese, attendere la **filiera di IV generazione** (*attualmente solo allo stato di progetto*). **Ad un patto però: le promesse devono essere mantenute** (es. sicurezza passiva, produzione integrata di energia elettrica ed idrogeno, eliminazione degli attinidi, ecc.)
- La scelta di adozione di tecnologie che richiedono 10-15 anni per la realizzazione e messa in esercizio **non può che essere condivisa ed accettata dalla maggioranza delle forze politiche in campo**. Diversamente **chi verrà dopo avrà gioco facile a sospendere e/o liquidare i progetti elaborati dall'amministrazione precedente.**

Conclusioni – 3 di 3

- Esistono tecnologie di produzione energetica che non sono “mature” (es. fotovoltaico). **Costano troppo, la produzione di potenza richiede moltissima superficie, non esistono adeguati sistemi tecnologici per l’accumulo ed il bilanciamento (estate-inverno, giorno-notte)**
- In questo momento storico risulta **impossibile eseguire una corretta valutazione dei rischi da parte di “non specialisti”**. Infatti, mentre risultano ampiamente noti (con più o meno precisione) i costi di qualsiasi forma di produzione energetica, risultano **oscuri i benefici**. Le risorse di gas naturale e petrolio **mantengono infatti prezzi di estrazione compatibili con le necessità di crescita del nostro paese**
- **Qualsiasi forma di produzione energetica, se utilizzata in modo intensivo, possiede sempre importanti ricadute ambientali**

Il sogno di un mondo rinnovabile è realizzabile?



Riferimenti utili

- Meadows D. e D., Randers J., *I nuovi limiti dello sviluppo*, Mondadori, Milano, 2006
- Silvestri M., *Il futuro dell'energia*, Bollati Boringhieri, Torino, 1988
- Cumo M., *Impianti nucleari*, La Sapienza, Roma, 2008
- Lombardi C., *Impianti nucleari*, Polipress, Milano, 2009
- De Paoli L., *L'energia nucleare*, Il Mulino, Bologna, 2011
- Renzulli R.I., *Elementi di impianti nucleari*, Ordine degli Ingegneri di Roma, *(disponibile online)*
- Palazzetti M., Pallante M., *L'uso razionale dell'energia*, Bollati Boringhieri, Torino, 1997
- Terna, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*, 2009 *(disponibile online)*
- Mirandola A., Crepaldi G., *Problema demografico e problema energetico nell'attuale situazione del Paese*, Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti, Padova, 2006 *(disponibile online)*
- BP, *Statistical review of world energy*, UK, 2010 *(disponibile online)*
- Rasmussen N. C., *Reactor Safety Study Presidential Commission on Catastrophic Nuclear Accidents (WASH-1400)*, USA, 1975

Riferimenti utili

- Bianchi M., De Pascale A., Gambarotta A., Peretto A., *Sistemi energetici: impatto ambientale*, Pitagora, Bologna, 2008
- MacKay D.J.C., *Sustainable Energy – without the hot air*, UIT, Cambridge (UK), 2008 (*disponibile online*)
- Desertec Foundation, *White Book: Clean Power from Deserts, 4th Edition*, Bonn, Germany, 2009 (*disponibile online*)
- Bardi U., *Il ritorno energetico sull'investimento energetico (EROEI)*, aspoitalia, 2005 (*disponibile online*)
- Pinto I., *Dispense del corso di radioprotezione*, Politecnico di Torino (*disponibile online*)
- DOE, *Nuclear physics and reactor theory Voll. 1 e 2*, U.S. Department Of Energy, Washington DC, USA, 1993 (*disponibile online*)
- NRC, *Fault Tree Handbook*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, 1981 (*disponibile online*)
- Associazione per lo studio del picco del petrolio: www.aspoitalia.it
- International Atomic Energy Agency: www.iaea.org
- Blog Amedeo Balbi su Fukushima: www.ilpost.it/amedeobalbi/2011/03/15/un-po-di-cose-che-so-sulle-centrali-nucleari/
- Approfondimento dell'ENEA su Fukushima: www.enea.it/Speciale-Giappone.html

Riferimenti utili

- DOE, *Annual Energy Outlook 2011*, U.S. Department Of Energy, Washington DC, USA, 2010 (*disponibile online*)
- ENEA, *Smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita – Sintesi degli studi e ricerche 1976/1989*, Roma, 1990
- Ashby M.F., Jones D.R.H., *Engineering Materials 1 (II Edition)*, Butterworth Heinemann, Oxford (UK), 1996
- IAEA, *Uranium 2009 – Resources, Production and Demand*, Wien, Österreich, 2009



STUDIO MARIGO

Sicurezza sul Lavoro, Direttive ATEX, Direttiva Macchine
Safety at Work, ATEX Directive, Machinery Directive

Ing. Marzio Marigo

Via dei Molini, 3/C
33170 Pordenone (PN)

Tel 0434 241679

Fax 0434 248384

Email: marzio.marigo@studiomarigo.it

Website: www.studiomarigo.it

Blog: marziomarigo.postilla.it