

ASPETTI ECONOMICI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare



- Il costo del kWh prodotto in una centrale elettrica - di qualunque tipo - deriva dalla somma di diverse componenti:
 - il costo di costruzione dell'**impianto** (che dipende dal tipo di impianto e dal costo del denaro)
 - il costo del **combustibile** utilizzato nell'impianto (che dipende dal tipo di impianto e dalle condizioni del mercato delle fonti energetiche)
 - il costo di **esercizio e manutenzione** dell'impianto (che dipende dal tipo di impianto)
 - il costo delle **emissioni** di CO₂ ("carbon tax") (attualmente pari a circa 20 euro / t CO₂)
- La componente dovuta al costo di impianto si calcola - per tutti i tipi di impianto - dividendo il costo di costruzione (capitale più interessi passivi) per il numero di kWh che la centrale produrrà nel corso della sua vita utile (applicando i classici fattori di attualizzazione).

ASPETTI ECONOMICI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare

- Le diverse fonti di produzione elettrica differiscono notevolmente per la struttura del costo del kWh:

- fonti **fossili** (petrolio, gas, carbone):

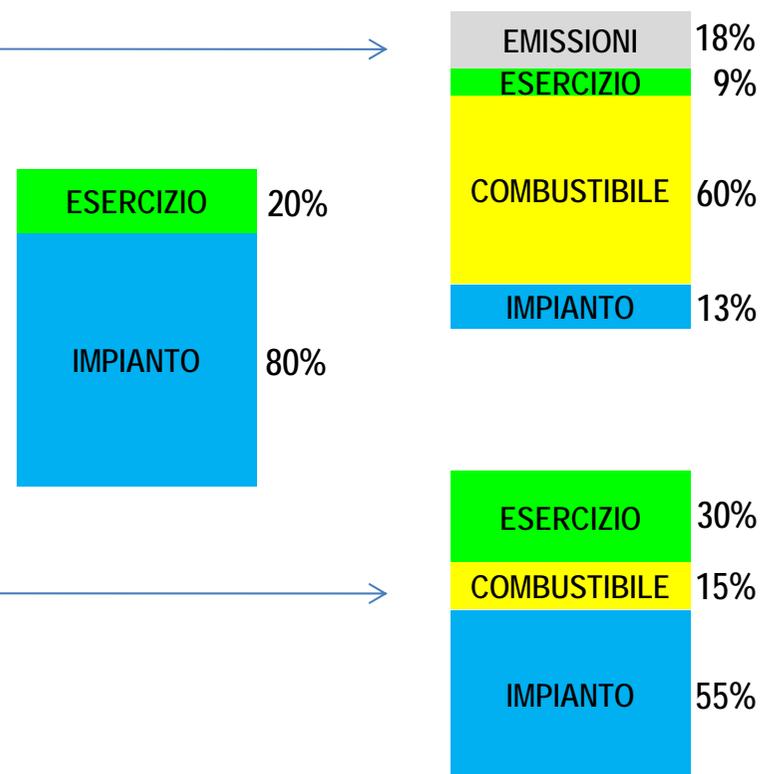
- basso costo di impianto
- alto costo del combustibile
- costo dovuto alle emissioni di CO₂

- fonte **eolica**:

- alto costo di impianto
- costo nullo del combustibile
- costo nullo delle emissioni di CO₂

- fonte **nucleare**:

- alto costo di impianto
- basso costo del combustibile
- costo nullo delle emissioni di CO₂



- In Italia, dove le fonti energetiche sono tutte di importazione, conviene usare le fonti che hanno un **basso costo del combustibile** (esborso verso l'estero), **anche se hanno un alto costo di impianto e di esercizio** (investimenti e spese che rimangono in sede nazionale).

ASPETTI ECONOMICI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare

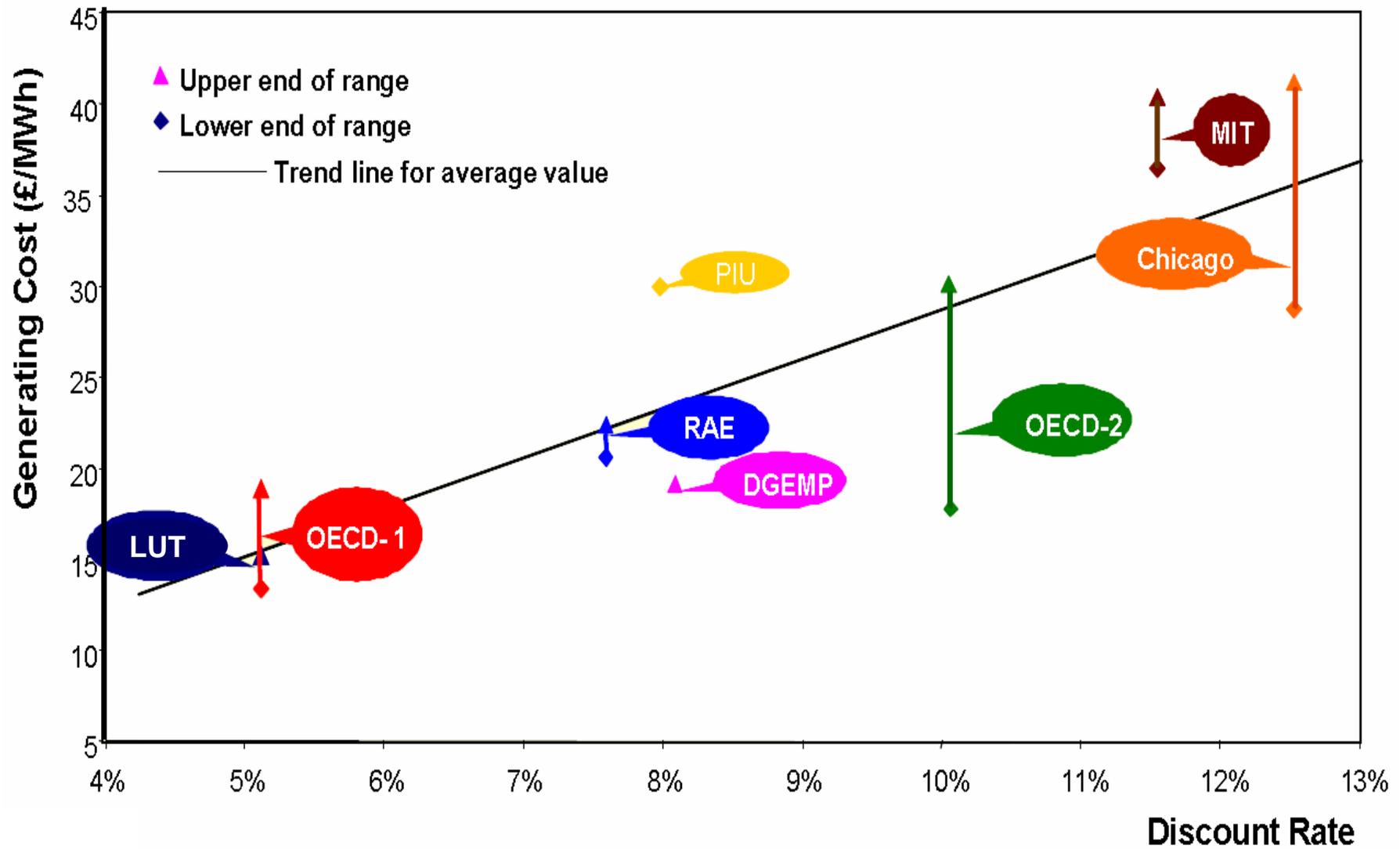
- Il costo di produzione del kWh di fonte nucleare è stato valutato nell'ultimo decennio nei seguenti studi:
 - 1) 1997: Studio condotto dall'industria elettrica europea (UNIPEDA)
 - 2) 1999: Studio svolto da Siemens, oggi Framatome ANP (Germania)
 - 3) 2000: Studio dell'Institute for Public Policy, Rice University (USA)
 - 4) 2000: Studio della Lappeenranta University of Technology (Finlandia, aggiornato nel 2003)
 - 5) 2002: Studio della UK PIU, Performance and Innovation Unit (Regno Unito)
 - 6) 2002: Studio svolto da Scully Capital (USA)
 - 7) 2003: Studio della LUT, Lappeenranta University of Technology (Finlandia)
 - 8) 2003: Studio della DGEMP, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières (Francia)
 - 9) 2003: Studio del MIT, Massachusetts Institute of Technology (USA)
 - 10) 2004: Studio della RAE, Royal Academy of Engineers (Regno Unito)
 - 11) 2004: Studio della University of Chicago, finanziato dall'US-DOE (USA)
 - 12) 2004: Studio del CERl, Canadian Energy Research Institute (Canada)
 - 13) 2005: Studio congiunto OCSE-NEA / ONU-IAEA
 - 14) 2005: Business Case for Early Orders of New Nuclear Reactors, OXERA
 - 15) 2006: Studio OCSE-NEA
 - 16) 2007: Studio della Commissione Europea
 - 17) 2007: Studio del World Energy Council

- Tutti gli studi mostrano che l'energia nucleare è competitiva rispetto alle altre fonti di produzione elettrica.

- Gli studi evidenziati in colore sono considerati nella slide successiva.

ASPETTI ECONOMICI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare



ASPETTI ECONOMICI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare

- Lo studio [OCSE 2006](#) è uno studio comparativo su nucleare, carbone e gas che fa riferimento alle condizioni locali in una quindicina di paesi ai prezzi dei combustibili 2004 (petrolio a 30 \$/b).
- Considerando le tre componenti di costo (impianto, esercizio e manutenzione, combustibile) si ricavano i seguenti costi del kWh:

- Al tasso di sconto del [5%](#)

(condizione più favorevole al nucleare):

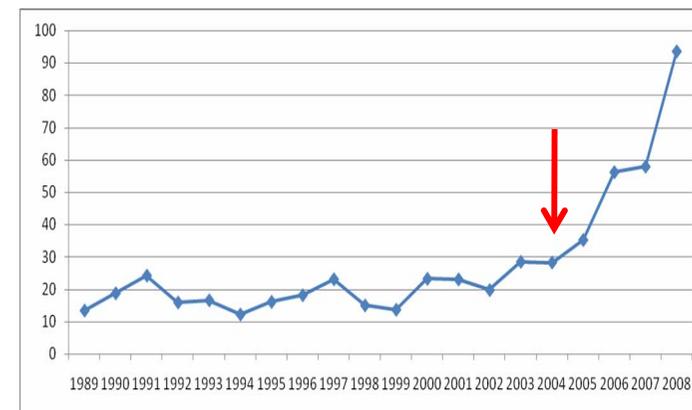
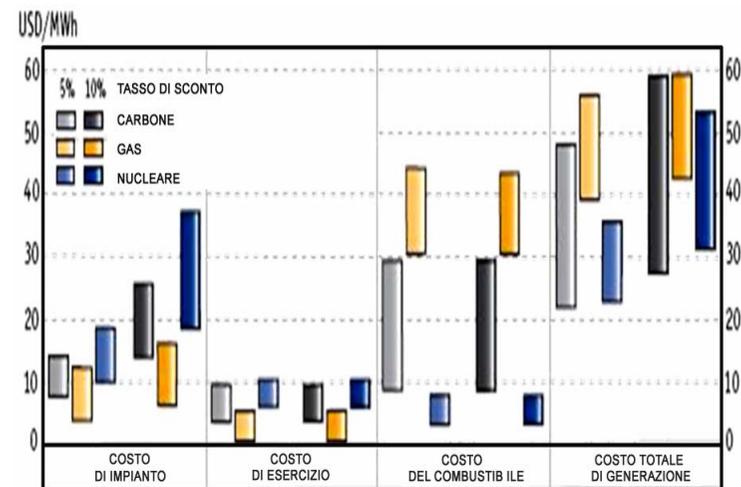
nucleare:	2,3 - 3,6	c\$/kWh
carbone:	2,2 - 4,8	"
gas (ciclo combinato):	3,9 - 5,7	"

- Al tasso di sconto del [10%](#)

(condizione meno favorevole al nucleare):

nucleare:	3,1 - 5,4	c\$/kWh
carbone:	2,7 - 5,9	"
gas (ciclo combinato):	4,3 - 6,0	"

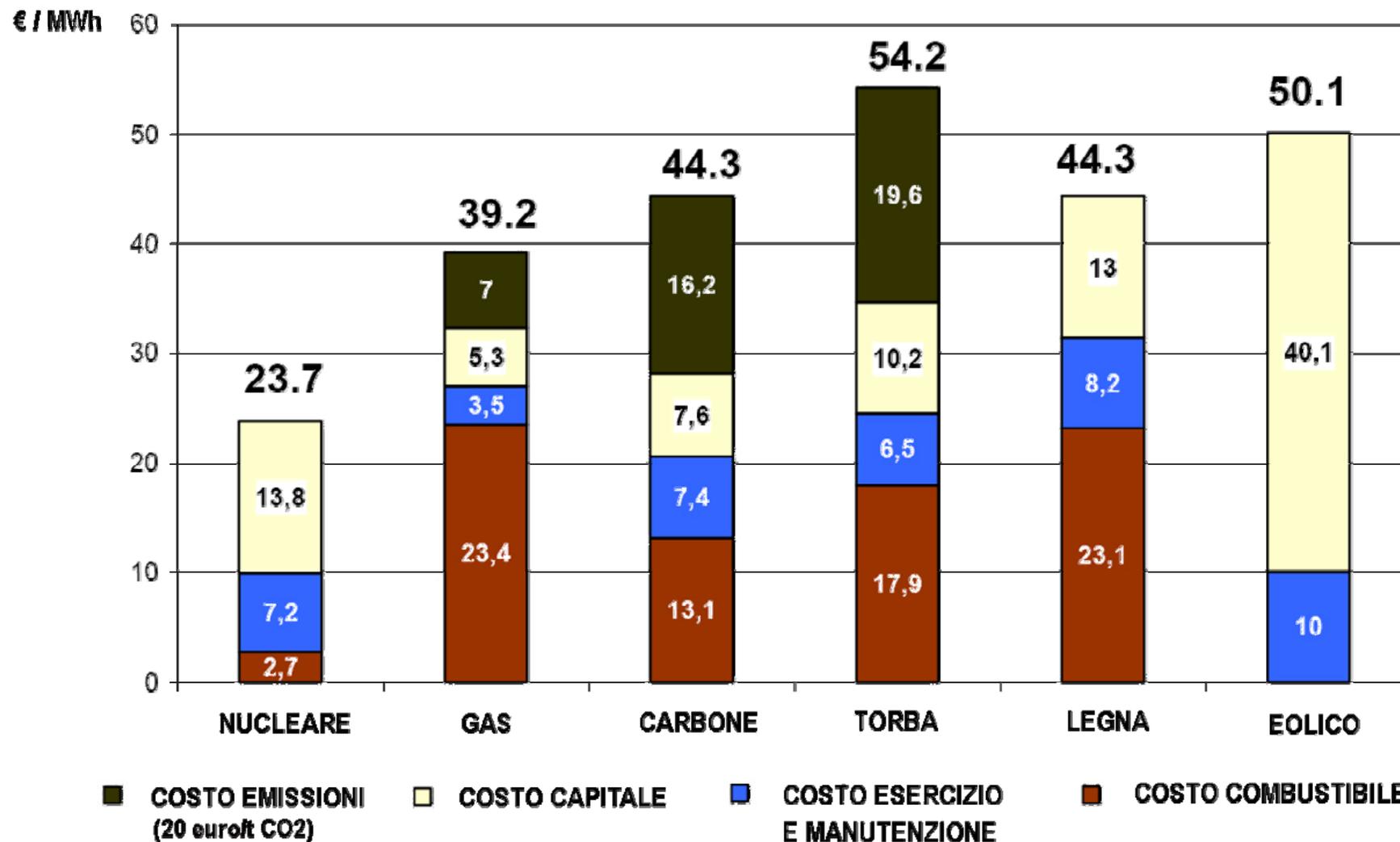
- La competitività del nucleare si accentua notevolmente se si considerano il [costo delle emissioni](#) (20 €/tCO₂) e gli [aumenti del costo dei combustibili](#) intervenuti dal 2004 ad oggi.



ASPETTI ECONOMICI

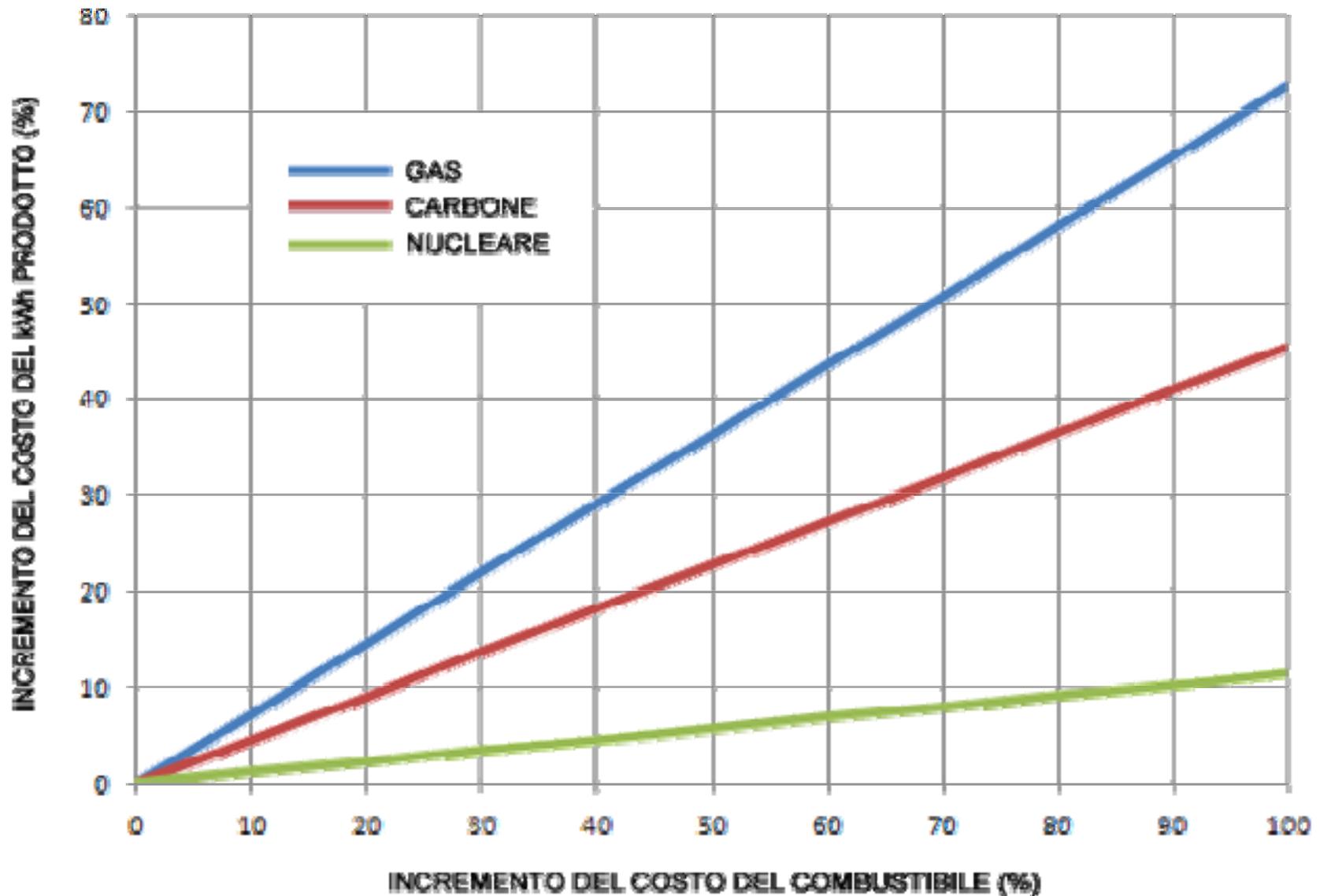
Caratteristiche economiche dell'energia nucleare

- Studio LUT2000 successivamente aggiornato con dati 2003.



ASPETTI ECONOMICI

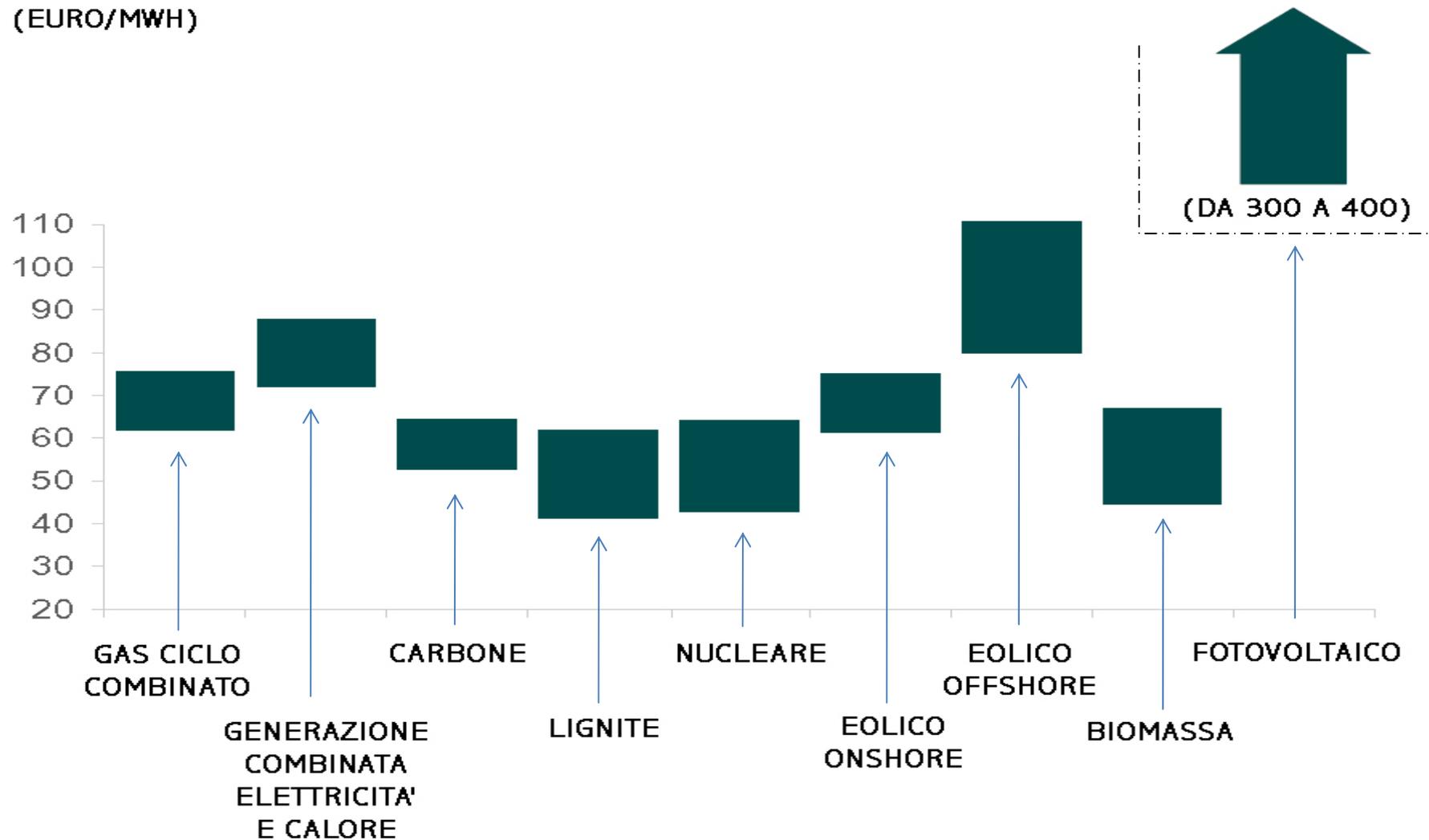
Caratteristiche economiche dell'energia nucleare



ASPETTI ECONOMICI

Stima dei costi di generazione elettrica "all-in" per tecnologia di produzione

(EURO/MWH)

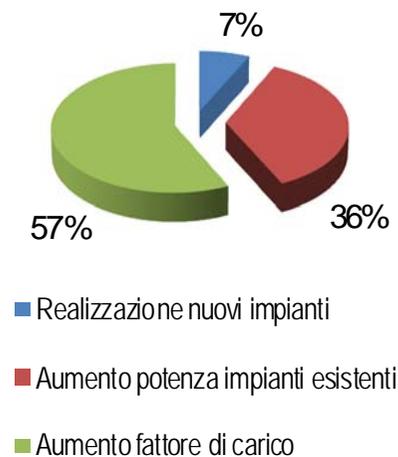
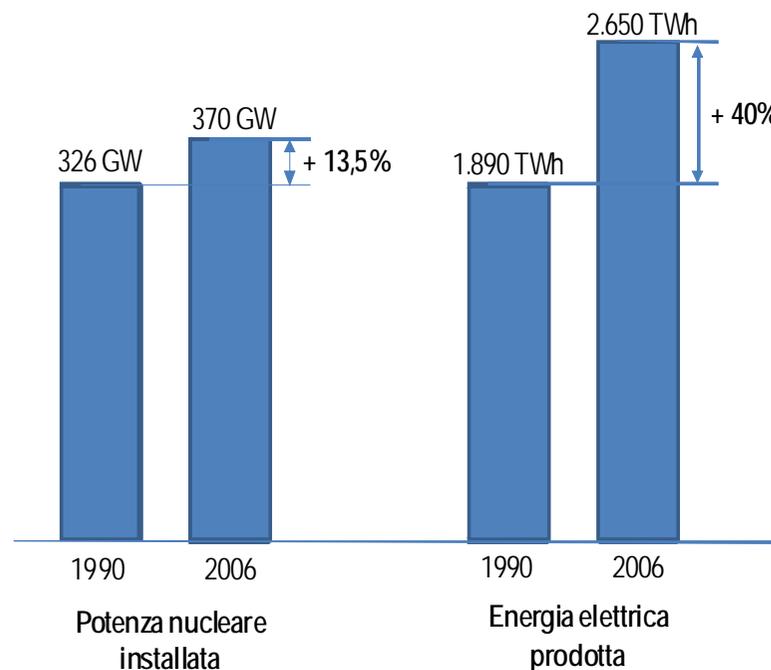


Fonte: ABN AMRO, Platt's, 2006

ASPETTI ECONOMICI

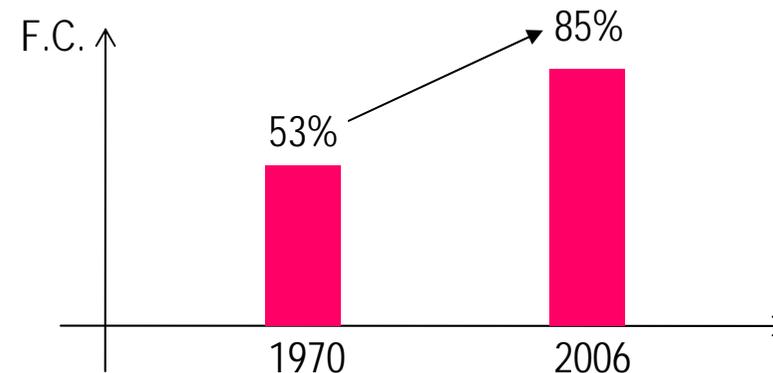
Aumento dell'efficienza degli impianti nucleari

- Grazie all'aumento della efficienza degli impianti, negli ultimi decenni la produzione di energia nucleare è aumentata più del numero e della potenza complessiva degli impianti in esercizio.



- Nel periodo 1970-2006 il fattore di carico degli impianti nucleari è passato dal 53% all'85% (media mondiale).

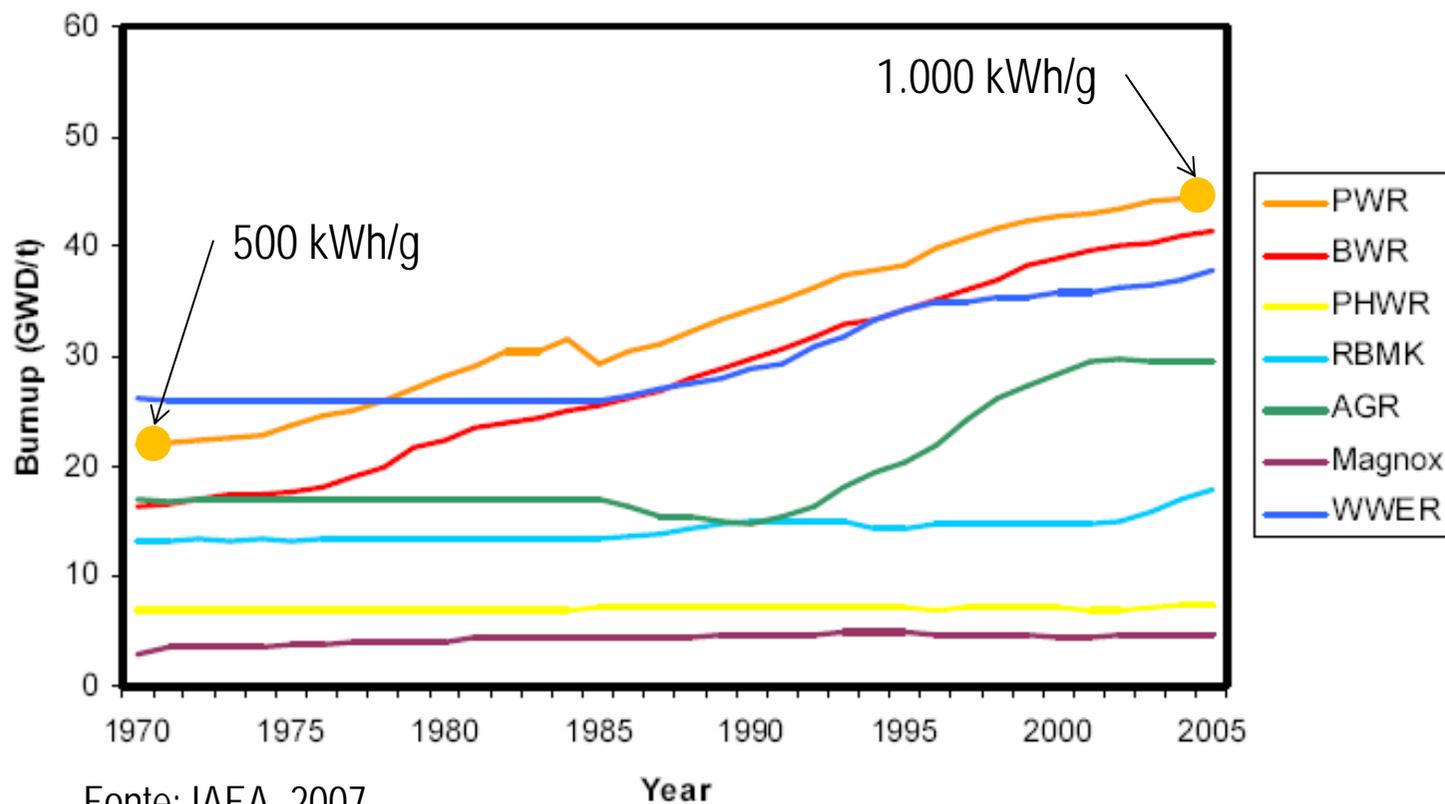
$$\text{F.C.} = \frac{\text{numero ore di funzionamento in un anno}}{\text{numero di ore in un anno}}$$



ASPETTI ECONOMICI

Miglioramenti nello sfruttamento del combustibile

- La produzione di energia elettrica per unità di massa del combustibile utilizzato è passata da 500 kWh/g nel 1970 a 1.000 kWh/g nel 2005, con i seguenti benefici:
 - aumento dell'efficienza energetica degli impianti
 - migliore sfruttamento delle risorse di combustibile (uranio) esistenti
 - periodi di funzionamento più prolungati fra una ricarica e l'altra (aumento del fattore di utilizzazione degli impianti)



ASPETTI ECONOMICI

Situazione delle risorse uranifere

■ Fabbisogno mondiale di uranio nel 2006 (IAEA 2007):			
■ fabbisogno totale:	66.529	t	
■ fabbisogno soddisfatto con nuove risorse:	39.655	t	
■ fabbisogno soddisfatto con materiali in giacenza:	26.874	t	
■ Risorse minerarie esistenti ("Red Book" IAEA-NEA 2006):			
■ prezzo corrente di mercato dell'uranio:	120	\$/kg	
■ uranio estraibile a costi non superiori a 130 \$/kg:	4,7	Mt	(A)
■ uranio estraibile a costi superiori a 130 \$/kg:	9,7	Mt	(B)
■ Altre risorse esistenti (CISAC 2005):			(C)
■ uranio depleto in giacenza:	1,2	Mt	
■ uranio ad alto arricchimento in giacenza (trattati disarmo):	1.842	t	
■ plutonio ad alto arricchimento in giacenza (trattati disarmo):	248	t	
■ plutonio civile ad alto arricchimento in giacenza:	249	t	
■ Durata al tasso attuale di utilizzazione:			
■ solo risorse minerarie A:	70	anni	
■ risorse minerarie A + B:	220	anni	
■ risorse A + B + C (combustibile MOX):	240	anni	
■ risorse minerarie A + B + C (U238, reattori veloci):	14.000	anni	

ASPETTI AMBIENTALI

Impatto ambientale degli impianti nucleari

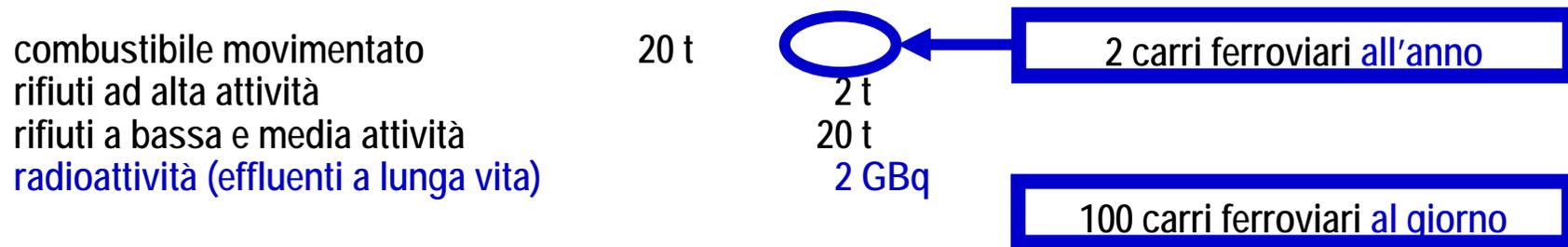
- Un impianto nucleare scarica nell'ambiente **deboli tracce di radioattività**, contenuta negli effluenti liquidi e gassosi, **in quantità notevolmente inferiore alla radioattività ambientale**.
- Tra le prescrizioni di esercizio dell'impianto emanate dall'Autorità di controllo è inclusa la cosiddetta **"formula di scarico"**, che stabilisce i quantitativi massimi di radionuclidi che possono essere immessi nell'ambiente su base giornaliera, mensile e annuale.
- I quantitativi autorizzati sono determinati sulla base **dell'analisi di rischio radiologico**, tenendo conto della ricettività ambientale e di tutte le possibili vie di propagazione all'uomo.
- In caso di **piena utilizzazione della formula di scarico** le dosi derivanti alla popolazione residente nell'area circostante l'impianto sono **ampiamente trascurabili** (qualche milionesimo) rispetto alle dosi comunemente ricevute dalla radioattività ambientale.
- La radioattività **effettivamente emessa** da un impianto nucleare è usualmente pari a **qualche percento** dei quantitativi autorizzati con la formula di scarico.
- La radioattività scaricata da un impianto nucleare (facilmente misurabile) è controllata attraverso una **rete di monitoraggio radiologico** che si estende per chilometri intorno all'impianto.
- **Dal normale funzionamento di un impianto nucleare non può derivare alcun danno all'uomo e all'ambiente.**

ASPETTI AMBIENTALI

Impatto ambientale degli impianti nucleari

- Il problema dei **rifiuti radioattivi** si pone per **quantitativi molto limitati**, inferiori di molti ordini di grandezza ai quantitativi di rifiuti tossico-nocivi prodotti nelle centrali termoelettriche convenzionali e più in generale nelle attività industriali comunemente accettate.

- Centrale **nucleare** da 1.000 MWe:



- Centrale **termoelettrica** (gas, olio, carbone) da 1.000 MWe:

combustibile movimentato	da	1	a	2	Mt
CO ₂	da	4	a	7	Mt
CO	da	600	a	2.000	t
ossidi di zolfo	da	4.500	a	120.000	t
ossidi di azoto	da	4.000	a	27.000	t
particolati in atmosfera	da	1.500	a	5.000	t
ceneri	da	25.000	a	100.000	t
metalli pesanti nelle ceneri	da	1	a	400	t
radioattività (a lunga vita)	da	1	a	50	GBq

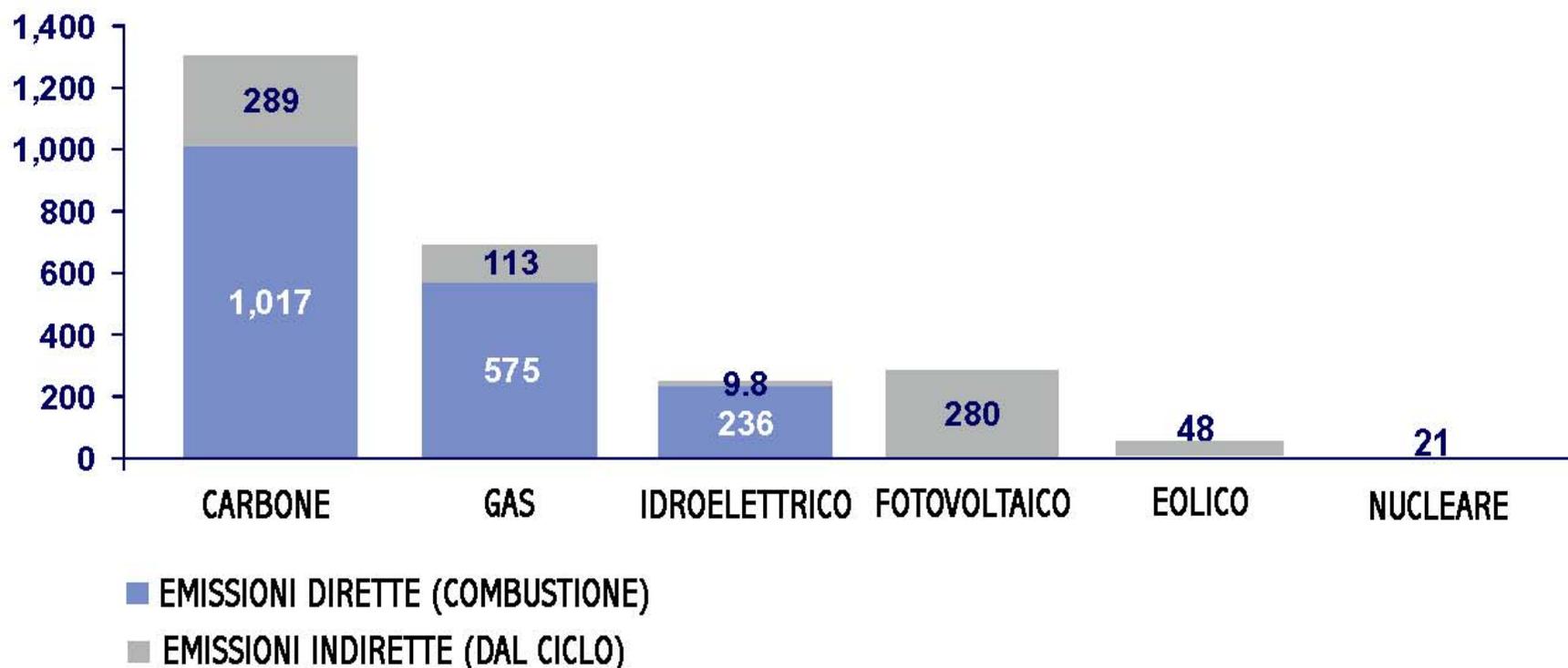
ASPETTI AMBIENTALI

Impatto ambientale degli impianti nucleari

- Gli impianti nucleari hanno il grande vantaggio di non emettere gas-serra.

EMISSIONI DI GAS SERRA NELLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

g CO₂ eq. / kWh



Fonte: IEA, 2002

ASPETTI AMBIENTALI

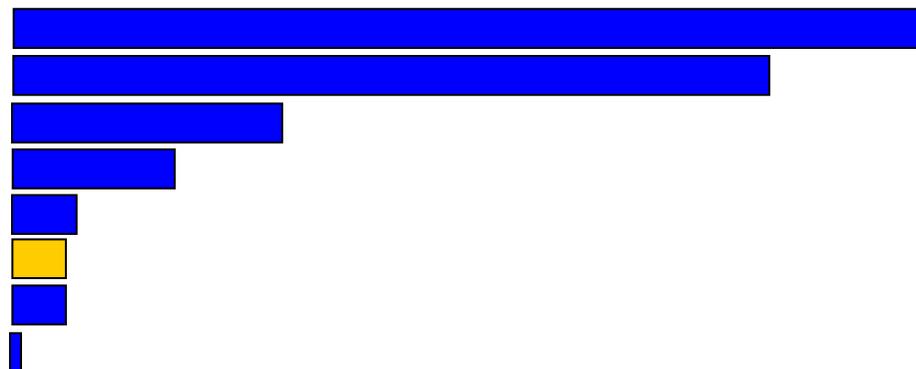
Impatto ambientale degli impianti nucleari

■ Progetto europeo EXTERNE:

- valutazione dei "costi esterni" associati all'uso delle diverse tecnologie di produzione elettrica
- i costi esterni ("externalities") sono la monetizzazione degli impatti sulla salute, sull'ambiente e sulle attività economiche, inclusi gli effetti di possibili incidenti, tenendo conto di tutto il ciclo produttivo.

■ Risultati (valori medi dei costi esterni valutati in 15 paesi europei):

■ carbone	8,5 c € / kWh
■ olio combustibile	7,0
■ gas	2,5
■ biomassa	1,5
■ fotovoltaico	0,6
■ nucleare	0,5
■ idroelettrico	0,5
■ eolico	0,1



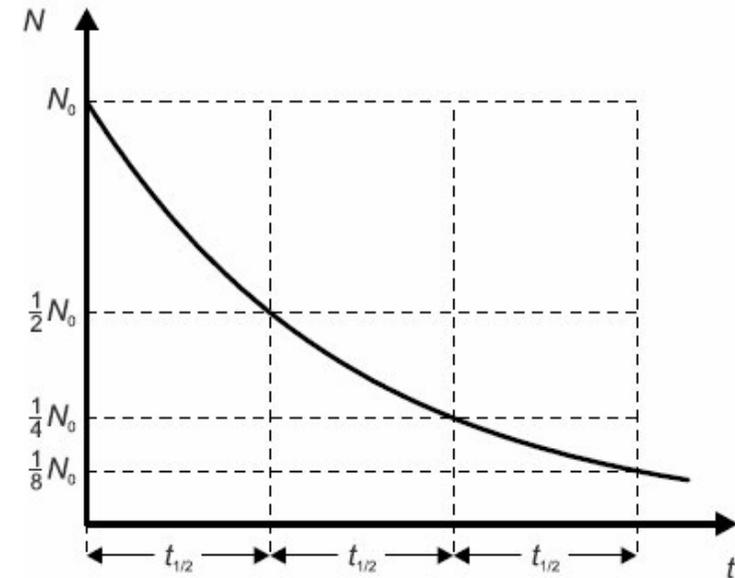
■ Nel 2006 il nucleare

- ha prodotto nel mondo circa **2.660 miliardi di kWh**, che altrimenti - per ragioni economiche - sarebbero stati prodotti utilizzando carbone;
- ha quindi evitato l'immissione in atmosfera di **2 miliardi di tonnellate di CO₂**, realizzando in un solo anno l'equivalente di **due Protocolli di Kyoto**.

ASPETTI AMBIENTALI

Gestione dei materiali radioattivi

- La radioattività dei materiali **si riduce** naturalmente nel tempo fino ad **annullarsi**.
- “Smaltimento” significa **separazione** dalla biosfera per il **tempo necessario** al decadimento naturale.
- Materiali radioattivi prodotti in un impianto nucleare e tecniche di smaltimento (confinamento per il tempo di decadimento necessario):
 - **combustibile nucleare irraggiato**
ritrattamento e riciclo oppure stoccaggio a secco
 - **materiali a bassa e media attività:**
deposito controllato (300 anni)
l'isolamento del materiale è affidato a costruzioni ingegneristiche
 - **materiali ad alta attività:**
deposito geologico (migliaia di anni)
l'isolamento del materiale è affidato a barriere geologiche naturali



ASPETTI AMBIENTALI

Gestione dei materiali radioattivi

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



Forsmark (Svezia)



Oskarshamn (Svezia)



Gorleben (Germania)



Konrad (Germania)



Morsleben (Germania)



El Cabril (Spagna)



L'Aube (Francia)



La Manche (Francia)