

L'ENERGIA NUCLEARE : EVOLUZIONE E PROSPETTIVE

Bruno Panella

(Politecnico di Torino- Dipartimento di Energetica)

Il contesto energetico

I principi fisici e le potenzialità del nucleare

Panorama della situazione attuale

Nuove linee di sviluppo : esempi di nuovi concetti di reattori e cicli del combustibile avanzati

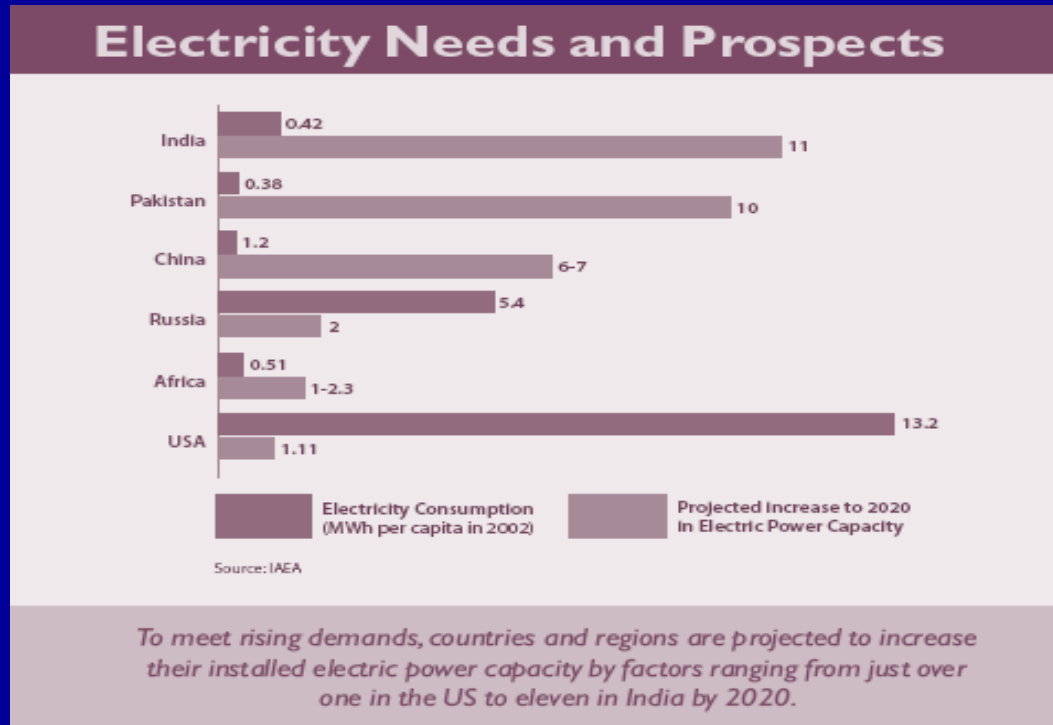
Conclusioni

Il contesto energetico internazionale



Domanda di energia elettrica

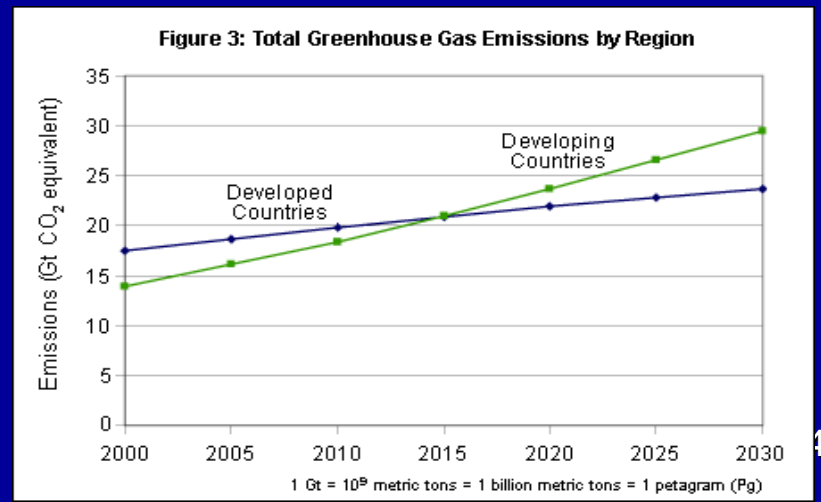
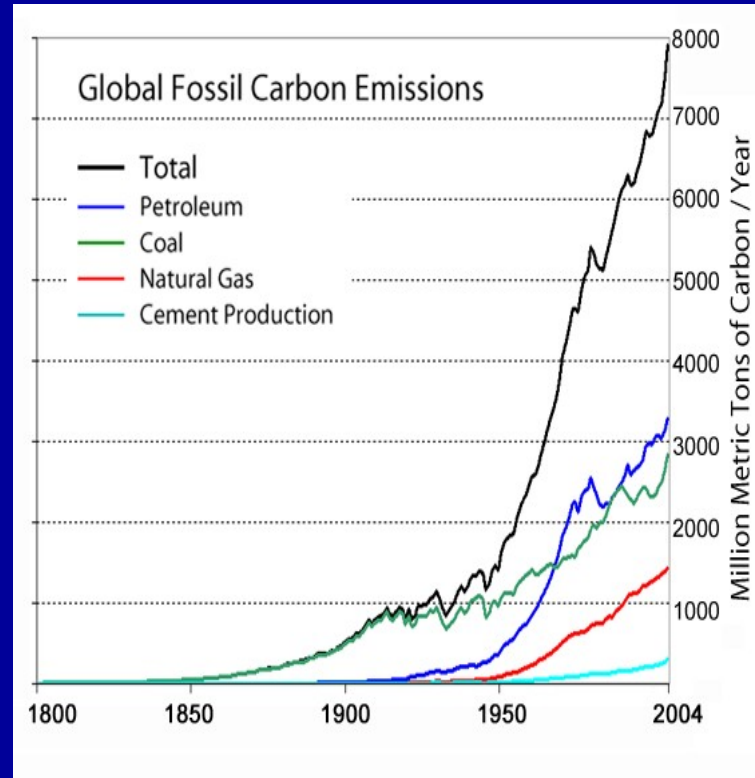
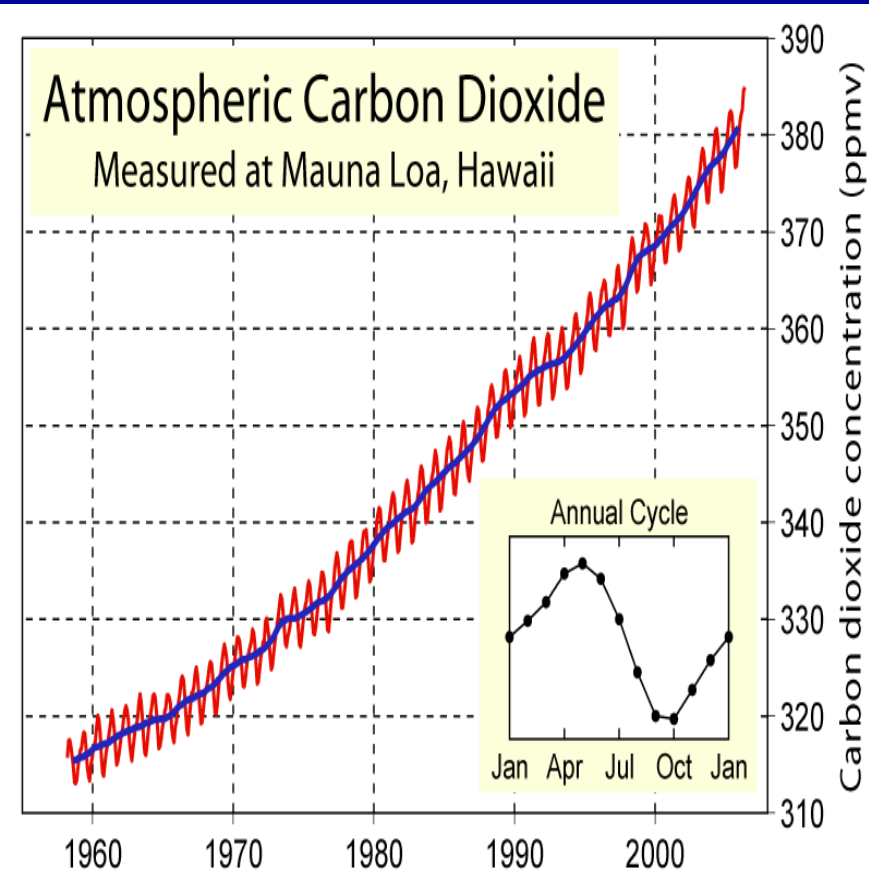
1.6 miliardi di persone non hanno elettricità



kWh/capite (2005)

USA	13640
China	1781
India	480

Emissioni di CO₂

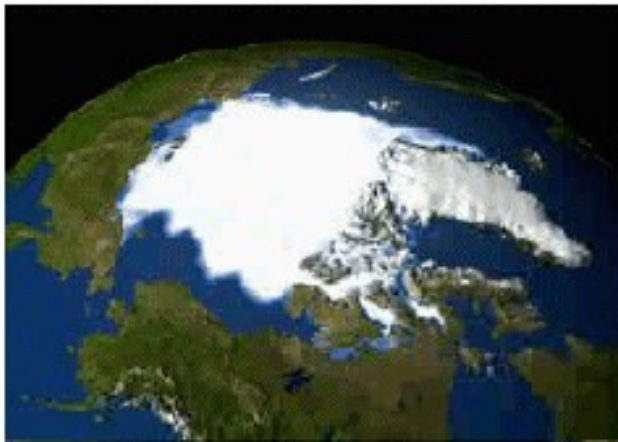


Il cambiamento climatico

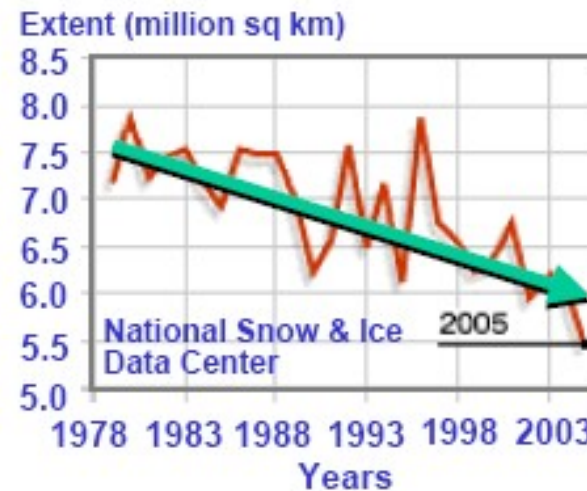


Arctic Ice Is Melting !

- Rate of shrinkage of the area covered by ice = 8% per decade (September trend)
- At this rate there may be no ice at all during the summer of 2060 !

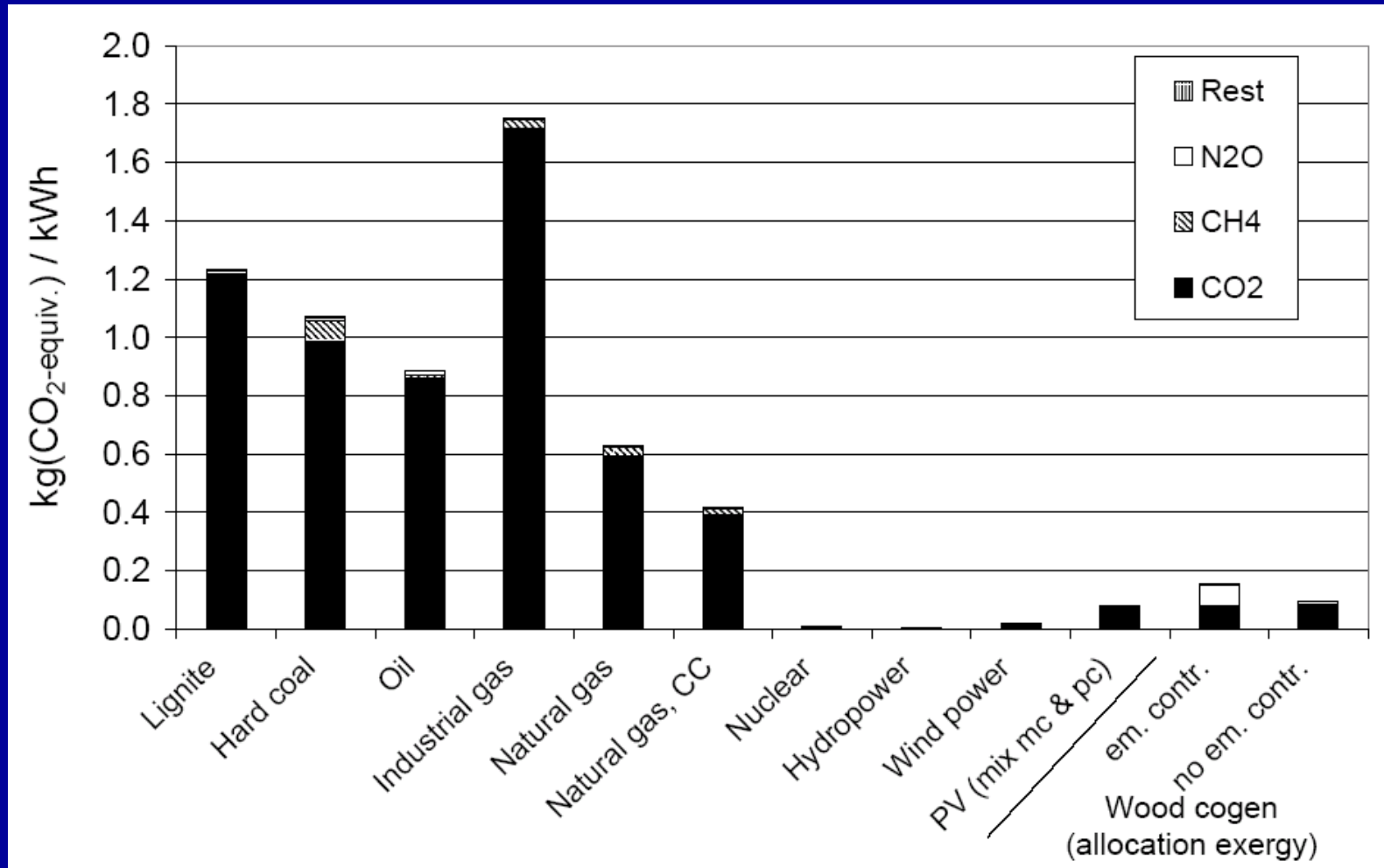


NASA



2

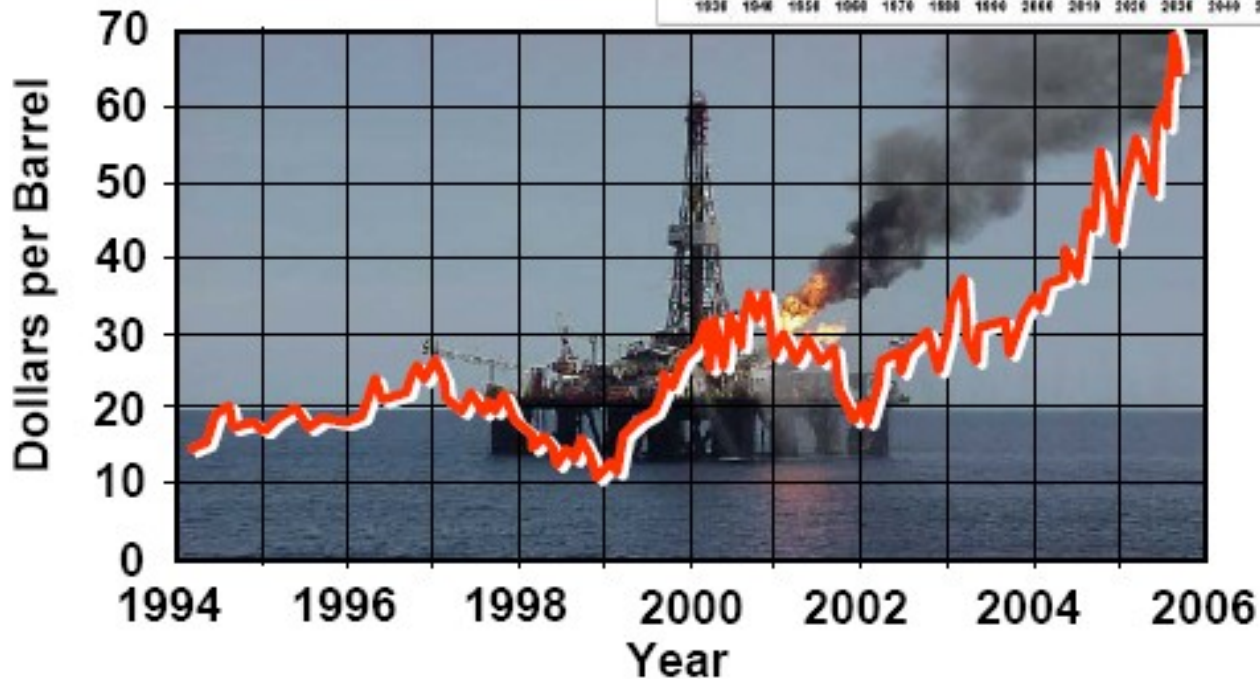
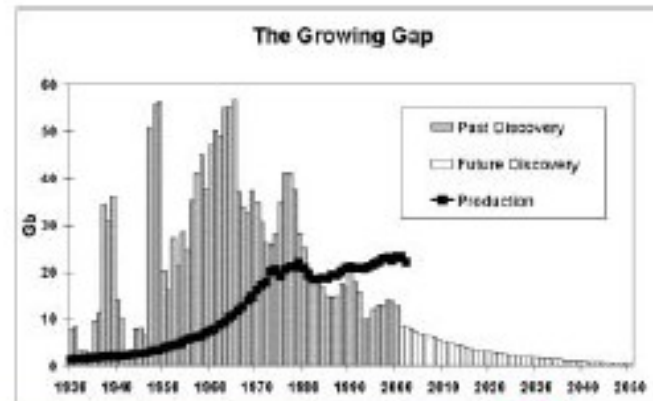
Emissioni di CO₂ – Confronto tra le fonti



Il costo dell'energia

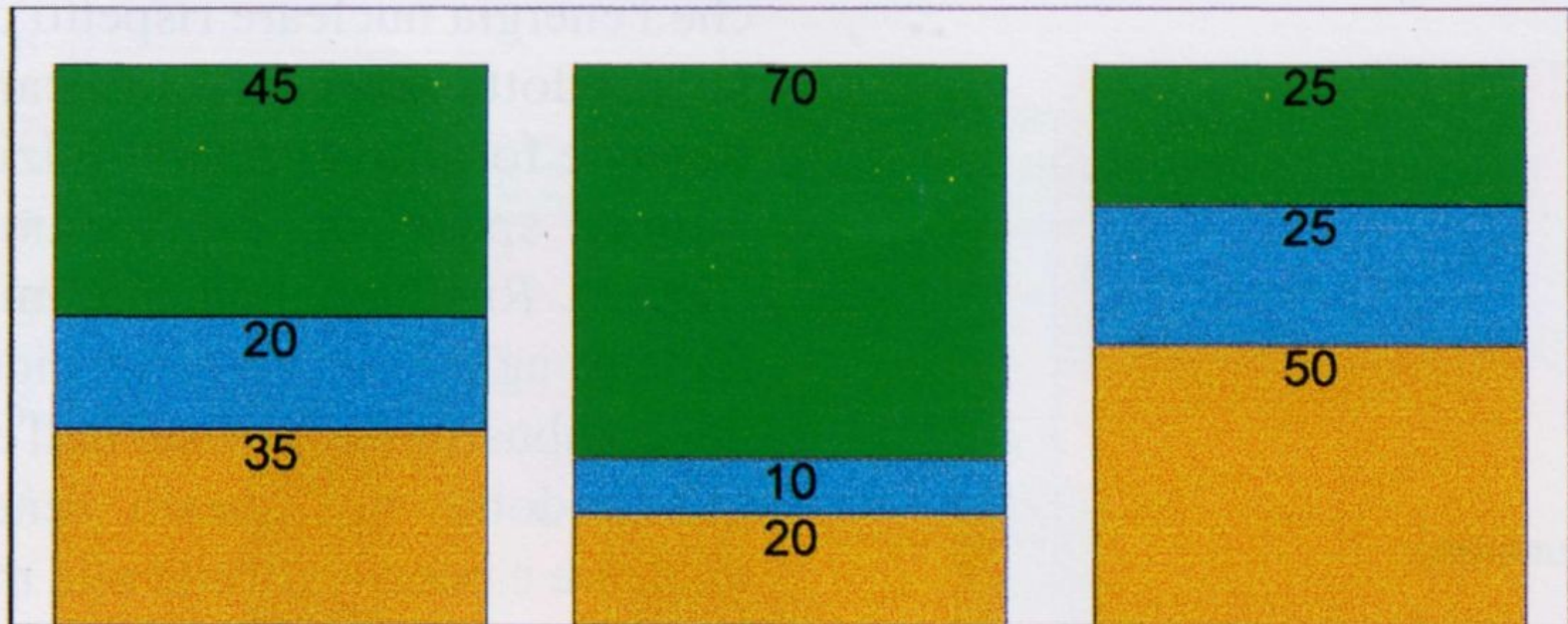


Rise of Oil Prices



Il costo dell'energia- confronto

COMPOSIZIONE DEL COSTO DEL kWh (%)



carbone

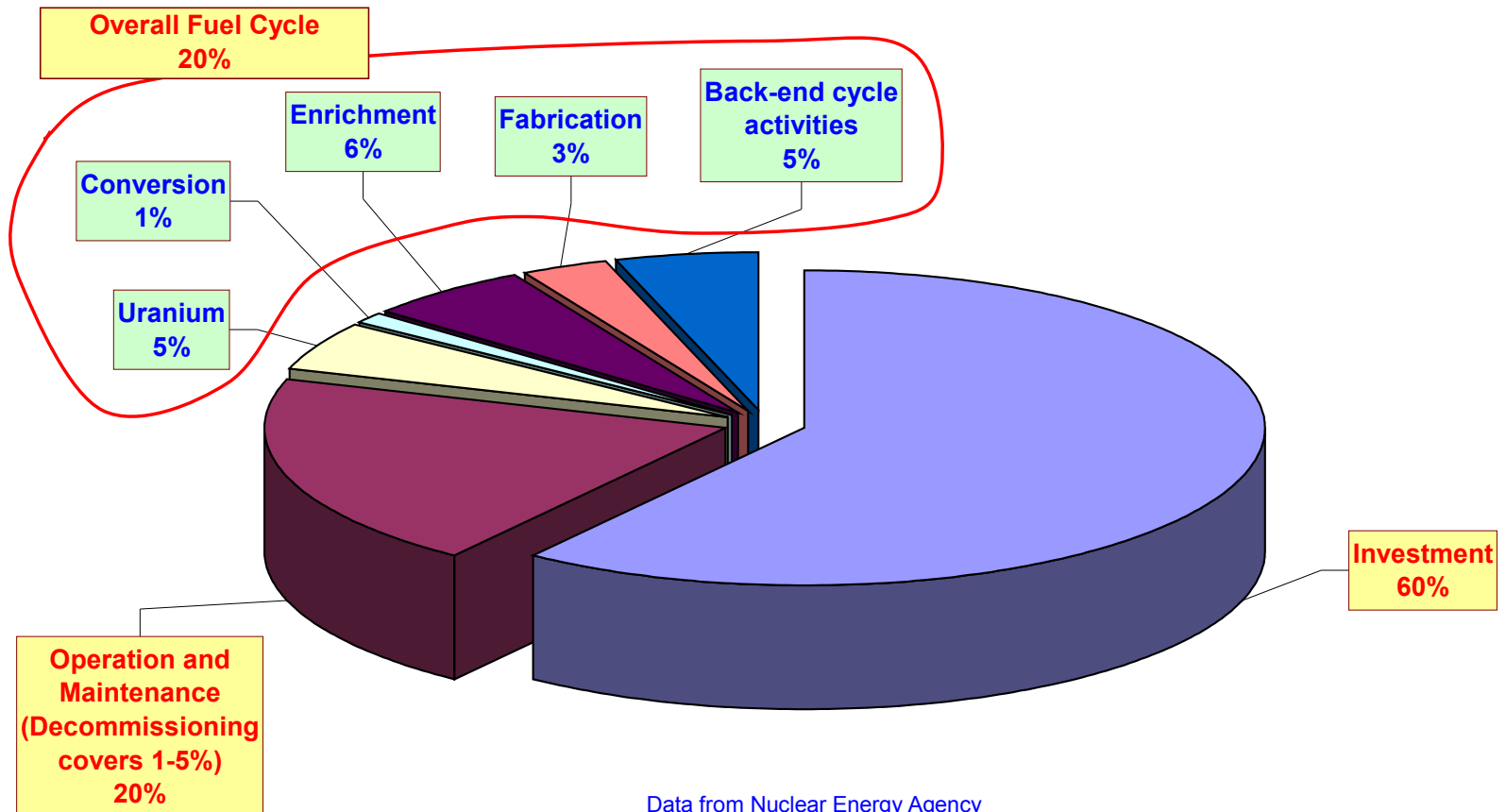
gas

nucleare

- Costi del ciclo del combustibile
- Costi di esercizio e manutenzione
- Costi di investimento

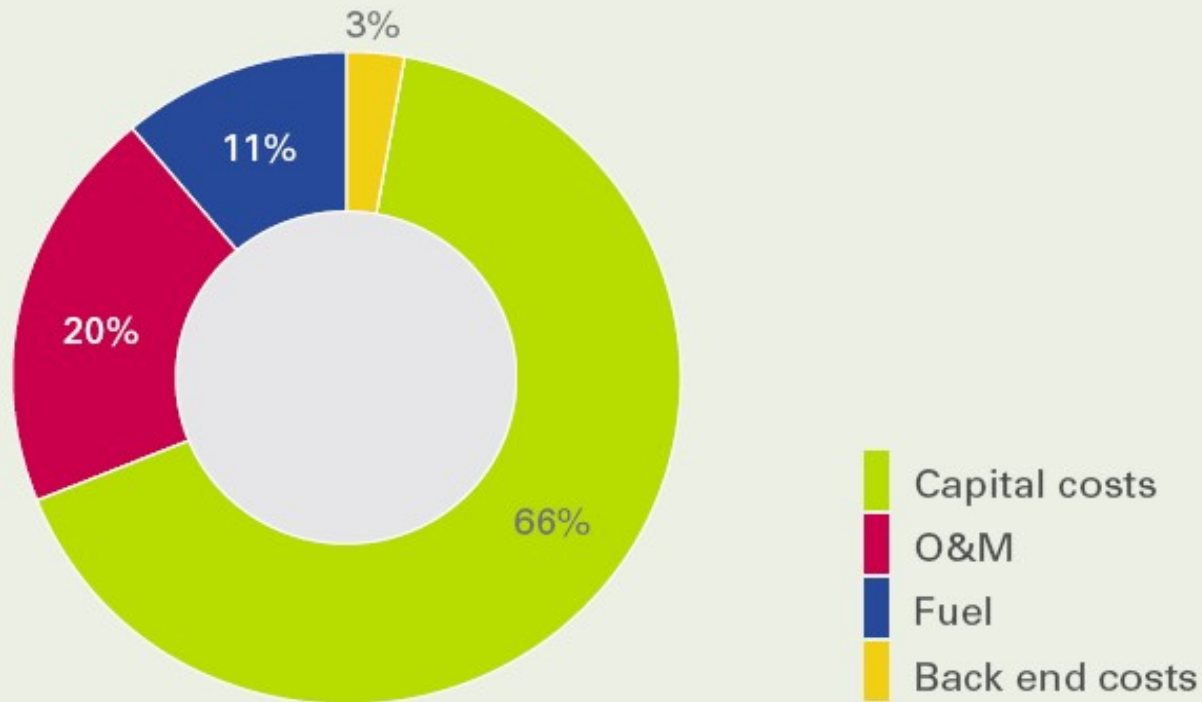
Il costo dell'energia nucleare

Contributions to the Nuclear kWh Cost



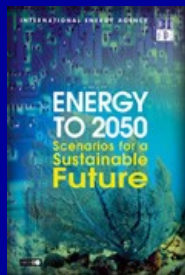
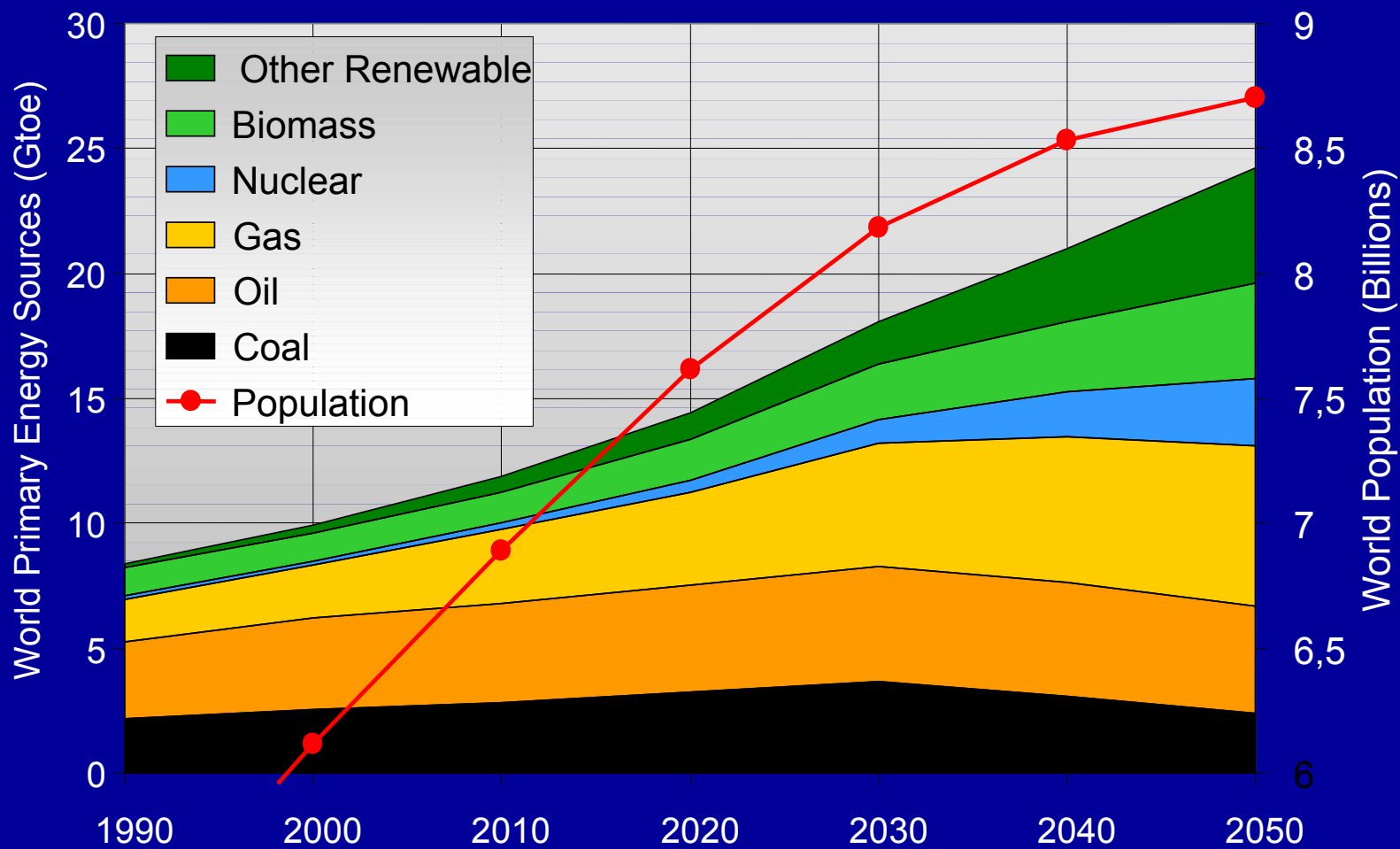
Data from Nuclear Energy Agency
(<http://www.nea.fr/html/pub/nuclearenergytoday/welcome.html>)

Il costo dell'energia nucleare



Source: DTI, 2006.

Domanda di energia e sviluppo demografico- Previsione



I principi fisici e le potenzialità del nucleare

Alcune importanti scoperte

1896: Radioattività (Becquerel)

1905: Relatività Speciale (Einstein)

1913: Modello atomico (Bohr)

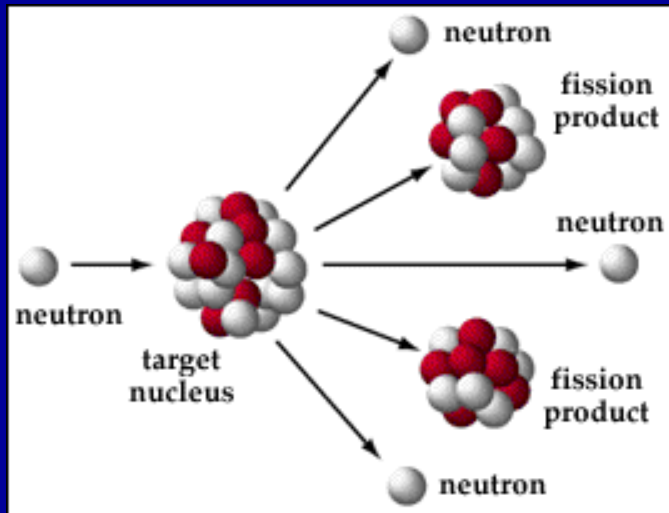
1932: Neutrone (Chadwick)

1938: Fissione nucleare (Hahn and Strassmann)

Fissione e reazione a catena

La fissione è una reazione nucleare, non chimica, che coinvolge i nuclei dell' atomo, che, colpiti da neutroni, si spaccano in due frammenti più leggeri, emettendo 2 o 3 neutroni

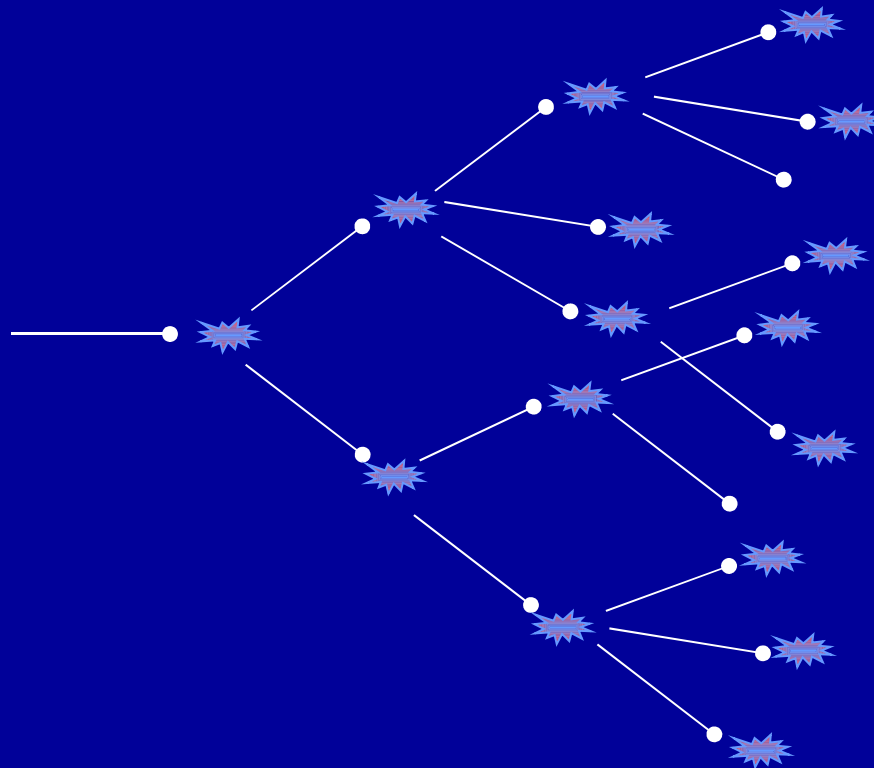
I principi fisici e le potenzialità del nucleare



$$E = \Delta m c^2$$

I principi fisici e le potenzialità del nucleare

Reazione a catena



I principi fisici e le potenzialità del nucleare

$$E = \Delta mc^2$$

La perdita di massa nella fissione di un nucleo fissile si traduce in energia

La fissione di 1 tonnellata di materiale fissile, in cui si fissionino tutti i nuclei, produce la stessa energia di circa 1 900 000 tonnellate di petrolio

I principi fisici e le potenzialità del nucleare

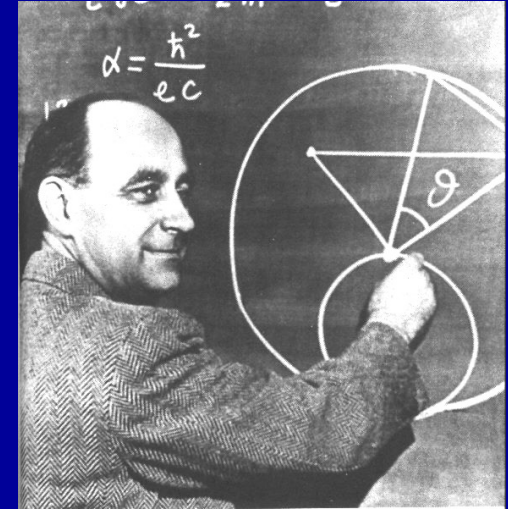
Enrico Fermi (1942)

Realizzata la prima reazione di fissione nucleare a catena, il primo reattore nucleare sperimentale

Enrico Fermi (1954)

“L’era atomica ha solo 12 anni di età e siamo soltanto all’inizio dei benefici che ci verranno dall’opera di centinaia di migliaia di scienziati e di lavoratori nel campo atomico.

Si ritiene che i depositi di uranio ora conosciuti ci potranno fornire energia sufficiente per parecchie migliaia di anni, energia che sarà a disposizione di tutti i popoli della terra perché l’atomo è internazionale, nessuna nazione detiene il monopolio dell’uranio, il monopolio della scienza atomica o il monopolio degli impianti atomici”



I principi fisici e le potenzialità del nucleare

$$E = \Delta mc^2$$

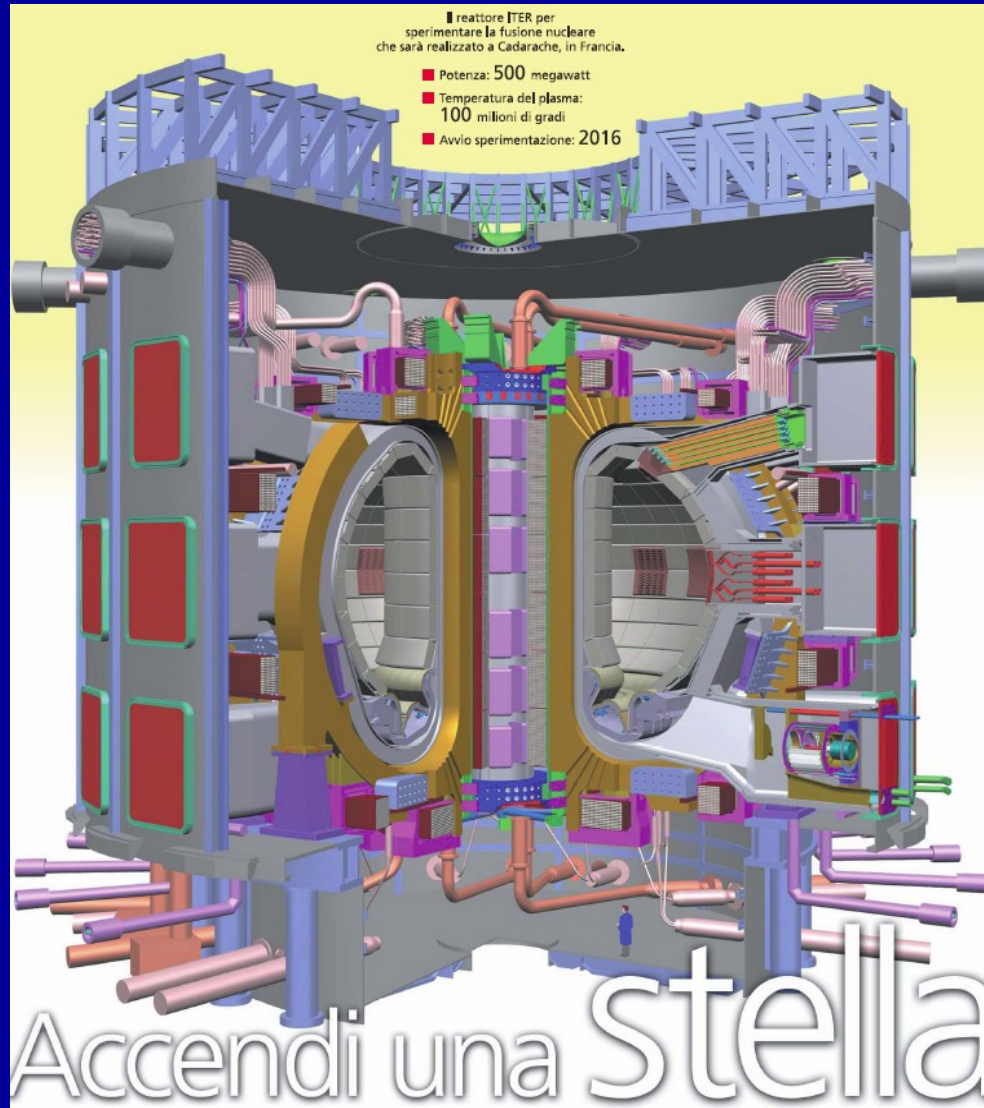
La perdita di massa nella fusione di due isotopi dell'idrogeno (deuterio e trizio) si traduce ugualmente in energia

Realizzate reazioni di fusione nucleare controllata ma a spese di una quantità di energia superiore a quella prodotta

Il reattore ITER, che sarà costruito nei prossimi 10 anni vicino ad Aix en Provence, dovrà dimostrare che si può ottenere in modo controllato energia netta da fusione

La fusione di 1 tonnellata di materiale, produce la stessa energia di circa 5 milioni di tonnellate di petrolio

I principi fisici e le potenzialità del nucleare



I principi fisici e le potenzialità del nucleare

(1955) Realizzato il primo impianto nucleare a fissione di potenza

Negli anni '60 e '70 lo sviluppo dell'energia nucleare (ordini di centrali) è stato *molto sostenuto* in una trentina di Paesi

In seguito *l'aumento* è stato *più contenuto* per una serie di motivi

La profezia di Fermi può ancora essere ritenuta attuale?

**Panorama della situazione attuale
ENERGIA NUCLEARE
IN SINTESI**

374 GW potenza elettrica installata

443 numero di reattori in funzione

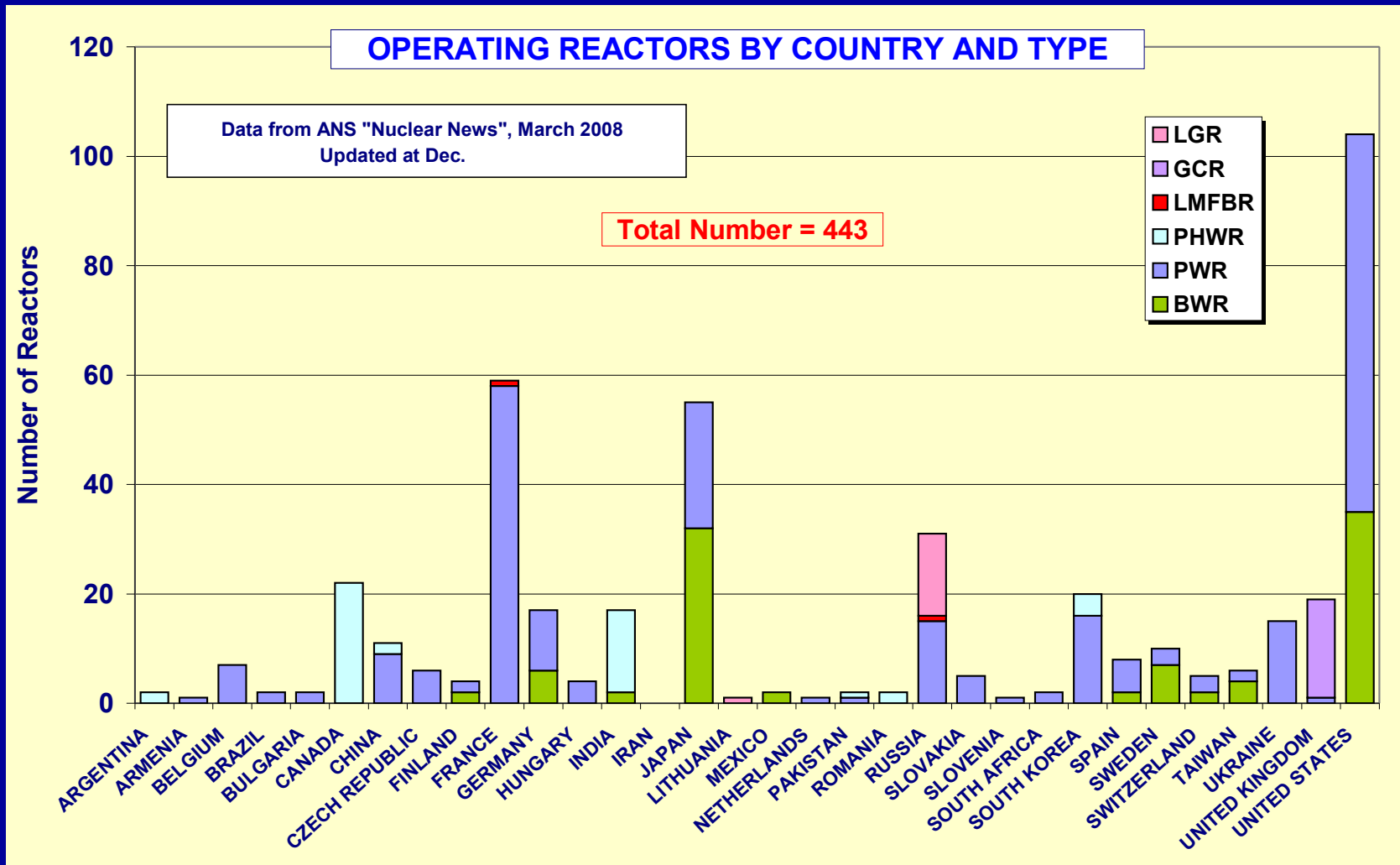
**2750 TWh energia prodotta annualmente
(~ 16 % di En.Elettrica ~6% di En.Primaria)**

13 000 anni-reattore esperienza operativa

I reattori in funzione per Paese

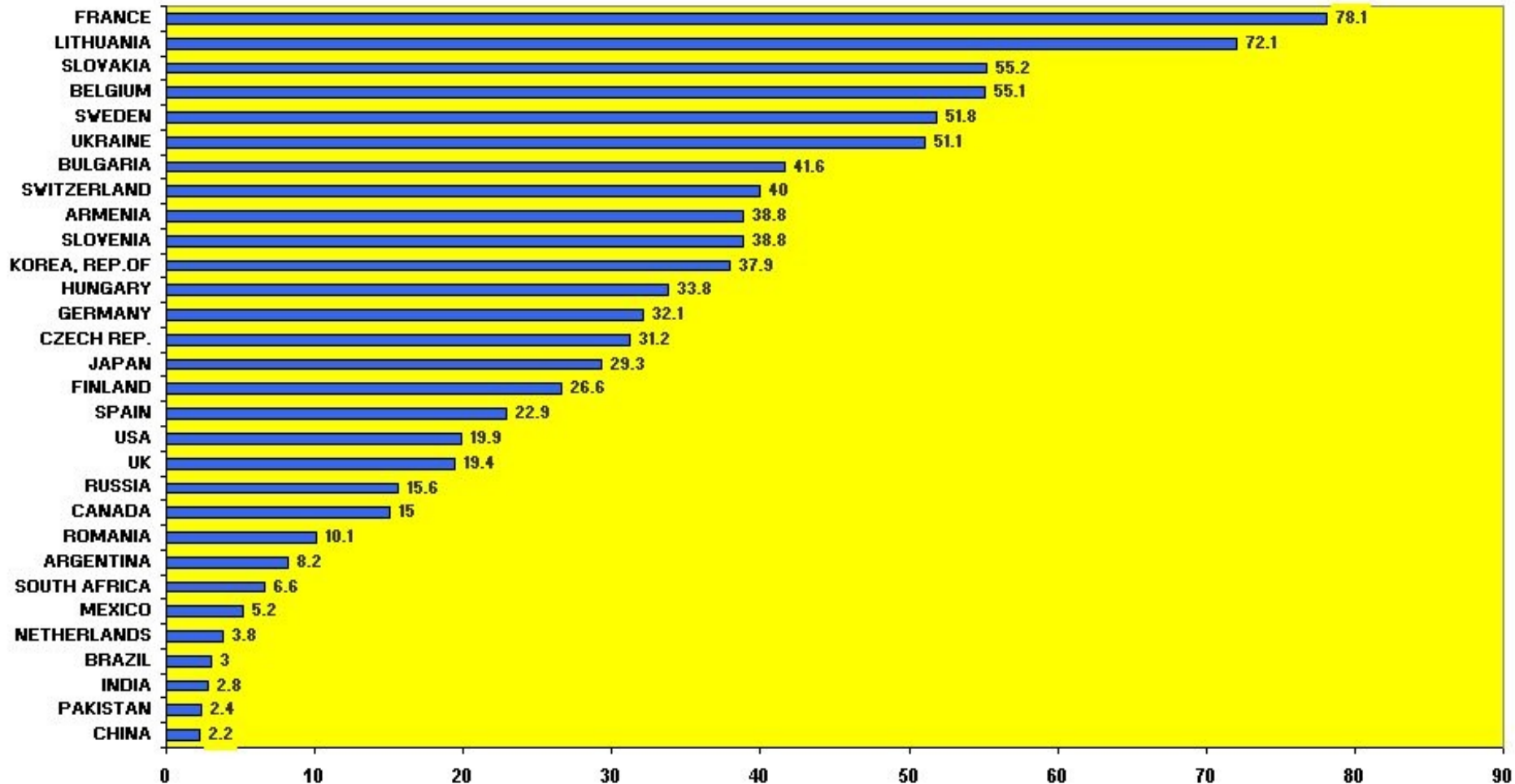
Paese	No. di unità	Capacità (Gwe)
United States	104	98
France	59	63
Japan	53	44
Russia	30	21
United Kingdom	27	12
South Korea	19	16
Germany	18	21
Canada	16	11
Ukraine	13	11
Others (22)	104	64
Total	443	374

I reattori in funzione per Paese

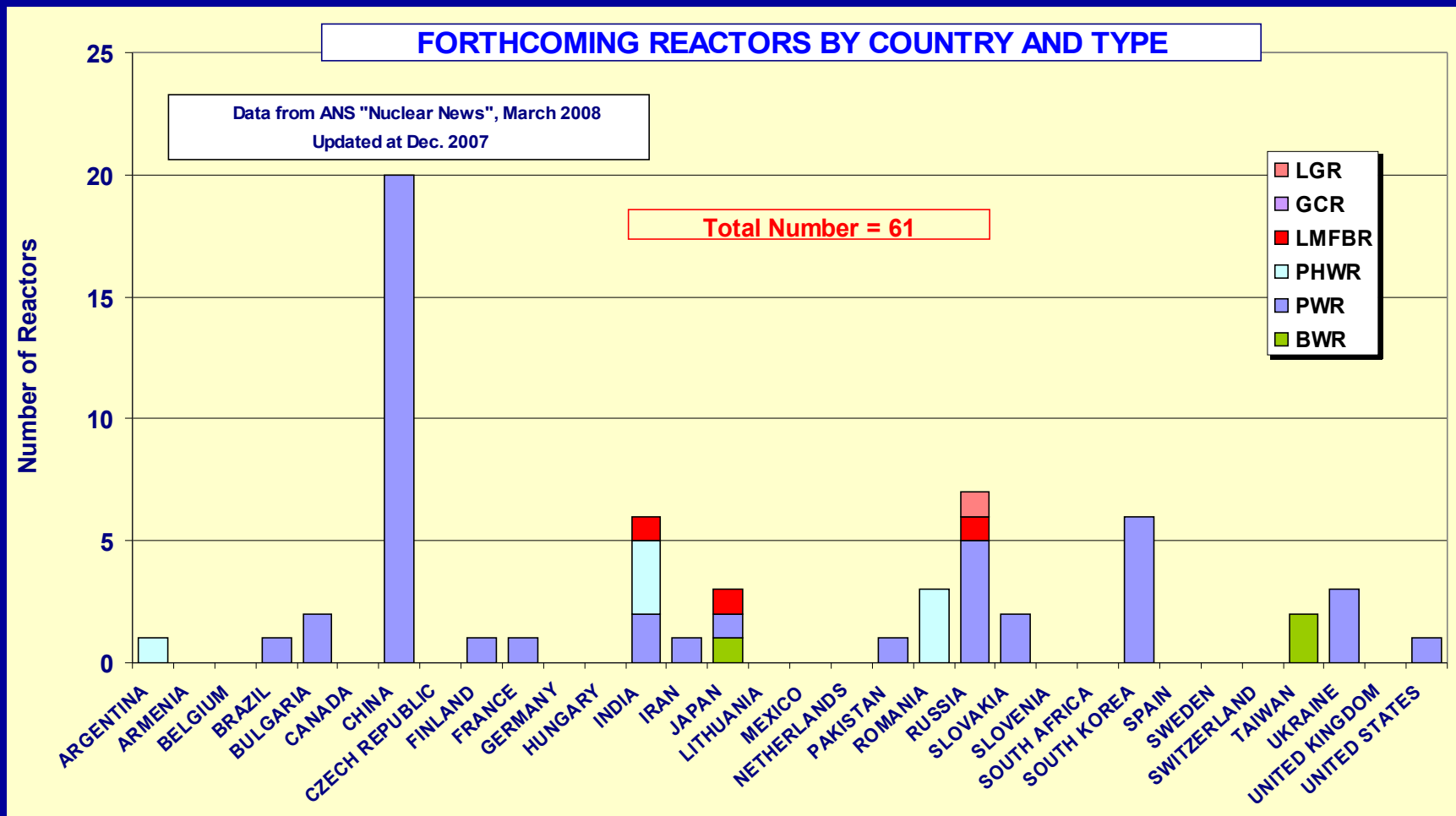


Il contributo del nucleare nella produzione di energia elettrica per Paese

Nuclear Share in Electricity Generation in 2004



I reattori in costruzione



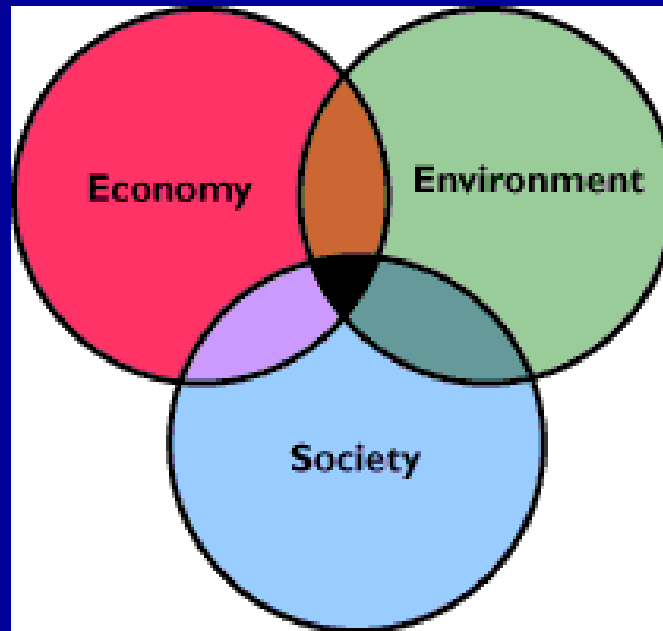
I reattori di ricerca e per la propulsione

**56 Paesi hanno un totale di 284
reattori di ricerca e 220 reattori
per la propulsione navale**

Energia prodotta

FONTE	Potenza	Energia prodotta in un anno	Tempo Medio di funzionamento in un anno
Nucleare	1 GW	7,3 TWh	7300 h
Eolica	40 GW	80 TWh	2000 h

Sostenibilità



Le sfide dell'energia nucleare

Accettazione dell'opinione pubblica: *nimby/banana-* not in my backyard/build absolutely nothing anywhere near anything

Combustibile: *durata*

Costi: *alti costi di investimento rispetto alle centrali a combustibili fossili*

Rifiuti: *sistemazione dei rifiuti radioattivi*

Sicurezza: *reattori progettati in modo da evitare l'evacuazione anche per incidenti gravi molto improbabili*

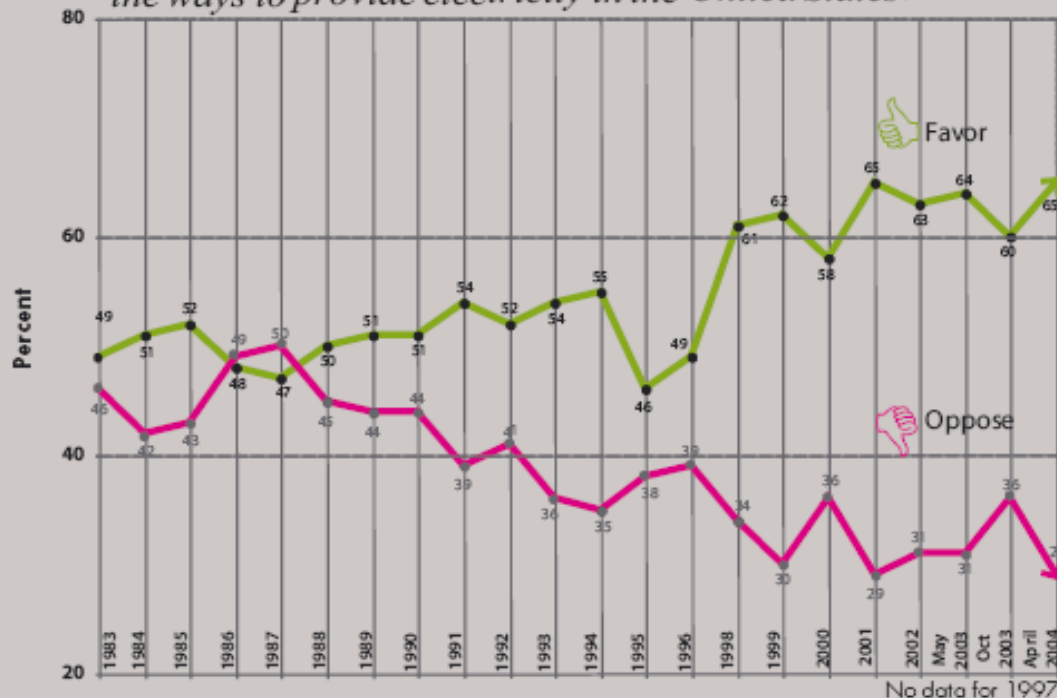
Proliferazione: *evitare il possibile uso del combustibile nucleare per scopi militari*

Accettazione della Pubblica Opinione in U.S.A.

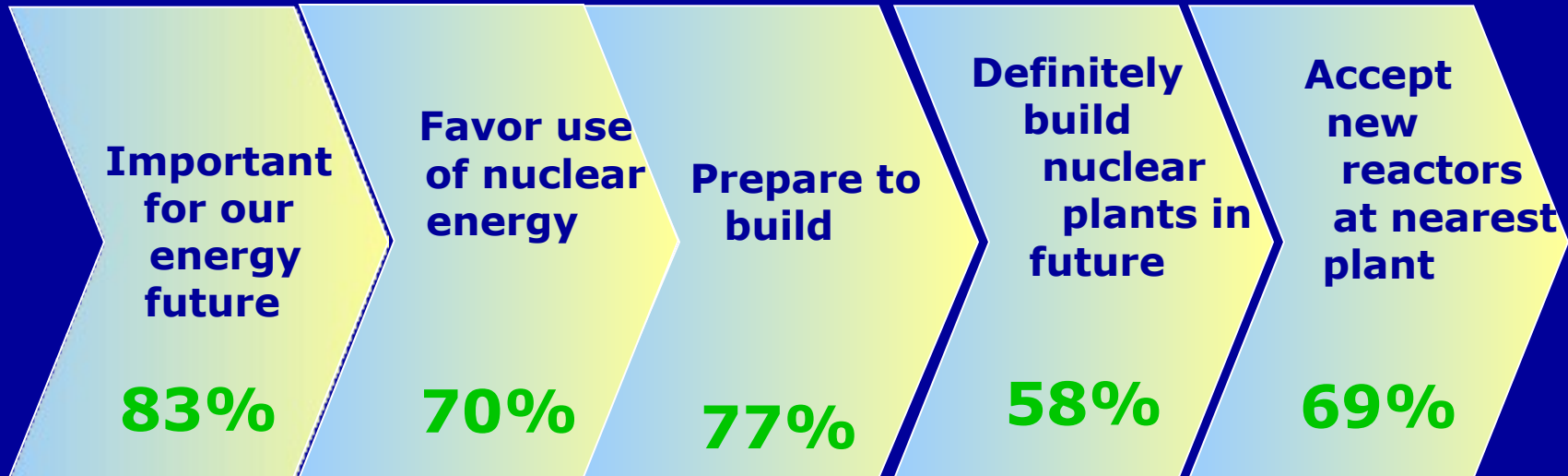
In favore/contro l'energia nucleare (Medie Annuali dal 1983 al 2004)

Favor/Oppose Nuclear Energy, Trend in %

Q “Overall, do you strongly favor, somewhat favor, somewhat oppose, or strongly oppose the use of nuclear energy as one of the ways to provide electricity in the United States?”



Evoluzione della Pubblica Opinione verso l'energia nucleare in U.S.A.



Source: Bisconti Research Inc./NOP World, May 2005, 1,000 national adults

RIFIUTI RADIOATTIVI (SCORIE)

I rifiuti si distinguono in :

- *R. ad alta attività*, che richiedono la maggiore attenzione

costituiscono il 3% del volume totale e contengono il 95% di radioattività;

- *R. a media attività*

7% in volume e contengono il 4% di radioattività;

- *R. a bassa attività*

rappresentano il 90% in volume e contengono l'1% di radioattività

RIFIUTI RADIOATTIVI (SCORIE)

I rifiuti si distinguono in :

- *R. a vita lunga* , che richiedono la maggiore attenzione,

scompaiono dopo migliaia di anni

- *R. a vita media*

scompaiono dopo qualche centinaia di anni

- *R. a vita breve*

scompaiono dopo qualche anno

RIFIUTI RADIOATTIVI (SCORIE)

Una centrale nucleare di 1000 MWe produce annualmente alcune tonnellate di rifiuti ad alto livello di radioattività, includendo la matrice di vetro che li ingloba

La stessa quantità di energia, prodotta con il carbone, produrrebbe centinaia di migliaia di tonnellate di ceneri e milioni di tonnellate di SO_2 , NO_x e CO_2

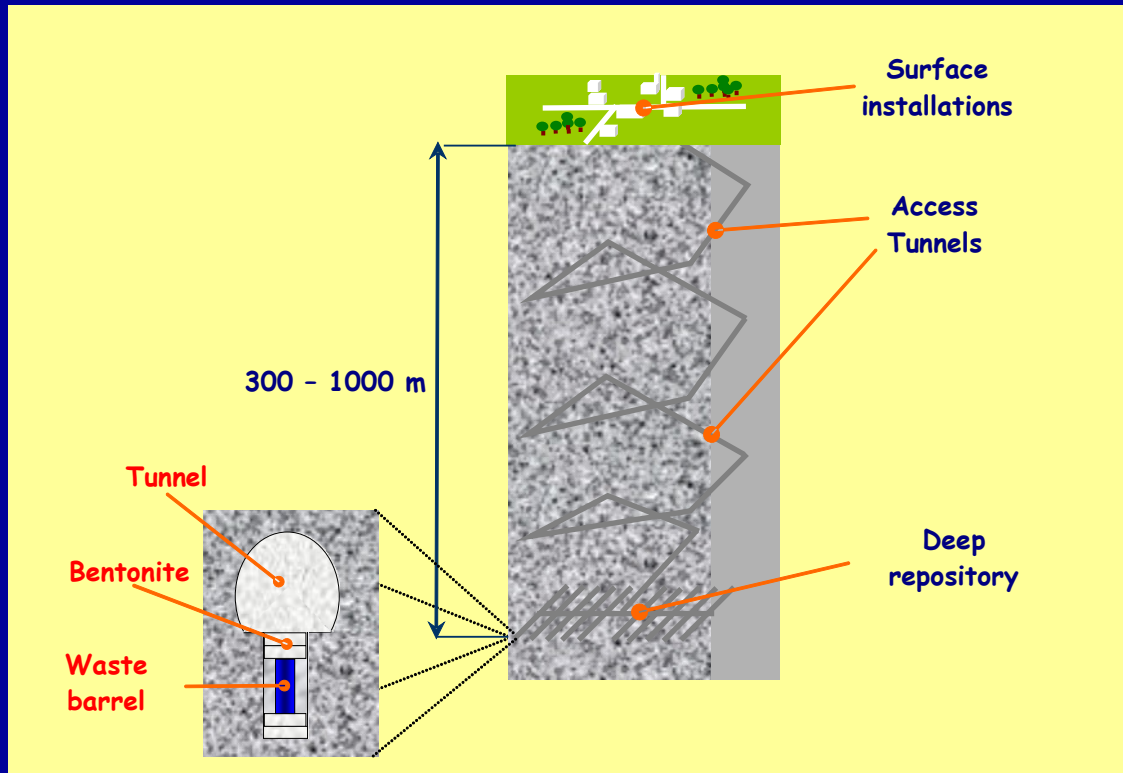
Una immagine significativa delle quantità in gioco mostra la quantità di rifiuto ad alta attività derivante dal combustibile che ha prodotto l'energia di cui ha bisogno una persona



RIFIUTI RADIOATTIVI (SCORIE)

Per produrre l'energia elettrica necessaria a tutta la vita di un uomo di un paese avanzato 600 cm³ di scorie totali, 20 cm³ di scorie ad alta attività

RIFIUTI RADIOATTIVI (SCORIE)



Attualmente i rifiuti nucleari possono essere inglobati in una matrice inerte (vetro), chiusi in fusti di acciaio e posti in una struttura stabile geologica (sale o granito)
Un deposito di questo tipo è attivo dal 1999 in New Mexico and immagazzinerà rifiuti fino al 2035 (Waste Isolation Pilot Plant)

Le generazioni successive di reattori nucleari

Primi reattori



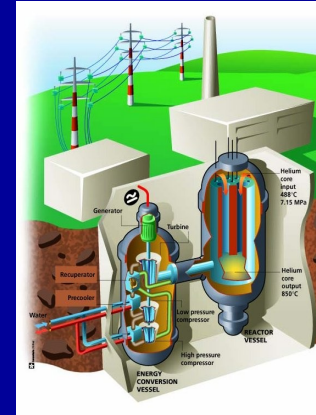
Reattori attuali



Reattori "avanzati"



Sistemi del futuro



1950 1970 1990 2010 2030 2050 2070 2090



Generation I

Generation II

Generation III

Generation IV

Generazione III: reattori “avanzati”

(Reattori costruibili subito)

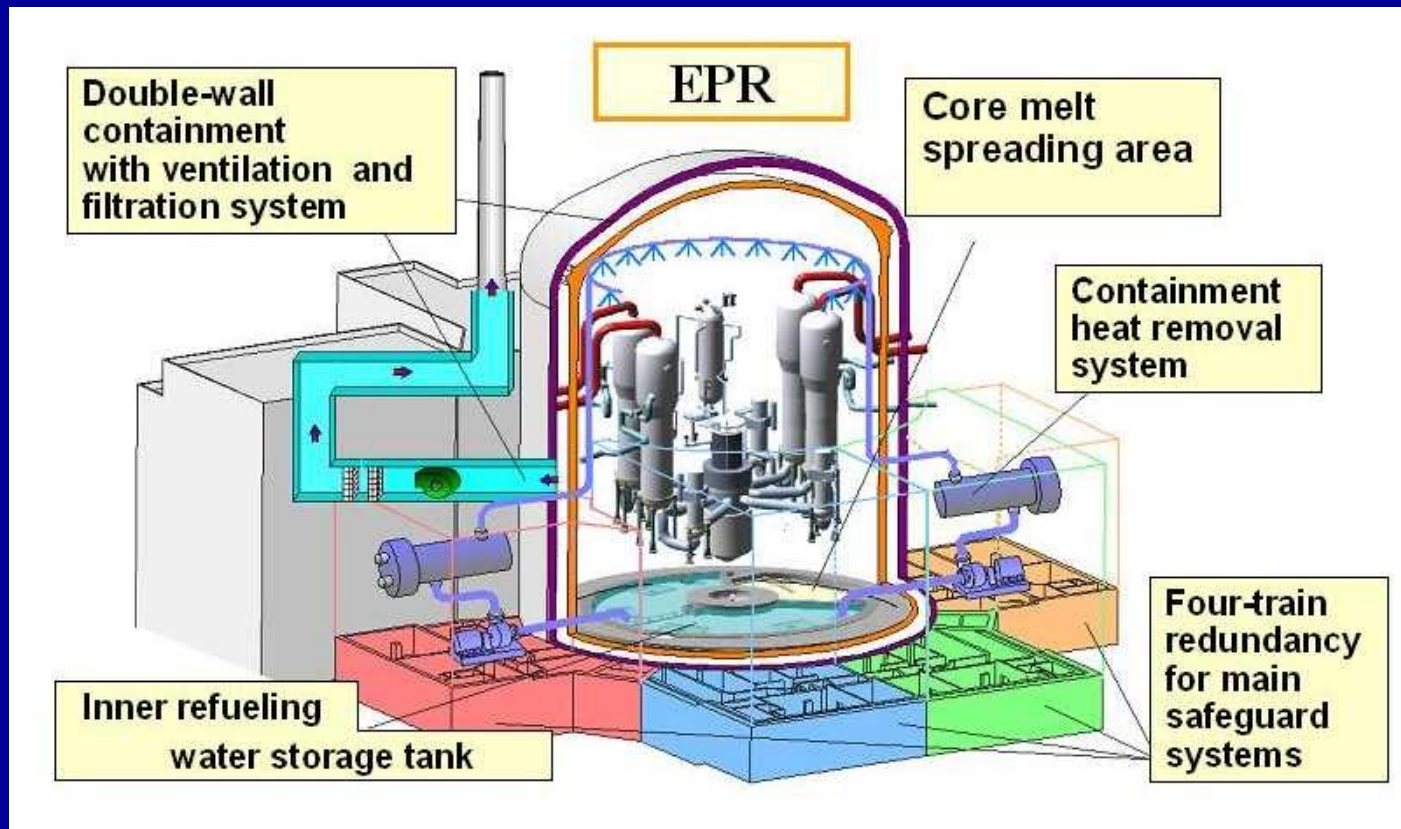
**Una nuova generazione di reattori che
beneficiano della vasta esperienza
acquisita dai reattori di Gen-II**

Nuovi miglioramenti alla sicurezza

**La competitività economica è l'obiettivo
principale**

Generazione III: reattori "avanzati"

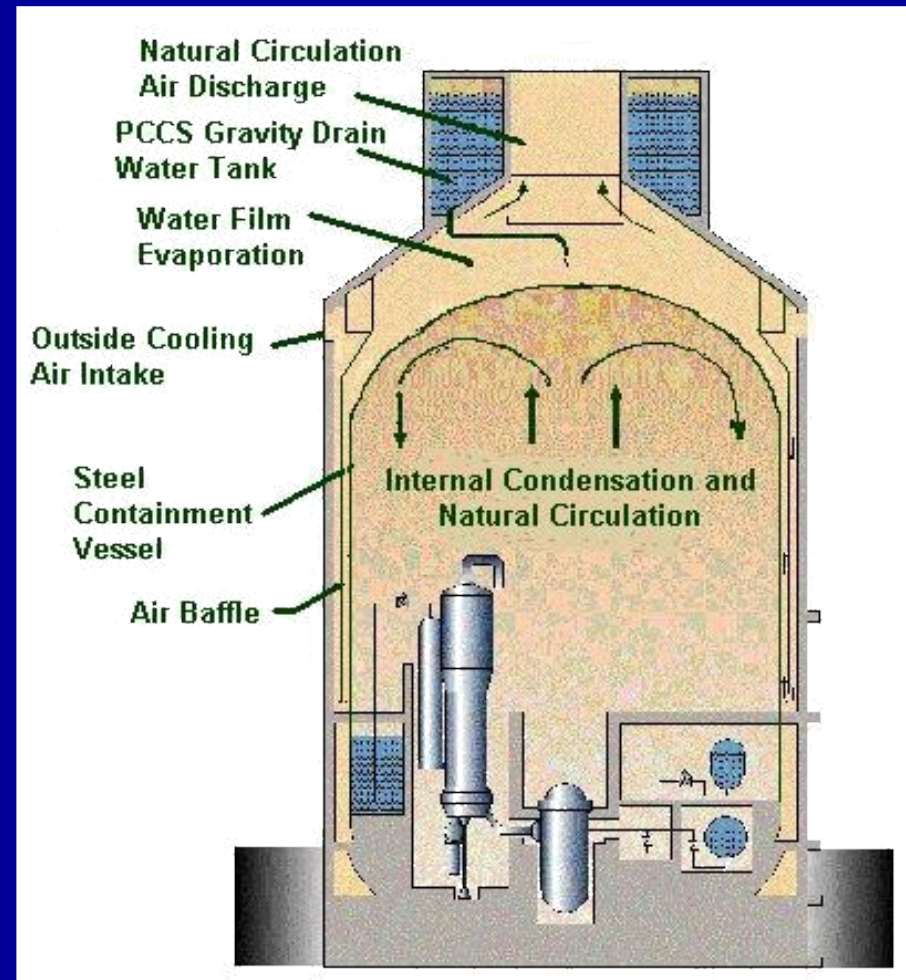
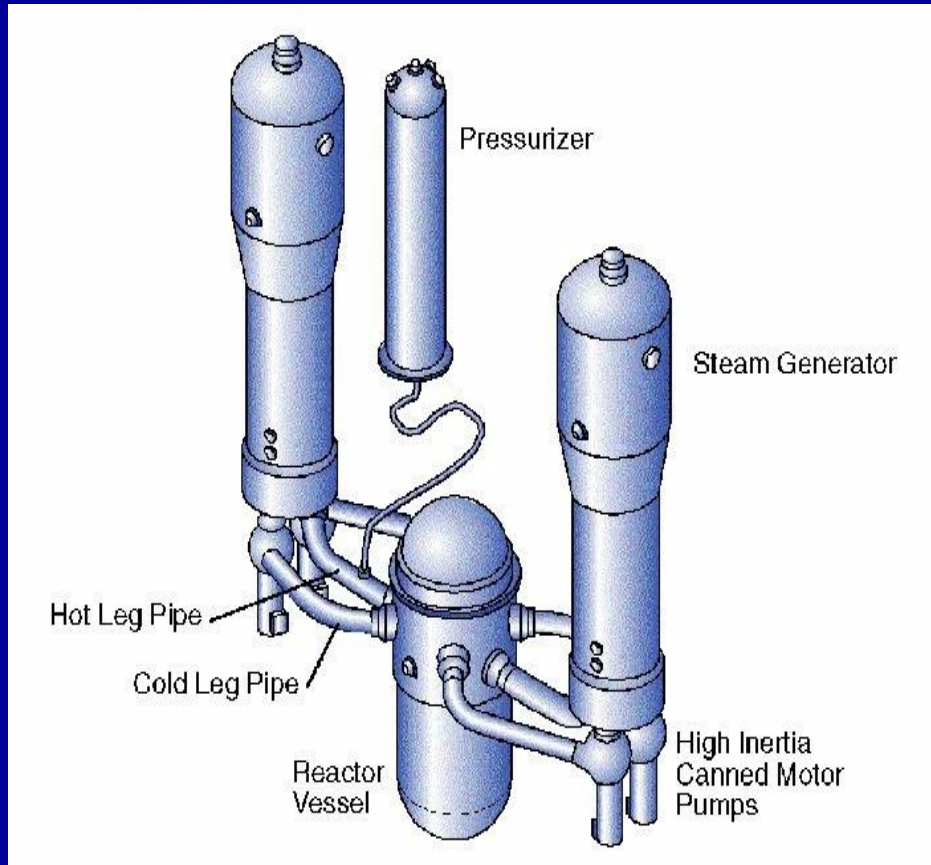
AREVA : EPR (European Pressurized Reactor)



**Due EPR in costruzione in Finlandia e in Francia.
4 centrali ordinate in Cina.**

Generazione III: reattori "avanzati"

REATTORI INNOVATIVI WESTINGHOUSE AP1000 (10 reattori in costruzione)



Generazione IV: i sistemi del futuro

In sintesi l'ambizione è di risolvere i problemi di

- Sostenibilità**
- Sicurezza e affidabilità**
- Competitività**
- Resistenza alla proliferazione e protezione fisica**

Generazione IV: i sistemi del futuro

- L'esigenza per il nucleare di essere "durevole" (cioè di permettere la conservazione delle risorse) diventa un obiettivo maggiore
- La riduzione dei rifiuti e del rischio di proliferazione diventano criteri altrettanto importanti quanto la sicurezza e l'economia
- Inoltre, altre applicazioni dell'energia nucleare vengono proposte: la produzione di idrogeno, l'uso industriale del calore, la desalinizzazione dell'acqua marina
- Lo sviluppo di nuovi sistemi richiede tempo e la loro introduzione su scala industriale è prevedibile verso il 2030 o oltre

Generazione IV : International Forum

➤ Nuovi requisiti per un nucleare “durevole”:

• Miglioramenti per:

- ✓ Competitività
- ✓ Sicurezza e affidabilità

• Concetti innovativi per:

- ✓ Minimizzazione dei rifiuti
- ✓ Conservazione delle risorse
- ✓ Non proliferazione

➤ Maturità tecnica verso il 2030

➤ Nuovi mercati

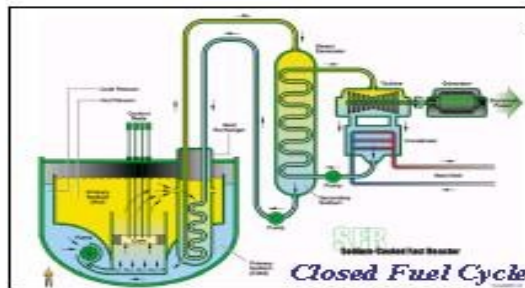
- produzione di idrogeno
- uso diretto del calore
- desalinizzazione

➤ Ricerca & Sviluppo distribuita a livello internazionale

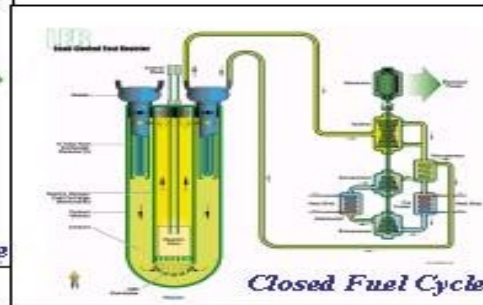


Generazione IV : International Forum

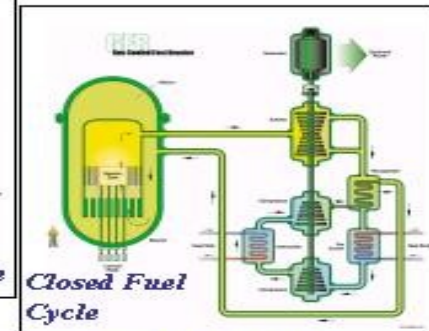
Sono stati scelti 6 tipi di reattori (di cui 4 a neutroni veloci)



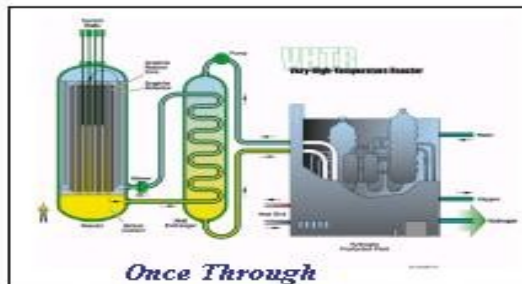
Sodium Fast reactor



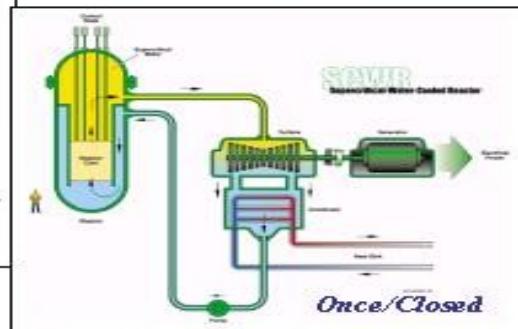
Lead Fast Reactor



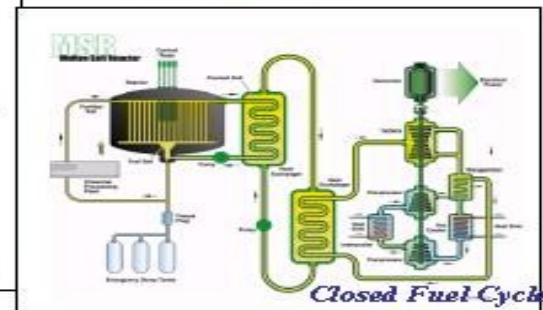
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor



Supercritical Water Reactor



Molten Salt Reactor

Global Nuclear Energy Partnership

The **Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)**, che è stata firmata da 20 Paesi (United States, China, France, Japan, Russia, Australia, Bulgaria, Ghana, Hungary, Jordan, Kazakhstan, Lithuania, Poland, Romania, Slovenia, Ukraine, Italy, Canada, Republic of Korea, Senegal) intende sviluppare **consenso in tutto il mondo sull'uso del combustibile nucleare che permetta a tutti i Paesi di approvvigionarsi, eviti la non-proliferazione e l'uso distorto, minimizzi i rifiuti**

Ciclo del combustibile (Riprocessamento)

Se si riprocessa il combustibile dopo l'uso (ciclo chiuso), i rifiuti radioattivi vengono « vetrificati »

Questa operazione riduce significativamente lo spazio di stoccaggio a circa 1 / 6 rispetto allo stoccaggio diretto

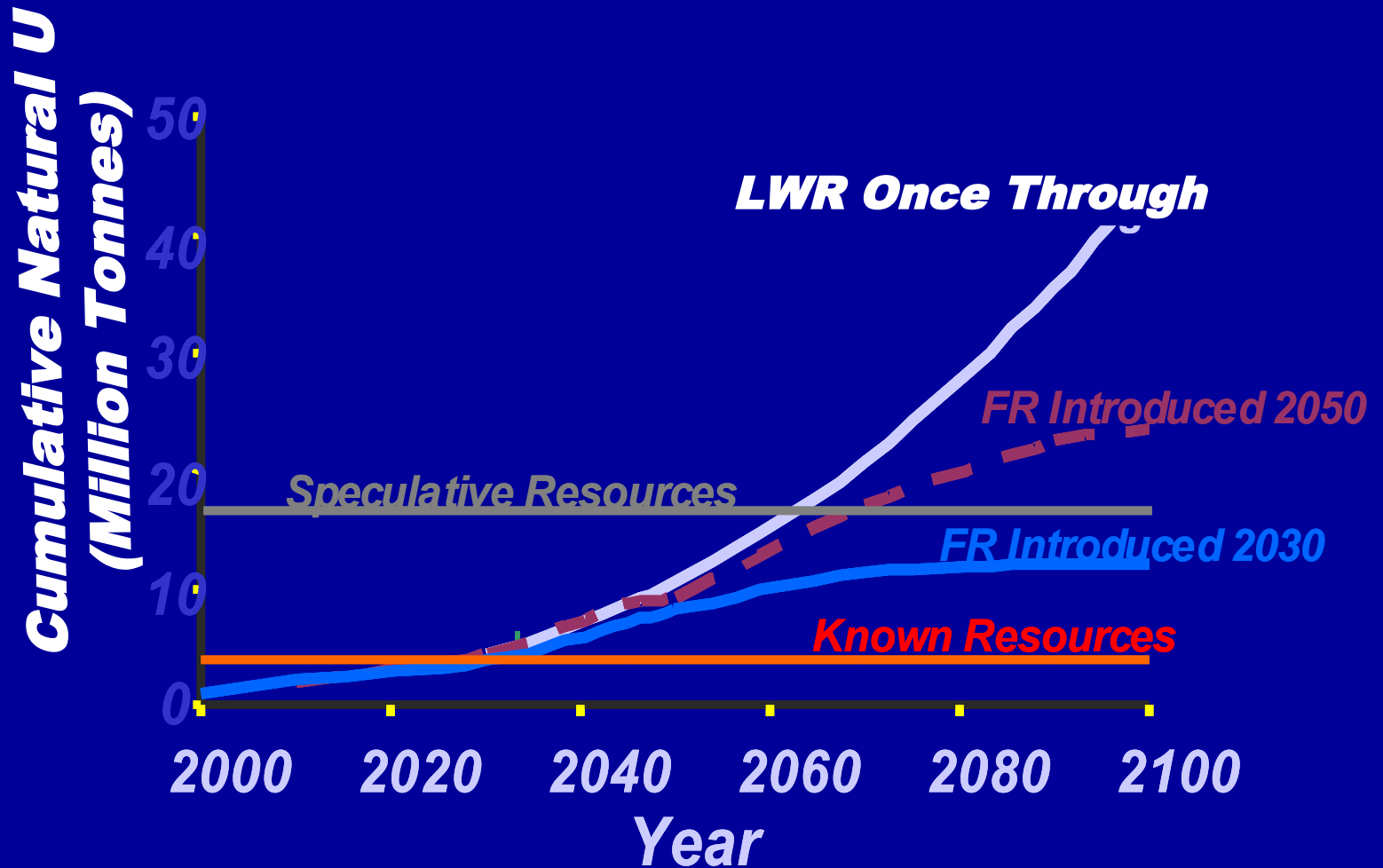
Ciclo del combustibile_

SEPARAZIONE/TRASMUTAZIONE

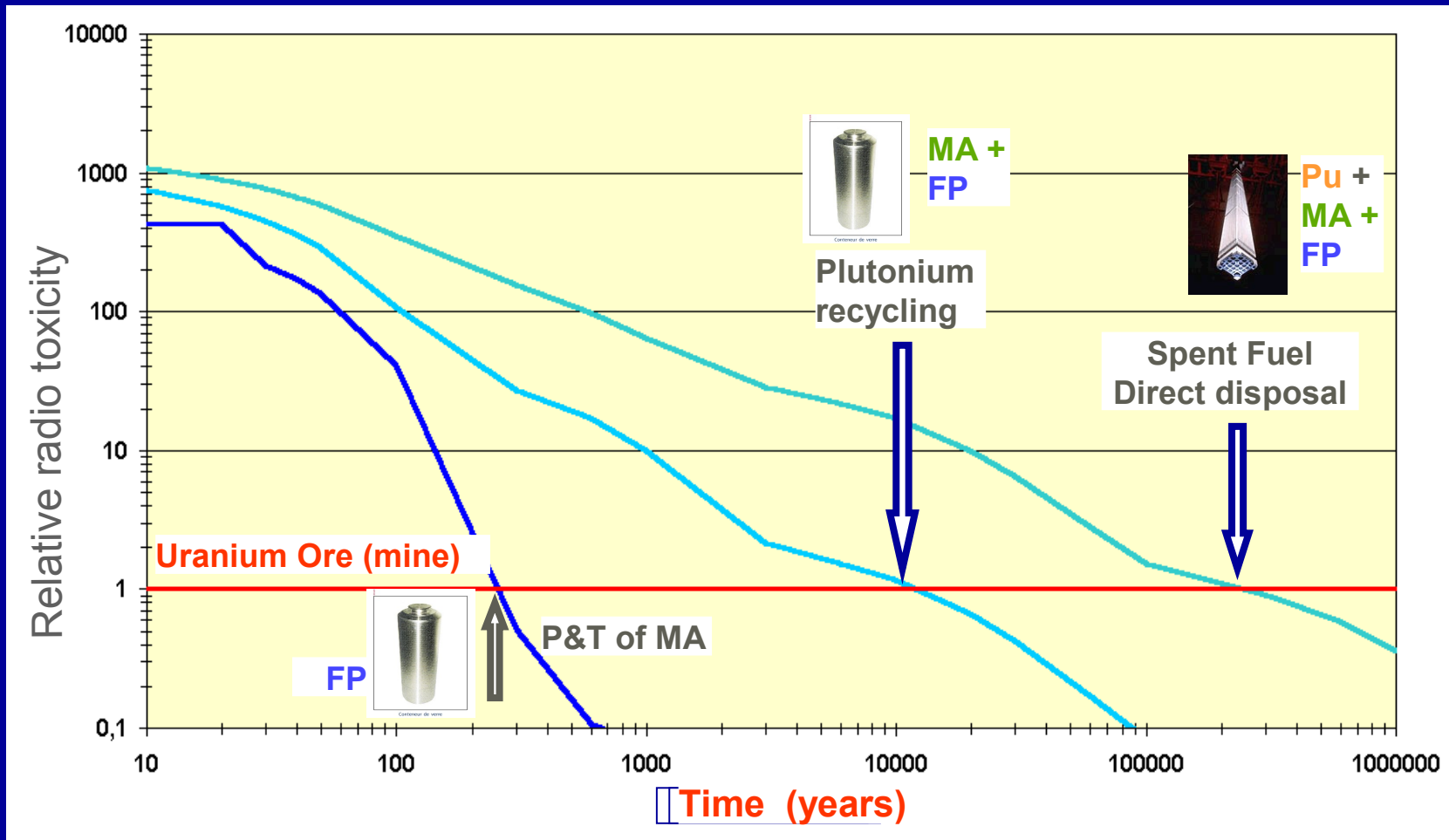
(Reattori veloci)

- Nei reattori veloci le scorie ad alta attività e lunga durata vengono bruciate (trasmutate) molto meglio che nei reattori commerciali attuali**
- Riduzione della sorgente di radiotossicità potenziale in un deposito geologico**
- Aumento della capacità del deposito geologico**
- Diminuzione del rischio di proliferazione**

Reattori veloci: ottimizzazione delle risorse



Reattori veloci: minimizzazione dei rifiuti radioattivi



Conclusioni

David Goldstein:

"Questo è il secolo in cui dobbiamo imparare a vivere senza combustibili fossili"

Conclusioni

VANTAGGI ENERGIA NUCLEARE

- Sistema chiuso senza rilasci
- No effetto serra

J. Lovelock:*ma soltanto l'energia nucleare può fermare il riscaldamento globale*

Conclusioni

VANTAGGI ENERGIA NUCLEARE

- Grande affidabilità di funzionamento
- Vantaggi a lungo termine per insensibilità alla variazione dei prezzi delle materie prime
- Se si valutano i costi "esterni" il vantaggio è ben maggiore

Conclusioni

- Dopo un periodo di stagnazione e di dubbio, ci sono segnali di una nuova, significativa ripresa del nucleare nel mondo

I paesi asiatici hanno i programmi più ampi, ma recenti dichiarazioni e iniziative negli USA e in Europa sono altrettanto significative

- L'energia nucleare contribuirà in modo significativo, con il risparmio energetico e le energie rinnovabili, a diminuire le emissioni di gas serra

Già ora con l'energia nucleare si evitano 2.5 miliardi di tonnellate di CO₂ all'anno

Ogni Centrale da 1000 MW evita l'emissione di **10** milioni di tonnellate di CO₂ annualmente

Conclusioni

- La crescita economica globale dovrebbe richiedere anche lo sviluppo dell'energia nucleare tra le fonti di energia con basse emissioni di gas serra (con le energie rinnovabili e il risparmio energetico)
- Tale tecnologia può garantire maggiori risorse primarie e diversificazione rendendo molto Paesi meno dipendenti dalle importazioni di energia
- La prossima generazione di reattori nucleari deve essere più sicura, più economica, con meno rifiuti e nessun rischio di proliferazione

Conclusioni

- L'innovazione giocherà un ruolo essenziale per rispondere ai nuovi obiettivi di sviluppo durevole e di minimizzazione dei rifiuti
- L'energia è un tema centrale nelle nostre società
Contribuire allo sviluppo di un nucleare durevole, sicuro e rispettoso dell'ambiente non è soltanto una sfida scientifica, ma ha forti implicazioni sociali