

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIE | Dipartimento di Ingegneria Elettrica

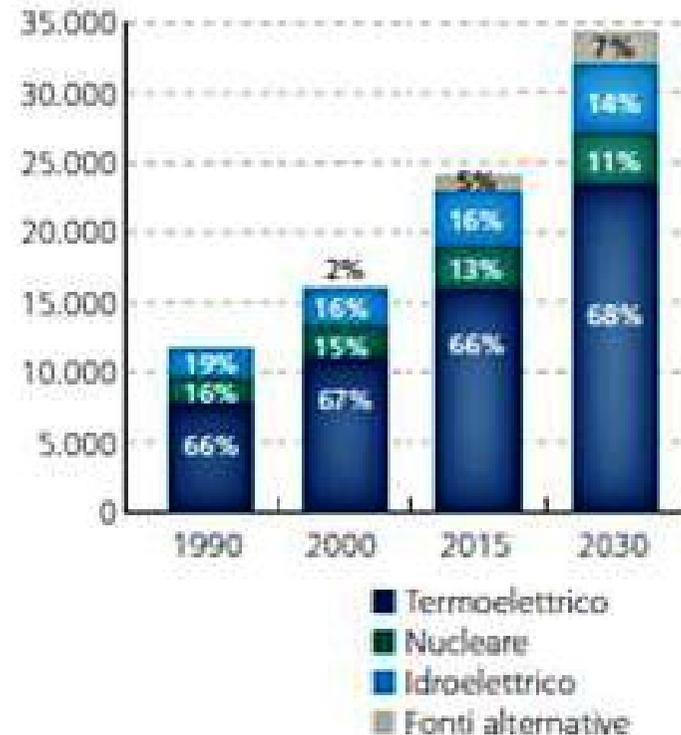
Economia Neutronica dei Reattori Autofertilizzanti Veloci (FBRs) Ciclo del combustibile torio-uranio

Laureando: Roberto Francesco
Matr. 541829-IE

Relatore: Arturo Lorenzoni

Energia, la sfida chiave per il prossimo futuro

Generazione elettrica mondiale per fonte
(valori in TWh)¹



Quasi tutti i Paesi del mondo importano o esportano una quota consistente dei loro consumi o della loro produzione di energia.



La domanda di energia elettrica al **2030** sarà di circa **439 TWh**.

Per raggiungere questo obiettivo nel medio periodo, occorrerà una **transizione** verso sistemi energetici meno basati su fonti fossili.



Le grandi sfide energetiche del futuro:

- **Sicurezza degli approvvigionamenti**
- **Economicità**
- **Sostenibilità ambientale**



Il nuovo nucleare può essere una **fonte integrativa**, sempre più **Paesi la stanno scegliendo**.

¹Fonte: rielaborazioni The European House-Ambrosetti su dati International Atomic Energy Agency, 2010



Il ritorno del nucleare nel mondo

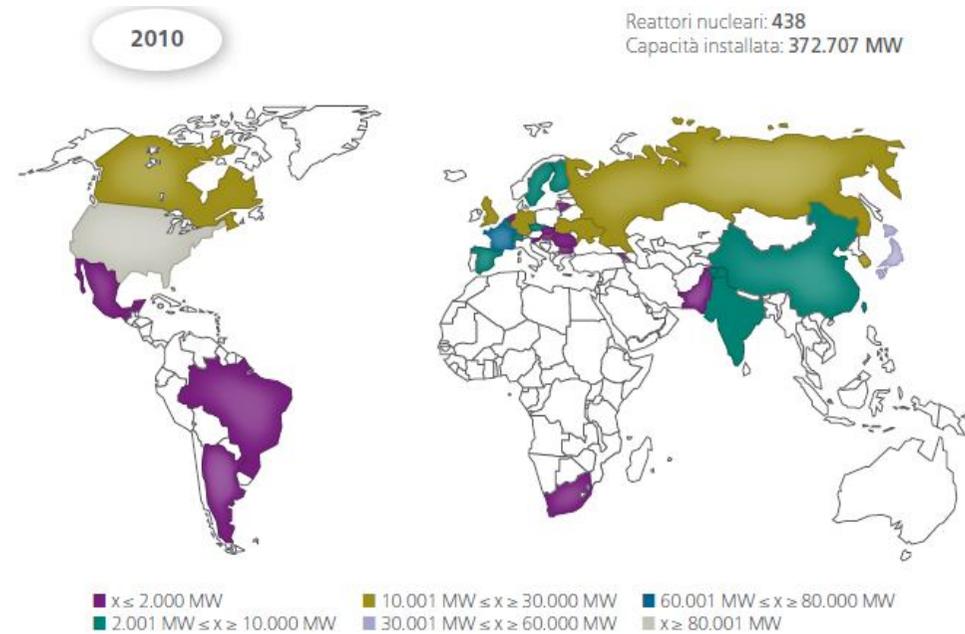
Nel 1966 in tutto il mondo vi erano in funzione solamente **52 reattori nucleari**, con una capacità istallata di **6GW**.

Attualmente nel mondo vi sono in funzione **438 reattori nucleari**, operanti in 30 diversi paesi, per una capacità complessiva installata di **372GW**.

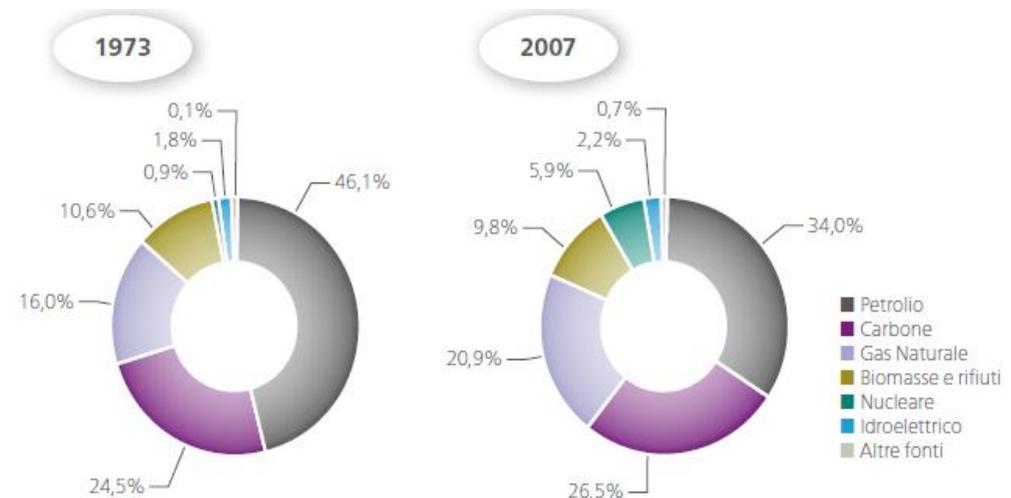
L'incremento della quota coperta dal nucleare ha coinciso con una **importante riduzione** dell'incidenza percentuale di petrolio e gas naturale, passata dal 62,1 al **54,9%**.

2 Fonte: rielaborazioni The European House-Ambrosetti su data *World Nuclear Association*, 2010.

3 Fonte: rielaborazioni The European House-Ambrosetti su data *International Energy Agency*, 2010.



Numero di centrali nucleari e capacità complessivamente installata, nel 2010²



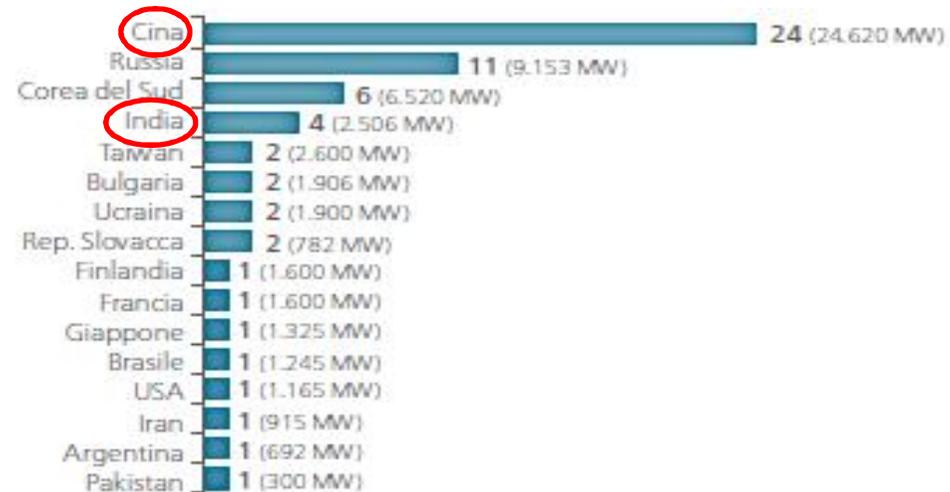
Numero di centrali nucleari e capacità complessivamente installata, nel 2010³



Verso un futuro ad energia nucleare

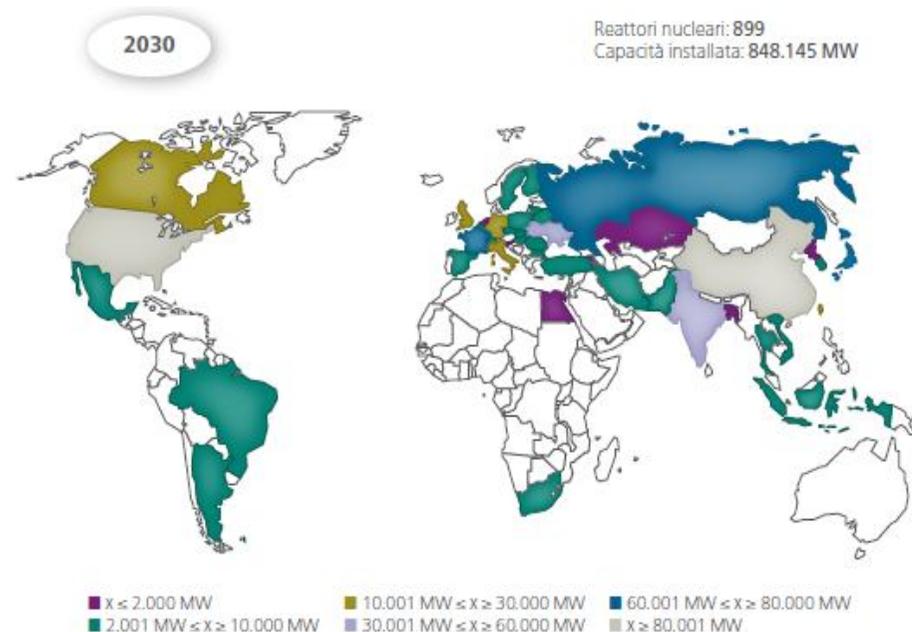
Il 14% dell'energia elettrica prodotta nel mondo, proviene dalle centrali nucleari.

Il forte sviluppo del nucleare è testimoniato dal numero di centrali attualmente in costruzione: **61 centrali in corso di realizzazione in 16 Paesi.**



Centrali nucleari in costruzione nel mondo e relativa capacità installata (potenza netta, valori in MW)⁴

Secondo le previsioni della World Nuclear Association (WNA) per il 2030, nel mondo saranno in funzione circa **899 reattori nucleari** ed una capacità installata di circa **848 GW.**



Numero di centrali nucleari e capacità complessivamente installata nel 2030⁵

4 Fonte: rielaborazioni The European House-Ambrosetti su data World Nuclear Association, 2010

5 Fonte: rielaborazione The European House-Ambrosetti su dati IAEA, PRIS-Power Reactor Information Database, dati aggiornati al 30 giugno 2010



Tecnologia nucleare, le nuove frontiere della ricerca

Le centrali nucleari hanno la principale funzione di produrre energia, **senza emettere** CO₂, SO₂ e polveri sottili.



Le centrali nucleari sono classificate secondo la loro "**generazione**", ovvero in base al momento storico e alla fase tecnologica in cui sono state costruite.



I reattori Veloci di *IV generazione*, **porteranno notevoli benefici**.



Reattori di IV Gen. Veloci (FBR)

ECONOMIA NEUTRONICA

Isotopo Fissile → da luogo a fissione.
Isotopo Fertile → si trasforma in fissile.



Surplus neutronico → La quantità di isotopi *fertili trasformati* in *fissili* può essere tale da produrre più combustibile di quello che si consuma.

Estendere la lunghezza del ciclo del combustibile



I conseguenti **vantaggi** sono:

- ✓ convertire grandi quantità di *materiale fertile*, **producendo al contempo maggior energia**;
- ✓ Abbattere **la radiotossicità delle scorie**, **riducendo sensibilmente le misure e i costi** per la loro gestione;
- ✓ Uno **sfruttamento decisamente migliore** dell'uranio presente in natura.



Produzione di materiale fissile “fertilizzazione”

Per un reattore VELOCE, il “*Conversion Ratio*” definisce come:

$$CR = \eta \epsilon - 1 - L = \frac{\text{numero di nuclei fertili convertiti in fissili}}{\text{numero di nuclei fissili consumati}}$$

- $CR < 1$ → non considerando la conversione del fertile, si può al massimo bruciare tutto il fissile presente.
- $CR > 1$ → guadagno di materiale fissile, il reattore è detto “*breeder*” ossia *fertilizzante*.

Il “*Breeder Gain*” dato dalla relazione: $G = \eta \epsilon - 2 - L$

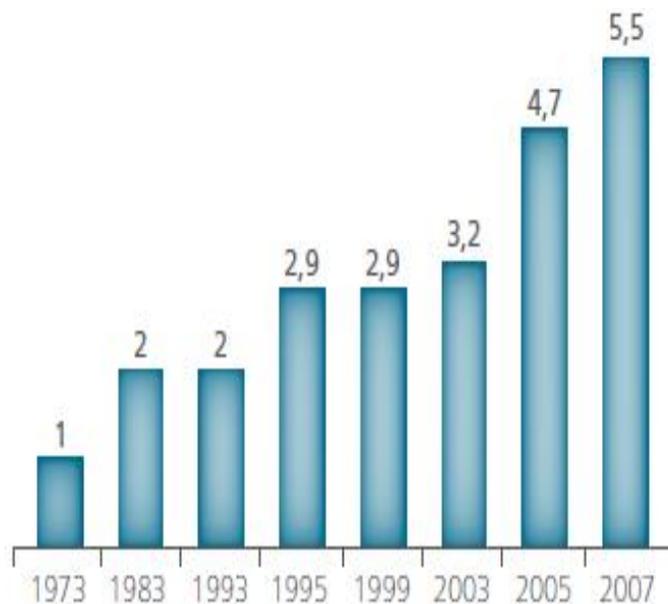
- ✓ Reattore a spettro Veloce
 - ✓ Configurazione del nocciolo di isotopi fissili – fertili
- ↙ Uranio – plutonio.
↘ Uranio – torio.



Combinazioni di isotopi *Fissili* e *Fertili* permettono di ottenere un “*Breeder Gain*” **positivo** e quindi una **FERTILIZZAZIONE DEL MATERIALE**.

Il combustibile nucleare ed il combustibile innovativo

Risorse di uranio identificate nel tempo⁶

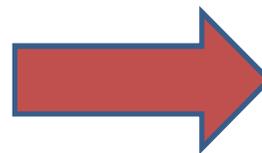


N.B. Valori espressi in milioni di tonnellate (Mt)

Le centrali nucleari utilizzano **uranio**.

- ^{238}U (99,3%, dell'uranio naturale),
- ^{235}U (0,72%, dell'uranio naturale **ed unico nuclide fissile**),
- ^{234}U (tracce).

Con il consumo e i reattori attuali, tali risorse si traducono in una disponibilità di energia per circa **75-100 anni**.



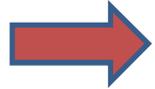
Nel lungo periodo potrebbe subentrare il problema dell'esaurimento della risorsa.

⁶ Fonte: rielaborazione The European House-Ambrosetti su dati International Atomic Energy Association, 2010

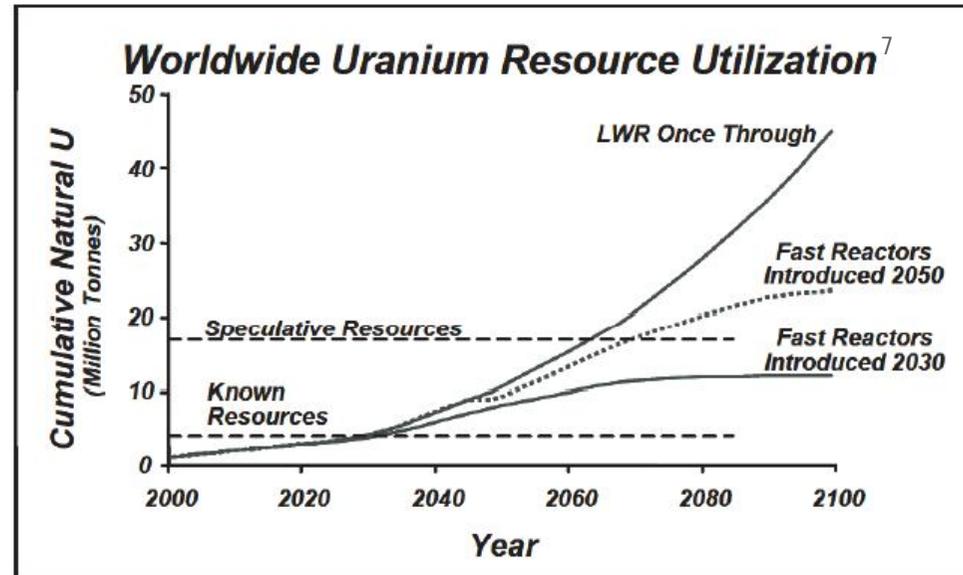


Il Tempo di Raddoppio

Scenario di riduzione dei giacimenti di uranio sfruttabili a costi contenuti



Reattori autofertilizzanti veloci, possono risultare economicamente vantaggiosi.



7 Fonte: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00

Il principale indice per questi reattori, è il **“tempo di raddoppio effettivo”** (T_{eff}).

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_i}{F_c}$$

Indicando con T_E invece, il tempo di raddoppio della domanda di energia elettrica :

- $T_{\text{eff}} \leq T_E$  **soddisfacimento** della domanda.
- $T_{\text{eff}} > T_E$  contemporaneo utilizzo di reattori veloci con reattori di diversa filiera.



Il Torio (Th)

La concentrazione media di questo materiale sulla crosta terrestre è **tre - quattro volte maggiore** di quella dell'uranio.

Il torio, in natura si trova come isotopo ^{232}Th , è un **materiale fertile** capace di generare **materiale fissile** ^{233}U .
 ^{233}U **non è presente in natura**, ma rappresenta l'elemento fissile in grado di alimentare e sostenere effettivamente la reazione.

Nuclide	Spettro termico			Spettro veloce		
	ν	α	η	ν	α	η
^{235}U	2.43	0.171	2.06	2.50	0.19	2.10
^{233}U	2.48	0.092	2.04	2.51	0.08	2.31

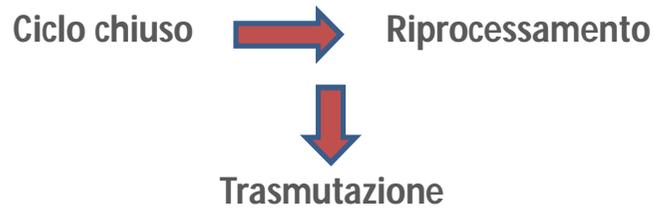
numero medio di neutroni emessi per fissione dell'isotopo

numero di neutroni di fissione prodotti per neutroni assorbito

Vantaggi:

- ✓ Può fungere da isotopo fertile che isotopo fissile;
- ✓ **Ruolo complementare** a quello dell'Uranio;
- ✓ **Stop** all'arricchimento dell' ^{235}U ;
- ✓ Riduzione nella produzione di Plutonio (^{239}Pu);
- ✓ **Resistenza** alla Proliferazione;
- ✓ **Riduzione** della radio tossicità del combustibile spento;

Ciclo del Combustibile **CHIUSO**

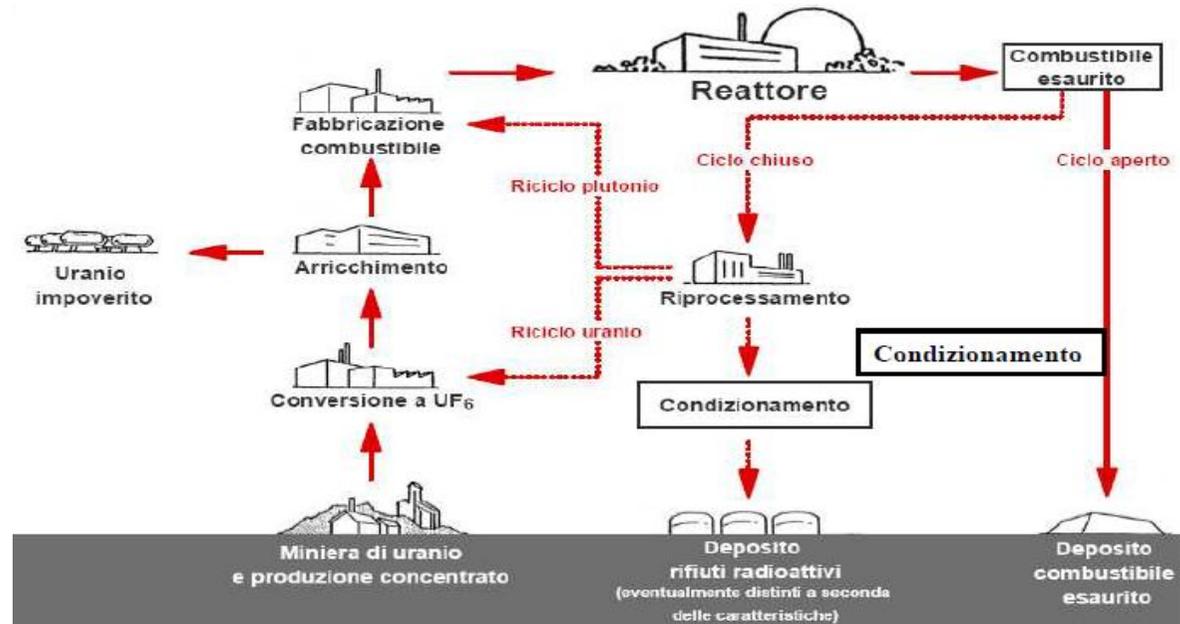


I **vantaggi** derivanti dall'adozione di questi cicli innovativi, sono :

- **Auto sostentamento del ciclo del combustibile;**
- **Razionale sfruttamento** del combustibile;
- **Ridurre** considerevolmente i volumi dei prodotti di fissione a lunga vita (attinidi);
- Sensibile **diminuzione** dei costi.



I concetti chiave dei cicli di combustibili futuri



Ciclo del combustibile

Chiudere il ciclo è essenziale per un nucleare **sostenibile**



Conclusioni

Un Paese non può rinunciare all'energia nucleare, per mancanza di alternative atte al soddisfacimento dei propri fabbisogni energetici.

Questa tecnologia dovrà far parte del ***mix di fonti energetiche del futuro***. Genera emissioni nulle di CO₂ e riduce la dipendenza da fonti fossili.



I reattori attuali presentano alcuni **limiti come:**

- **La produzione di scorie;**
- **L'uso inefficiente della risorsa uranio.**

Fondamentale sarà lo sviluppo dei reattori "***rivoluzionari***", ***veloci autofertilizzanti di IV Generazione a ciclo chiuso***.

Un aspetto altrettanto **importante** dovrà essere dedicato alla **RIQUALIFICAZINE** dell'opinione pubblica verso questa tecnologia.



Il nucleare sarà la fonte energetica del futuro.

