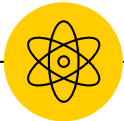


Ingegneria e Sostenibilità: fissione nucleare

Analisi e Prospettive



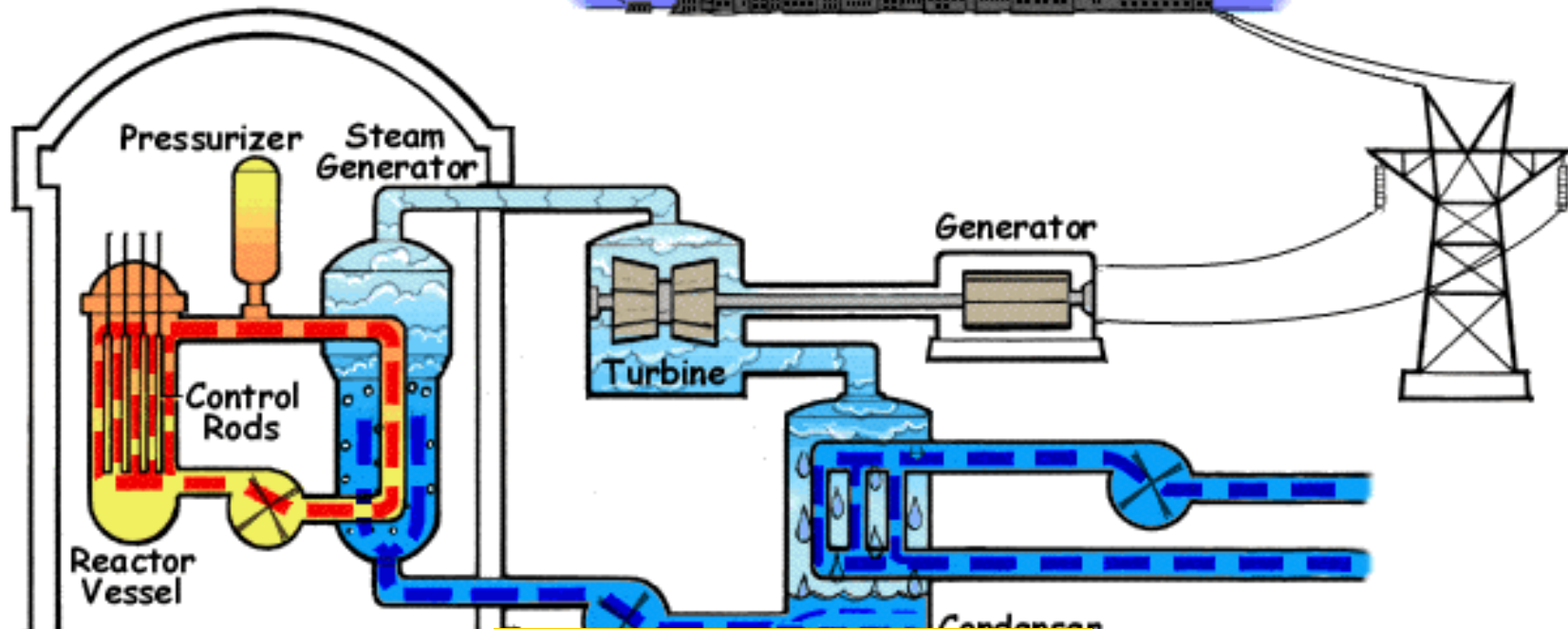
Giacomo Grasso

Responsabile del laboratorio ENEA
“Progettazione del nocciolo”

Fondazione CNI

Webinar, 8 luglio 2022

Containment Structure



Principio di funzionamento



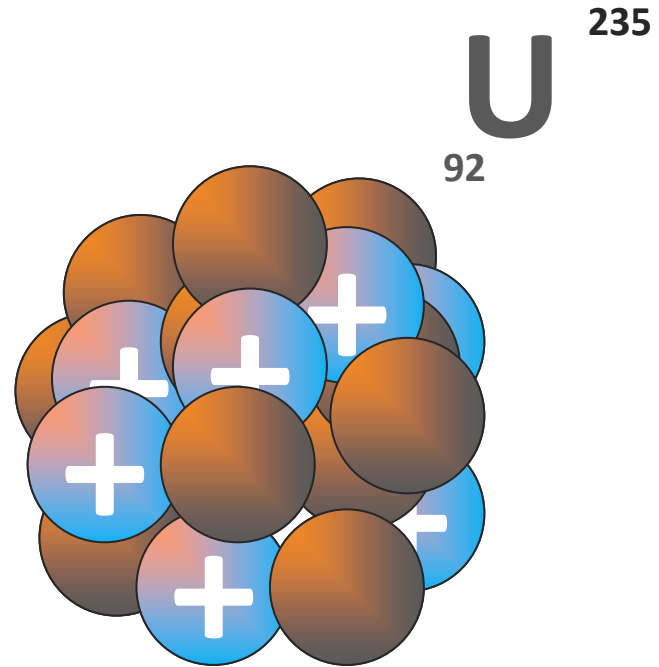
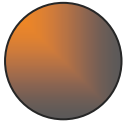


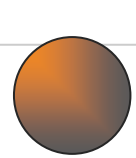
La fissione

Gli ingredienti essenziali sono

- ☉ un bersaglio da rompere
- ☉ un proiettile per romperlo

Neutrone





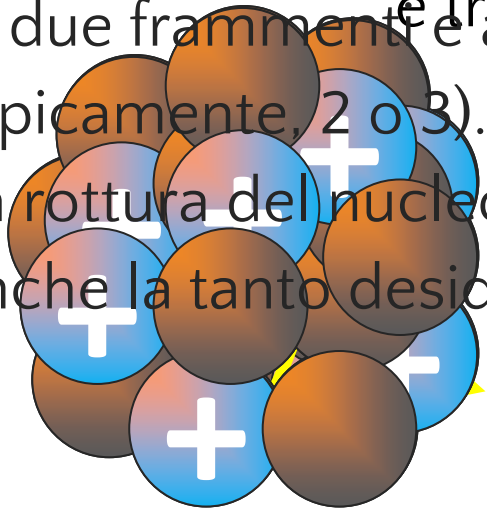
La fissione

Neutrone

Frammento di Fissione

Quando il nucleone arriva nel bersaglio un nucleo fissile, capace di restare unito, si fissiona in due frammenti e alcuni neutroni (tipicamente, 2 o 3).

La rottura del nucleo instabile libera anche la tanto desiderata energia.



Nucleo Fissile

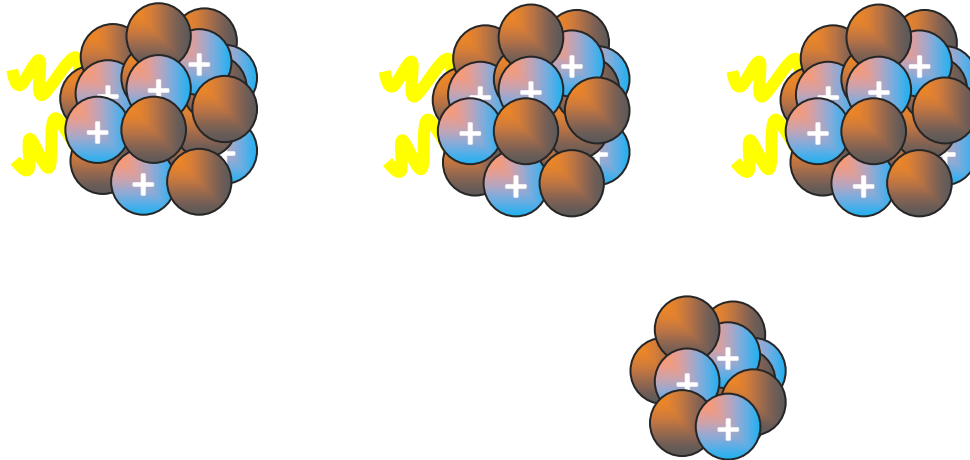


Frammento di Fissione



La reazione a catena

Il principio è sfruttare i neutroni secondari emessi da ogni evento di fissione.



Bilanciando opportunamente i neutroni secondari che sfuggono o sono catturati da nuclei non fissili, è possibile instaurare una reazione di fissione nucleare a catena.



Dalla fissione al kWh



Generation I

Early prototype reactors



Generation II

Commercial power reactors



Generation III

Advanced LWRs



Gen I

Gen II

Gen III

1950

1960

1970

1980

1990

2000

“Generazioni” di reattori



1

Generazione I

I primi reattori prototipici



Cosa s'intende?

Primi reattori

Sono i primi mai entrati in funzione con lo specifico scopo di produrre energia elettrica.

Prototipici

Sono caratterizzati da progetti unici, creati di volta in volta per ogni nuovo impianto.



Gli **albori** dell'energia nucleare

Sono catalogati di Generazione I tutti i primi impianti di potenza realizzati negli anni '50 e '60.



Un tuffo nel passato

Obninsk

- Stato: URSS
- Anno: 1954
- Potenza: 5 MW





Un tuffo nel passato

Calder Hall

- Stato: UK
- Anno: 1956
- Potenza: 46 MW



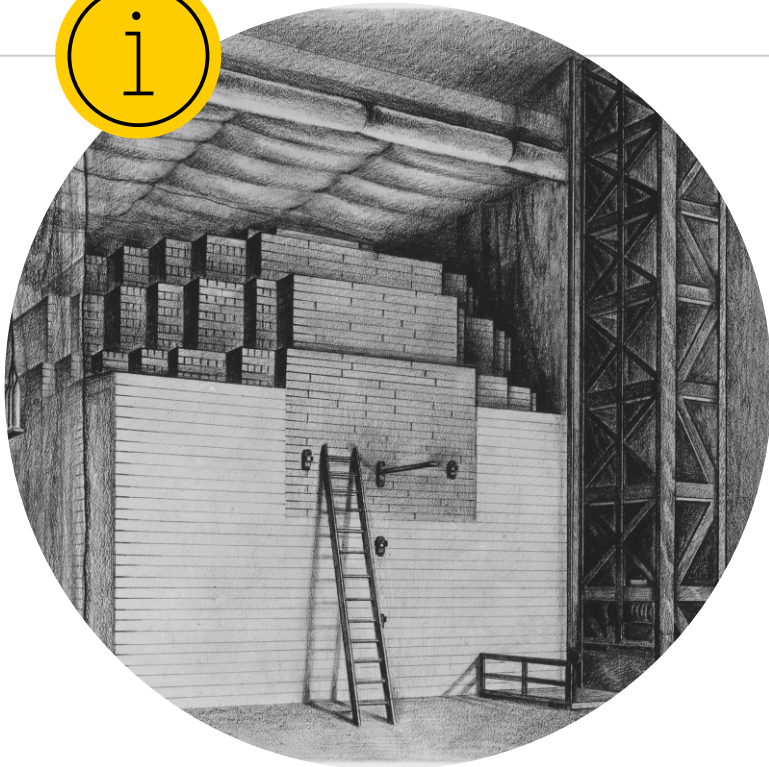


Un tuffo nel passato

Shippingport

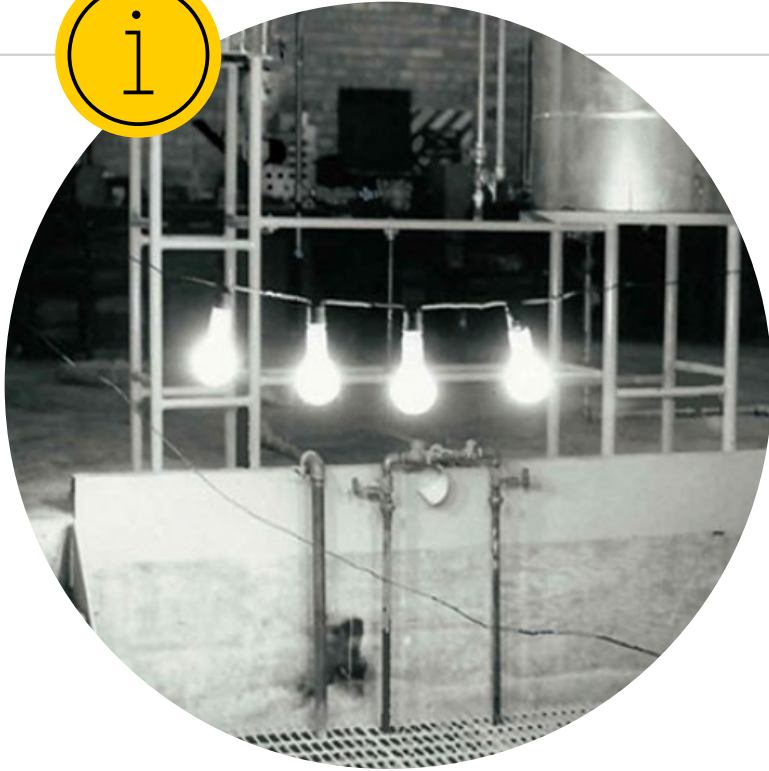
- Stato: USA
- Anno: 1958
- Potenza: 60 MW





È utile ricordare che...

solo pochi anni prima – nel 1942 – Enrico Fermi realizzava il primo reattore nucleare della storia: CP-1. Ben lungi dal produrre energia...



È utile ricordare che...

l'energia elettrica è invece stata prodotta per la prima volta dal reattore EBR-1 nel 1951.



Un po' come dire...

EBR-1



Reattori di Generazione I



2

Generazione II

Reattori commerciali di potenza



Maturità dell'energia nucleare

Sono catalogati di Generazione II tutti i successivi impianti di potenza, caratterizzati da:

- affermazione delle tecnologie più promettenti
- maggiore sicurezza ed affidabilità
- maggiore potenza generata (1000 MW e oltre)



Maturità dell'energia nucleare

Affermazione delle tecnologie più promettenti

Agli albori, svariate tecnologie di reattori sono state concepite e testate, ciascuna distinguendosi per pregi peculiari.

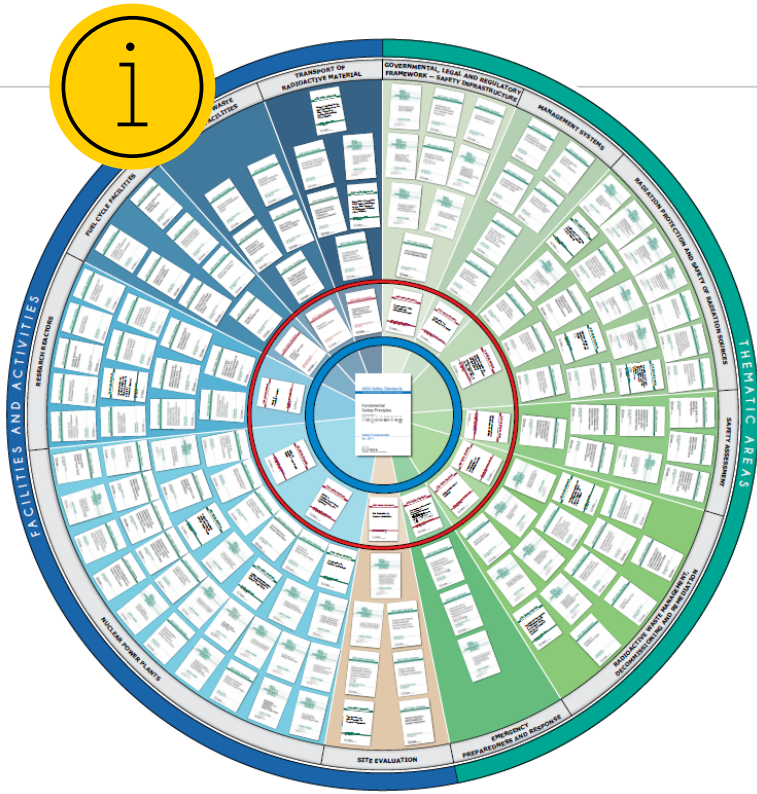
L'espansione dei programmi nucleari, comunque, decretò il netto successo di alcune di queste tecnologie sulle altre, quali la tecnologia dei reattori ad acqua leggera (tanto come reattori pressurizzati – PWR, che bollenti – BWR) e ad acqua pesante (PHWR e CANDU).



Maturità dell'energia nucleare

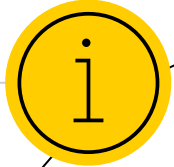
Maggiore sicurezza ed affidabilità

Come in un circolo virtuoso, l'affermazione di poche tecnologie ha consentito di accumulare una esperienza costruttiva ed operativa significativa, grazie alla quale è stato possibile avviare un processo di continuo miglioramento delle performance di sicurezza, anche grazie a sistemi sempre più avanzati, a criteri di progettazione e verifica ben consolidati, ed allo stabilirsi di una vera e propria “cultura della sicurezza”.



È utile sapere che...

uno dei compiti dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) dell'ONU è quello di elaborare e promuovere l'adozione di standard di sicurezza che regolano tutte le attività in ambito nucleare, dalla produzione di energia all'uso medico ed industriale.



IAEA Safety Standards

for protecting people and the environment

Fundamental Safety Principles

Jointly sponsored by

Euratom FAO IAEA ILO IMO OECD/NEA PAHO UNEP WHO



È utile sapere che...

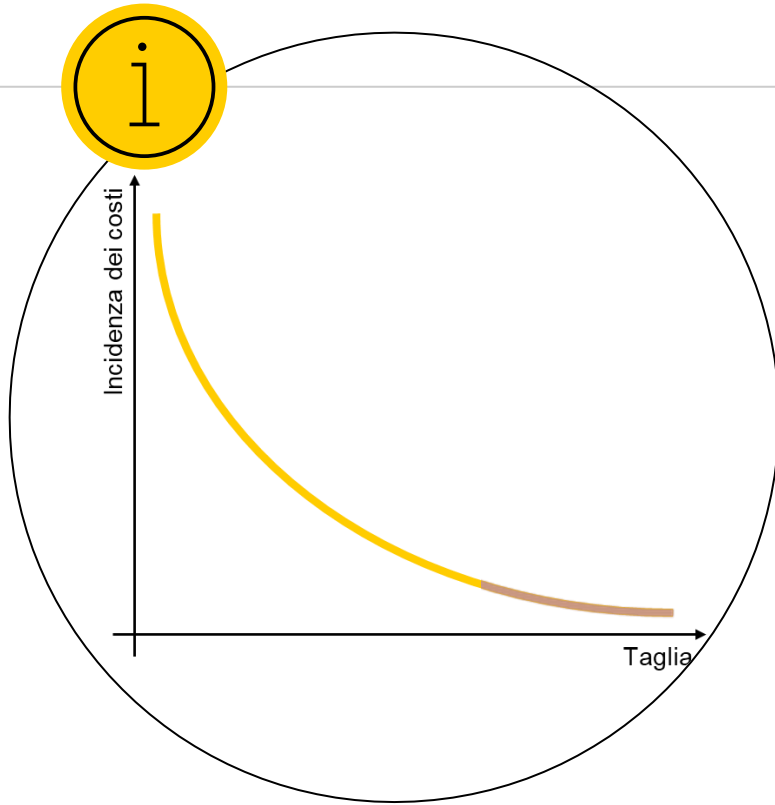
fra le prassi regolamentate dagli standard di sicurezza c'è il processo di autorizzazione alla costruzione ed operazione di qualsiasi impianto in cui sia presente una fonte artificiale di radioattività, dunque anche un impianto per la produzione di energia nucleare.



Maturità dell'energia nucleare

Maggiore potenza generata (1000 MW e oltre)

Grazie all'esperienza accumulata, ed in virtù delle migliori performance di sicurezza, è stato possibile realizzare impianti di taglia sempre maggiore, consentendo così di passare dagli iniziali pochi MW (addirittura solo 5, ad Obninsk) ad oltre 1000 (1300 nei reattori francesi «N4» di Framatome o 1400 nei reattori tedeschi «Konvoi» di Siemens, entrambi di tipo PWR).



È utile sapere che...

l'aumento della taglia fa leva sulla cosiddetta “economia di scala”, ovvero sulla diluizione dei costi fissi di realizzazione sulla maggior quantità di energia prodotta.

Questo ha reso i reattori di Generazione II tra i sistemi più economici mai esistenti.



Maturità dell'energia nucleare

I reattori di Generazione II sono stati realizzati fra la metà degli anni '60 e la metà degli anni '90.

Mentre tutti i reattori di Generazione I sono stati smantellati, la quasi totalità dei reattori oggi in funzione nel mondo (oltre 400) sono di Generazione II.



Un tuffo nel passato

Trino Vercellese

- Stato: Italia
- Anno: 1965
- Potenza: 260 MW
 - all'epoca, il più potente al mondo
 - con l'impianto di Trino, l'Italia si attesta come 3° produttore al mondo di energia elettronucleare



3

Generazione III

Reattori avanzati ad acqua



Ottimizzazione dei sistemi

Sono catalogati di Generazione III tutti gli impianti di potenza originati, facendo leva sull'esperienza accumulata, dall'ottimizzazione dei reattori di tecnologia più promettente:

- reattori ad acqua leggera (PWR e BWR)
- reattori ad acqua pesante (PHWR)



Ottimizzazione dei sistemi

Aree di ottimizzazione:

- efficienza d'uso del combustibile
- rendimento termico
- sistemi di sicurezza (in particolare, passivi)
- standardizzazione del design



Sistemi di sicurezza

Attivi

Si basano su azioni eseguite dai sistemi di monitoraggio o dagli operatori, che ne determinano l'attuazione e l'operazione.

Passivi

Si basano su principi fisici (es. gravità, circolazione naturale) così che non sia necessaria alcuna azione per determinarne l'attuazione e/o l'operazione.

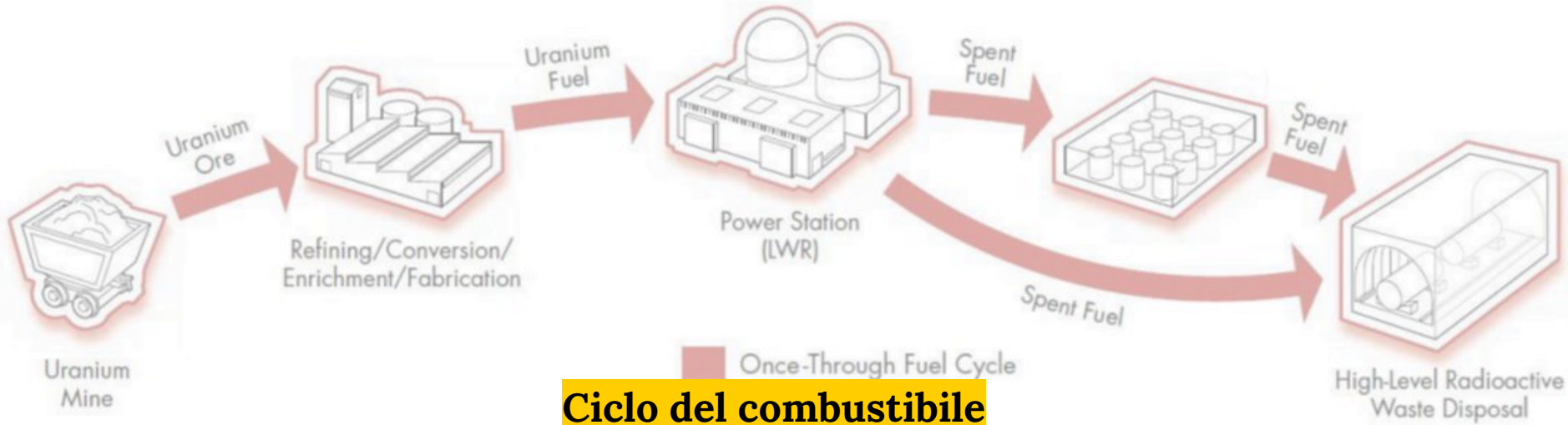


Uno sguardo al presente

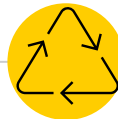
Olkiluoto 3

- Stato: Finlandia
- Anno: 2022
- Potenza: 1600 MW





Ciclo del combustible





Il ciclo del combustibile



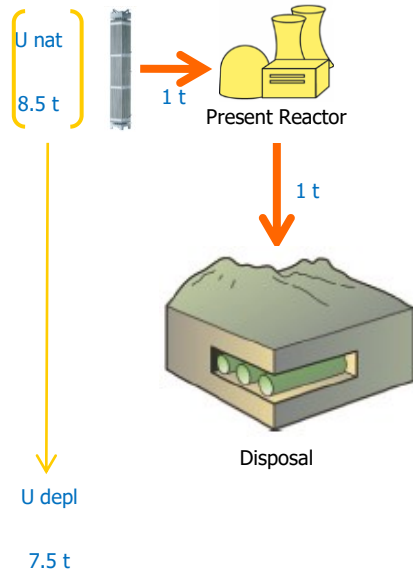
Uranium
Mine



Once-Through Fuel Cycle

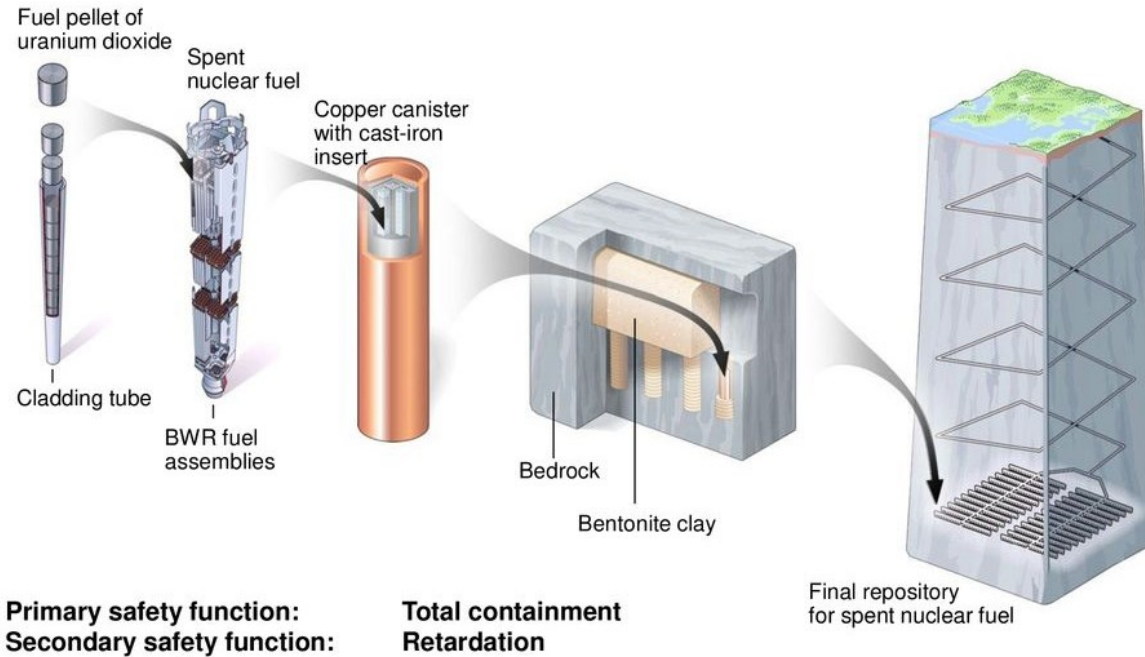


Il ciclo del combustibile





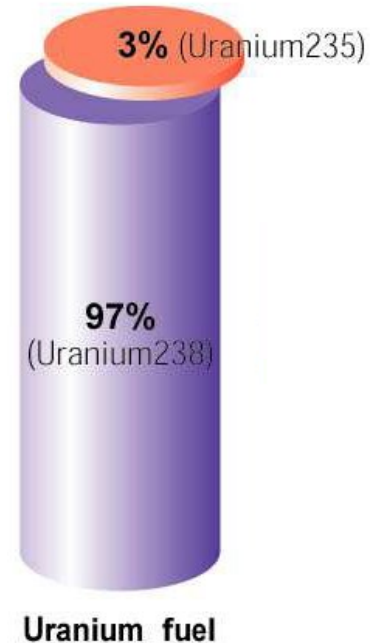
Il ciclo del combustibile





Il combustibile fresco

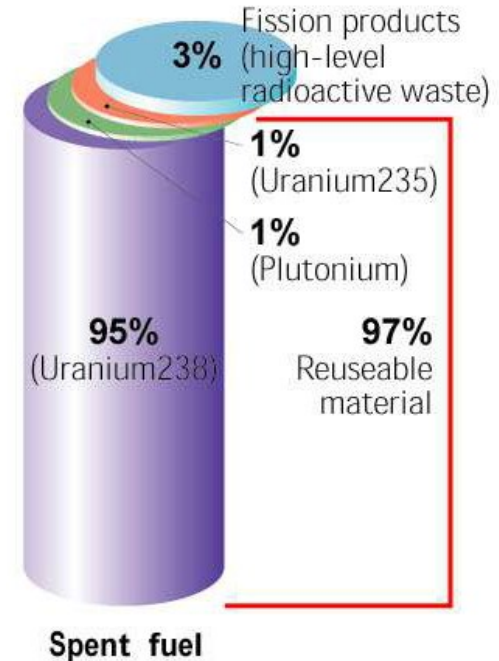
- La componente pregiata del combustibile (il fissile, l'isotopo 235 dell'Uranio) rappresenta pochi per cento del totale (3 ÷ 5%)
- Il resto è rappresentato dall'altro isotopo (non fissile) dell'Uranio, l'isotopo 238





Il combustibile esausto

- Allo scarico una percentuale (3 ÷ 5%) circa pari al fissile inizialmente caricato è rappresentata dalle ceneri della fissione
- Tipicamente è presente ancora una quota (-1%) di fissile non sfruttato
- È inoltre generato un quantitativo (-1%) di altri attinidi, il principale dei quali è il Plutonio
- Il resto è sempre Uranio 238



The European Green Deal

#EUGreenDeal

Nucleare e tassonomia verde





Green Deal

Obiettivo generale:

condurre l'Europa ad essere il primo continente "climate neutral" entro il 2050, col risultato di un ambiente più pulito, energia più accessibile, trasporti più "smart", nuovi posti di lavoro e, complessivamente, una miglior qualità della vita.



Green Deal

Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, tutte le tecnologie «verdi» sono chiamate a contribuire.

A supporto del loro sviluppo, la Commissione Europea ha definito un piano di supporto finanziario, accessibile a quelle tecnologie mappate nella «tassonomia sostenibile».



JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT

Technical assessment of nuclear energy
with respect to the 'do no significant
harm' criteria of Regulation (EU)
2023/1774 "Taxonomy Regulation"

È utile sapere che...

per uscire dallo stallo di un dibattito politico in merito al nucleare la Commissione Europea ha commissionato al JRC uno [studio tecnico](#) sulla capacità del nucleare di rispettare il criterio di «do not significant harm» all'ambiente ed alla popolazione.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125953>



JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT

Technical assessment of nuclear energy
with respect to the 'do no significant
adverse impacts' criteria of Regulation (EU)
2020/852 "Taxonomy Regulation"

È utile sapere che...

la conclusione del rapporto è che
«l'analisi dettagliata dell'impatto del
nucleare nelle varie fasi del suo
ciclo di vita [...] non ha rivelato
alcuna evidenza scientifica che rechi
maggiore danno alla salute o
all'ambiente di altre tecnologie di
produzione di elettricità già incluse
nella Tassonomia».



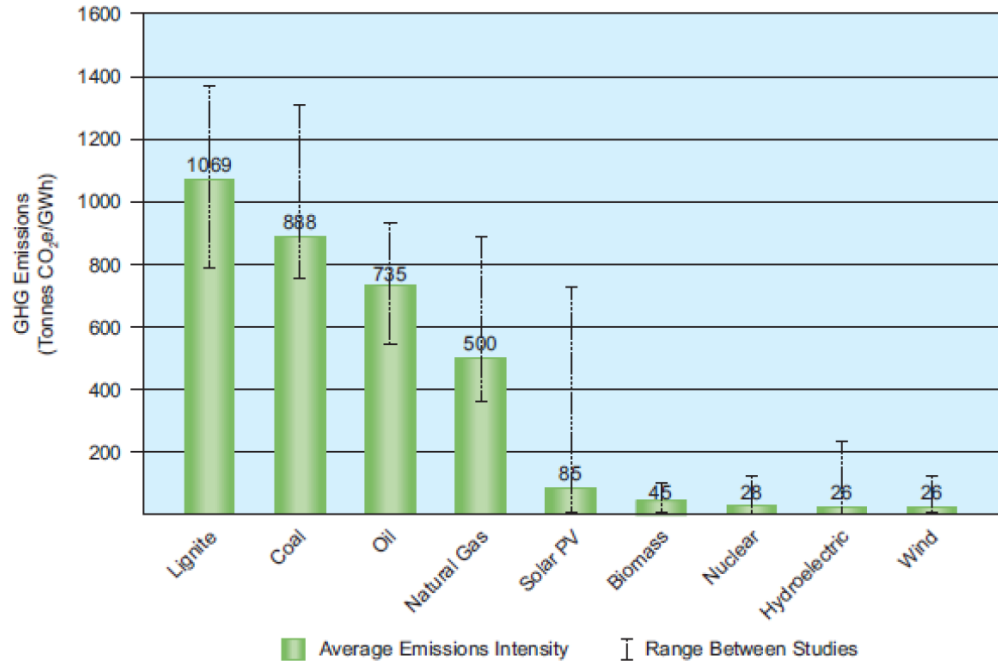
Aspetti analizzati dal JRC

- Emissioni
 - gas climalteranti
 - gas tossici o acidificanti
 - particolato
 - effluenti



Aspetti analizzati dal JRC

Emissioni di gas
climalteranti





Aspetti analizzati dal JRC

● Emissioni

- gas climalteranti
- gas tossici o acidificanti
- particolato
- effluenti

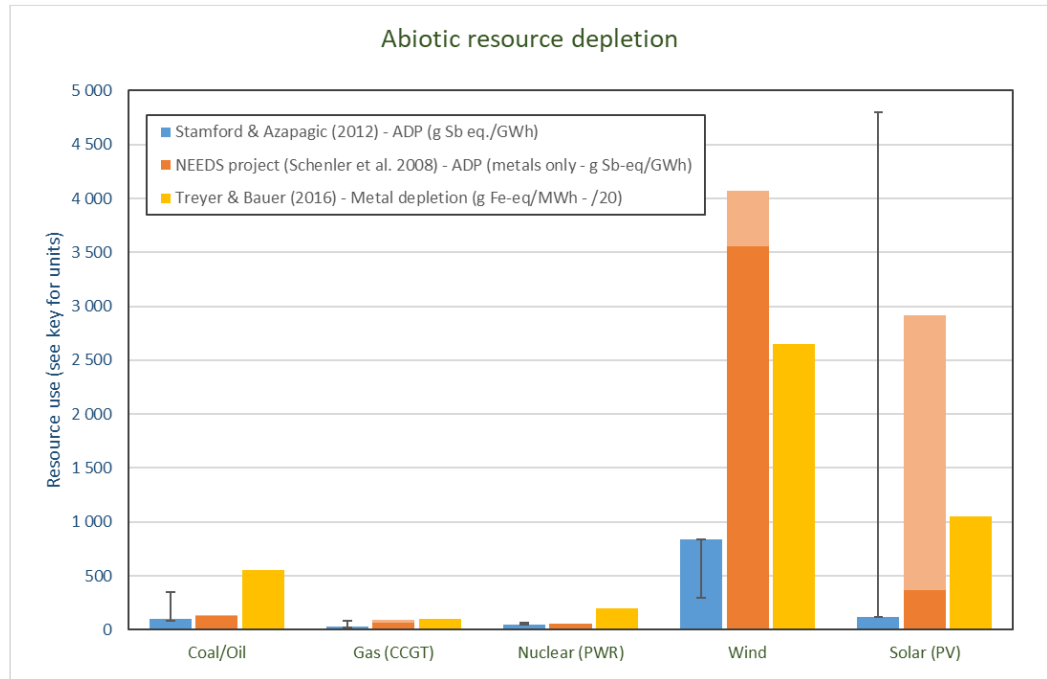
● Uso di risorse

- suolo
- abiotiche (in particolare, risorse fossili)



Aspetti analizzati dal JRC

Potenziale di depauperamento delle risorse abiotiche





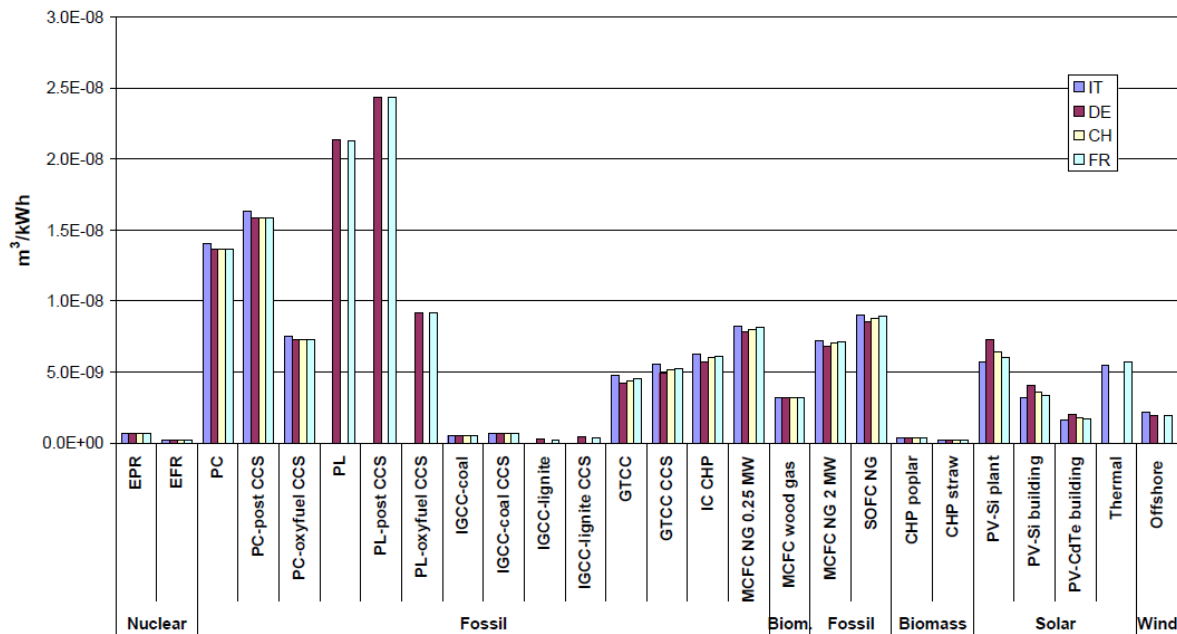
Aspetti analizzati dal JRC

- Produzione di rifiuti
 - chimici
 - radioattivi



Aspetti analizzati dal JRC

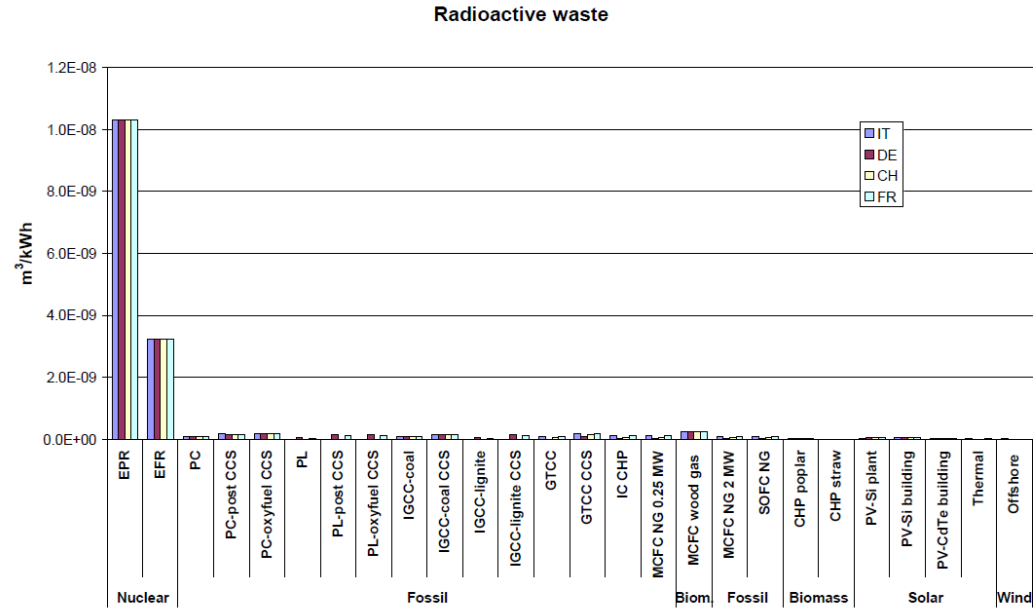
Produzione
di rifiuti
chimici





Aspetti analizzati dal JRC

Produzione di rifiuti radioattivi





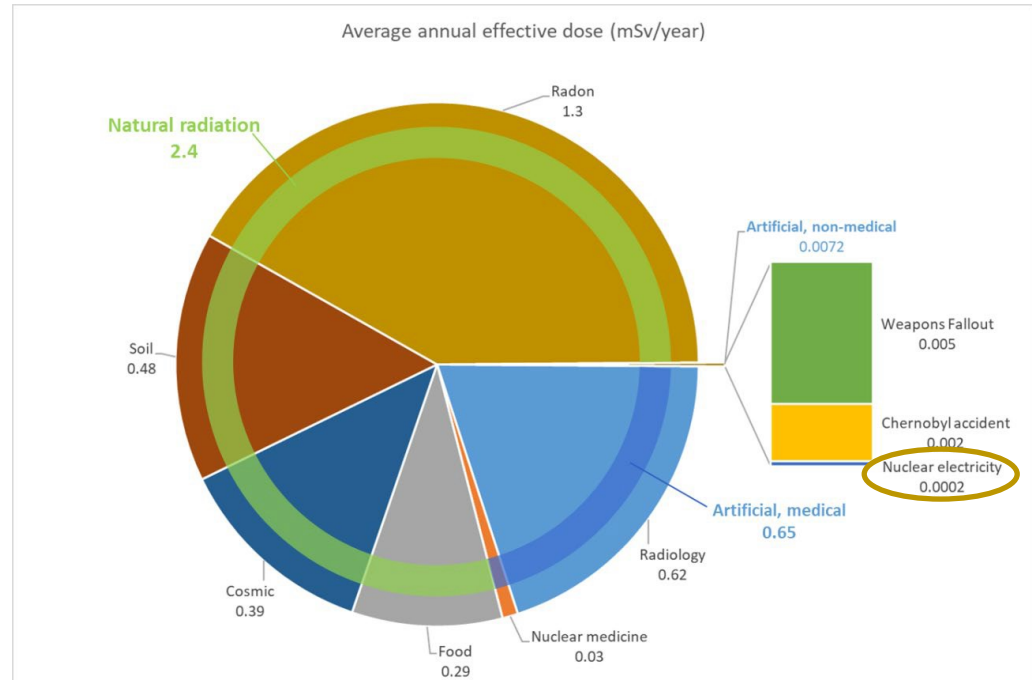
Aspetti analizzati dal JRC

- Produzione di rifiuti
 - chimici
 - radioattivi
- Emissione di radiazioni



Aspetti analizzati dal JRC

Dose effettiva annuale dall'intero ciclo di vita

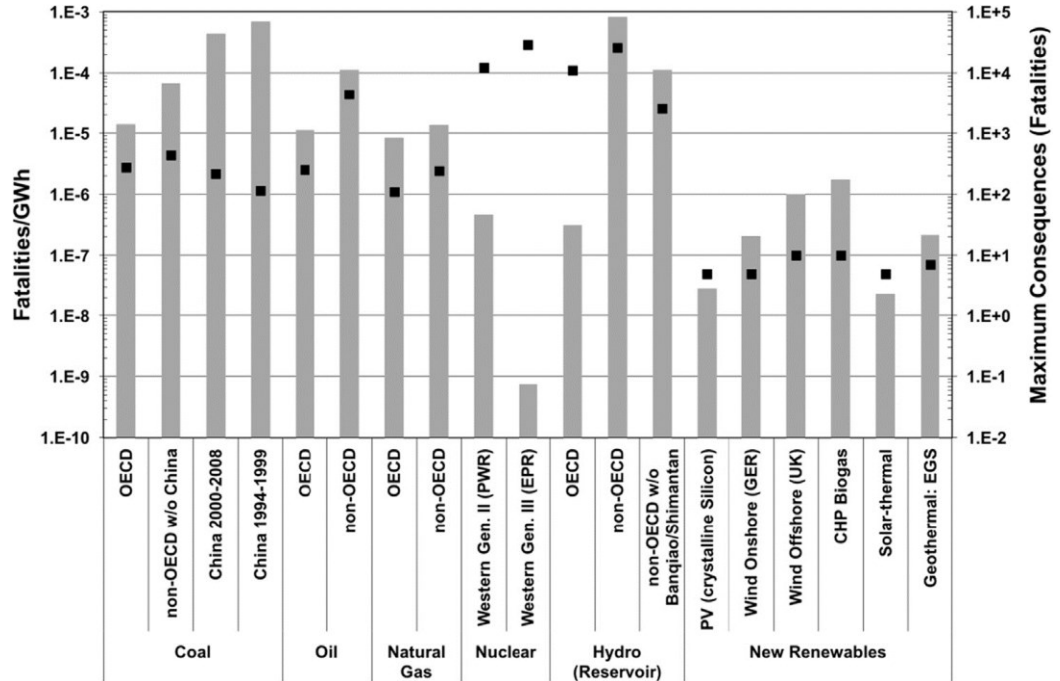




Aspetti analizzati dal JRC

Fatalità legate al
più grave
incidente
ipotizzabile

- per evento
- per unità di
energia
prodotta





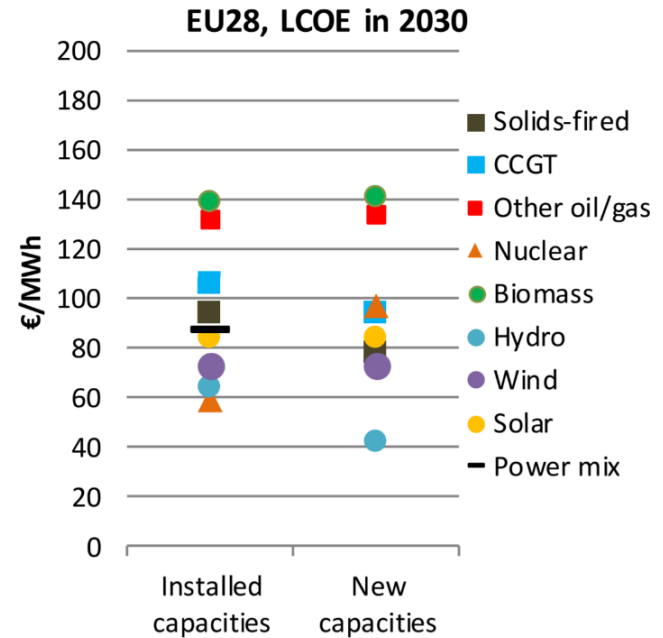
Aspetti analizzati dal JRC

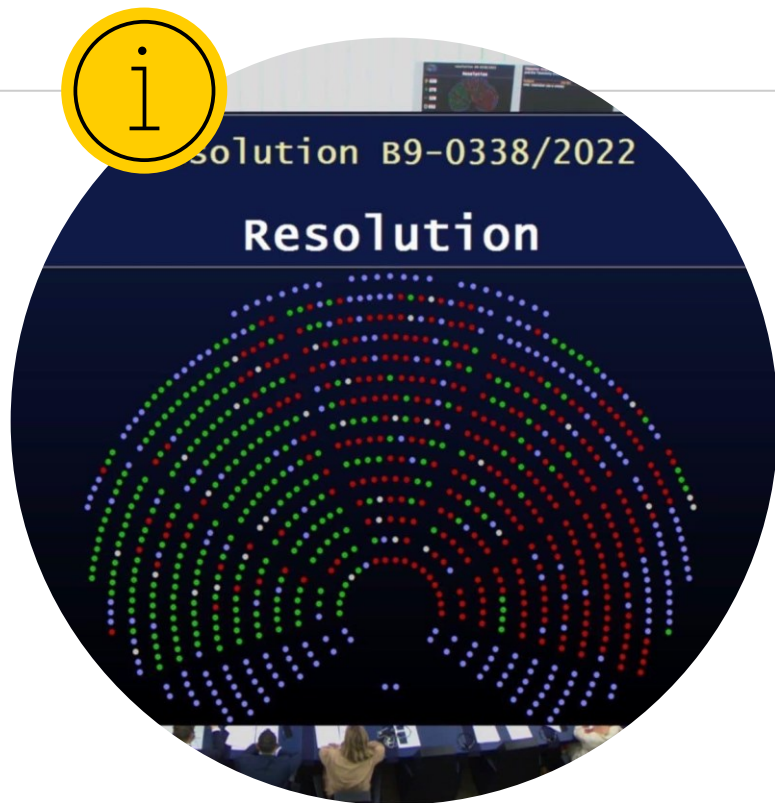
- Produzione di rifiuti
 - chimici
 - radioattivi
- Emissione di radiazioni
- Costo di generazione
 - impianti attuali
 - impianti futuri



Aspetti analizzati dal JRC

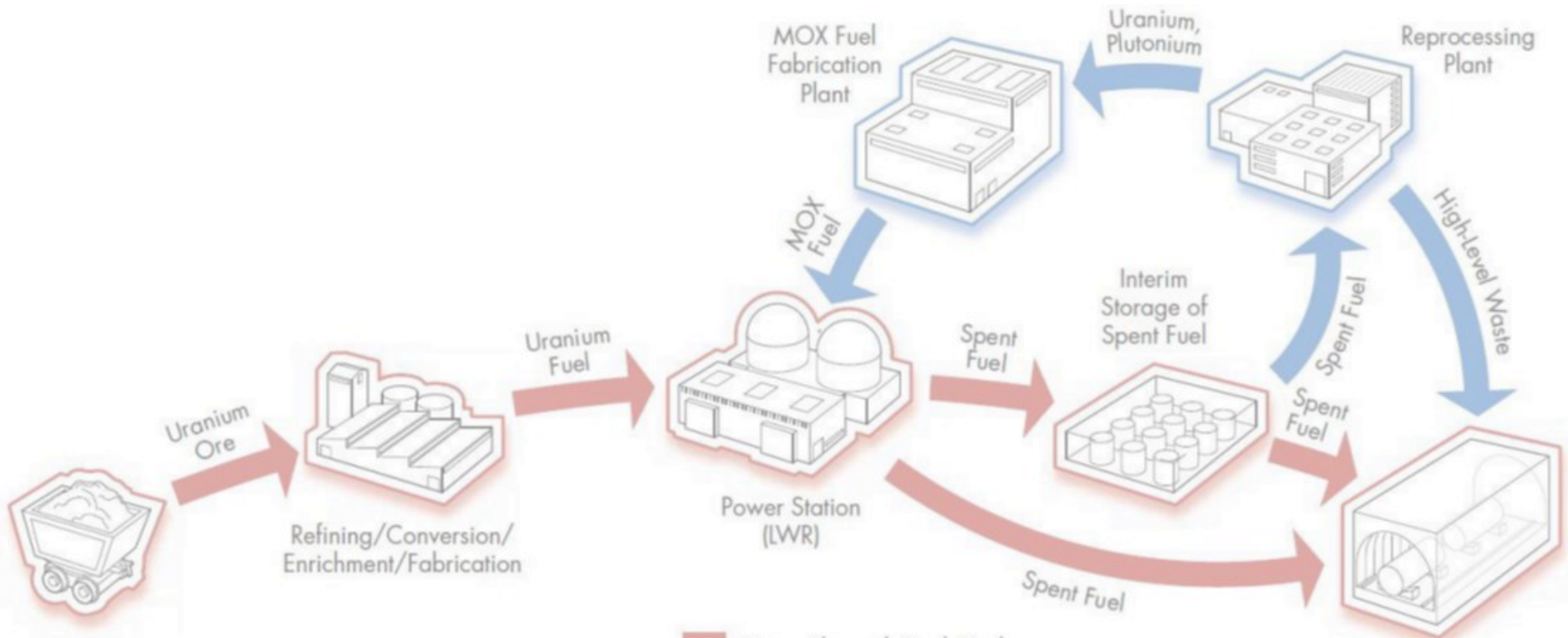
Costo di generazione dell'elettricità da impianti attuali e futuri





È utile sapere che...

mercoledì scorso (6 luglio) il Parlamento Europeo ha respinto la mozione per emendare l'atto delegato della Commissione Europea, che dunque è approvato nella sua interezza includendo il nucleare nella Tassonomia della Finanza Sostenibile.



Once-Through Fuel Cycle

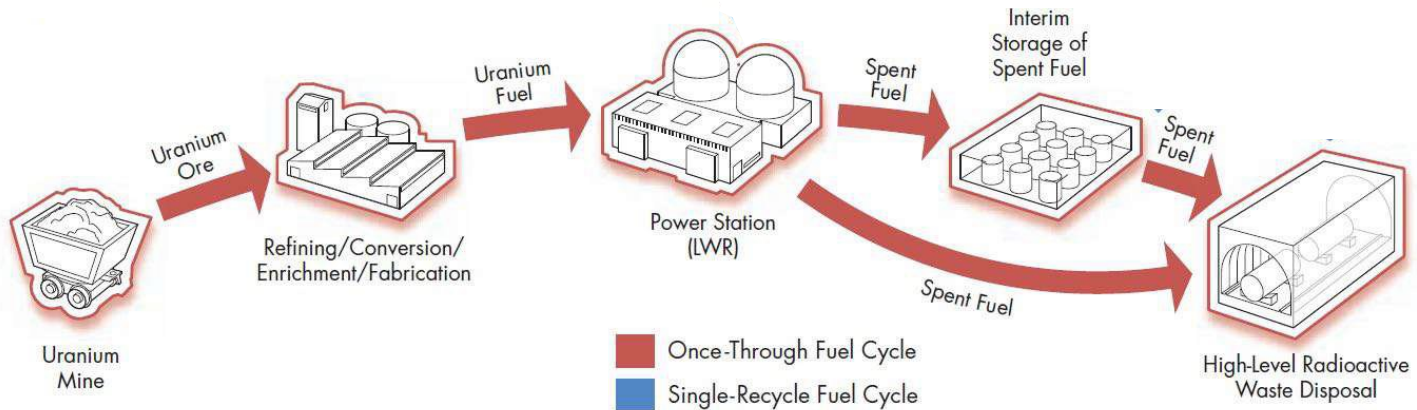
Chiusura del ciclo

Cycle



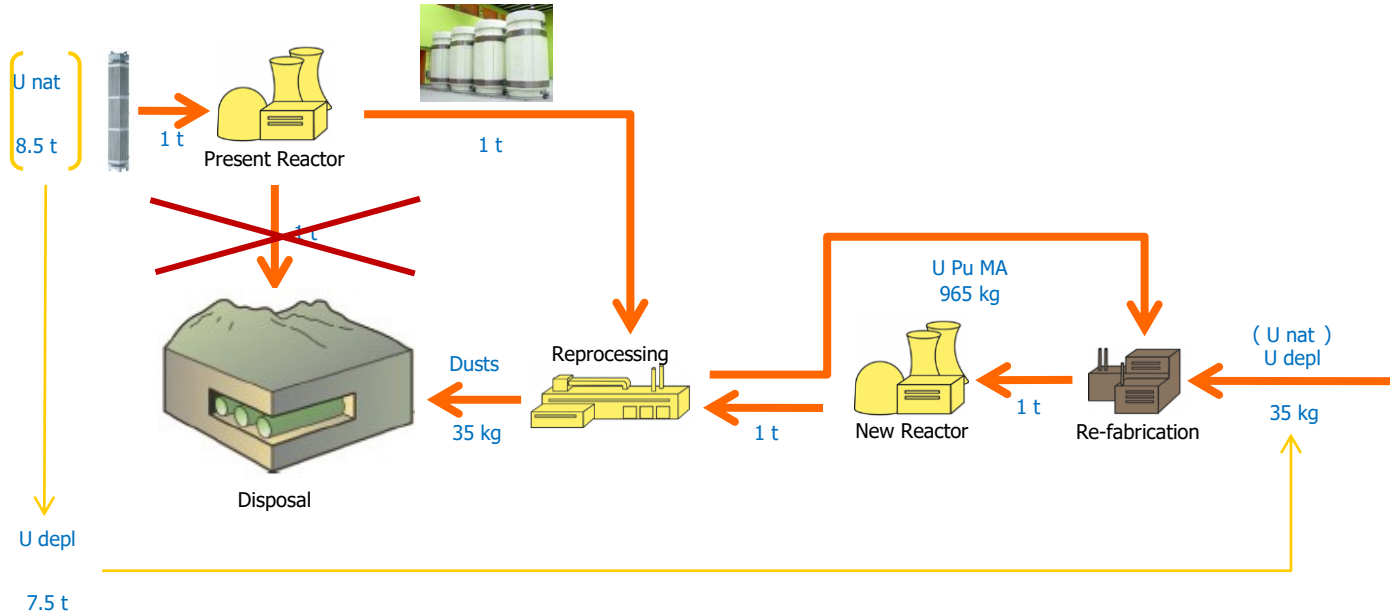


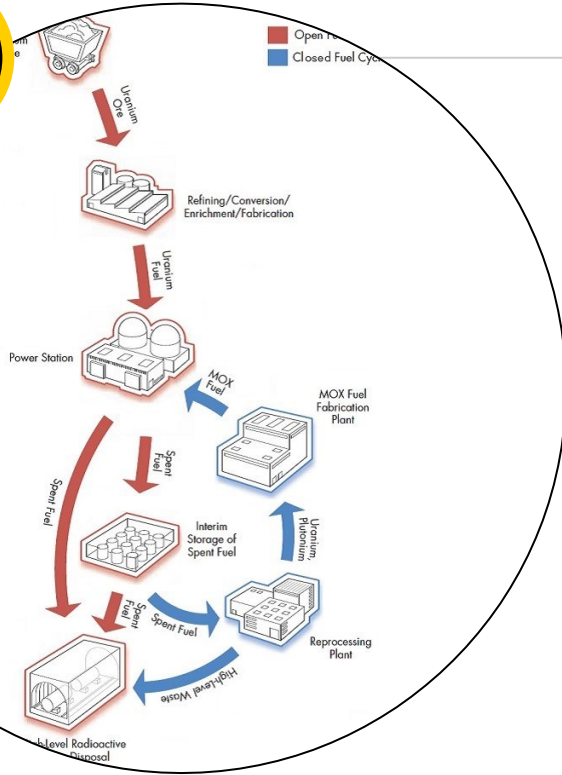
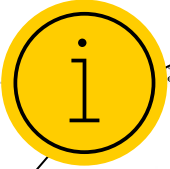
Chiusura del ciclo





Chiusura del ciclo





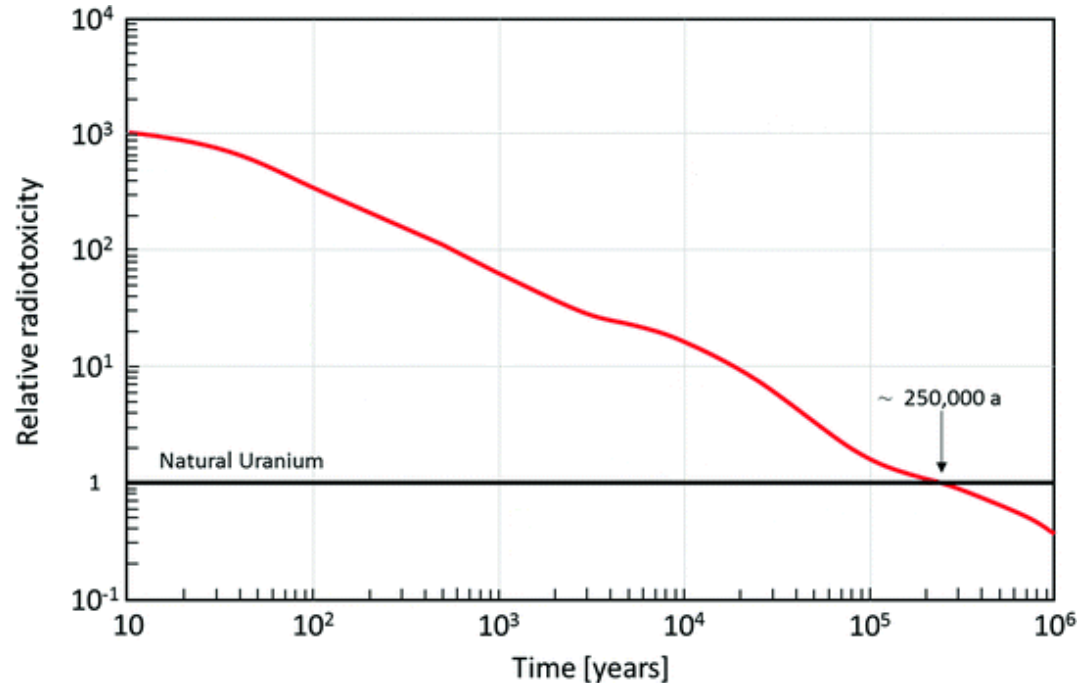
È utile sapere che...

per operare in ciclo chiuso, un reattore deve sfruttare i neutroni «veloci» così da poter fare «breeding», ossia generare nuovo combustibile ad un rateo uguale (o anche superiore) a quello al quale viene bruciato



Maggiore sostenibilità

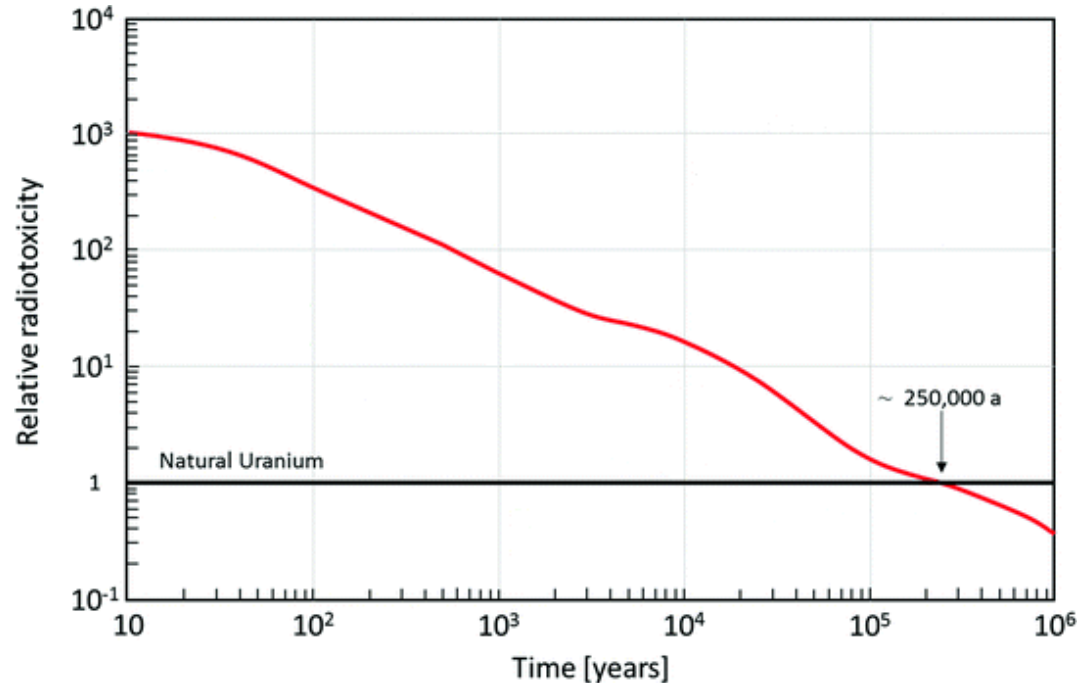
Pur essendo piccoli i volumi, dunque semplice la gestione, la radiotossicità del combustibile ritorna ai livelli della miniera dopo centinaia di migliaia di anni.





Maggiore sostenibilità

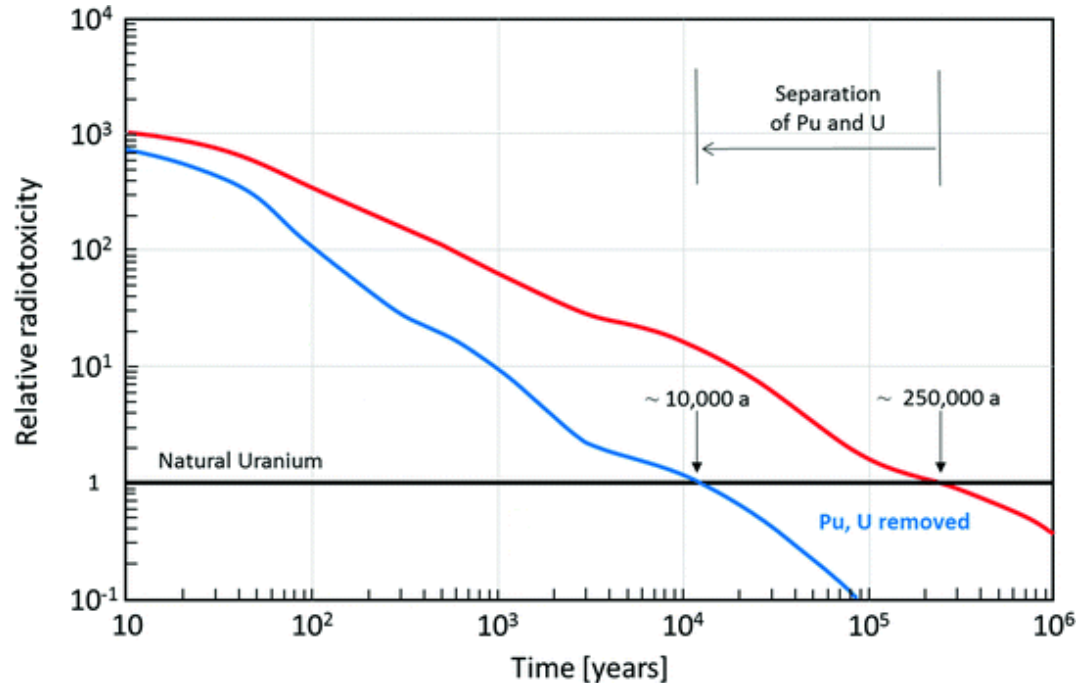
I reattori attuali inoltre non bruciano tutto il combustibile caricato. Nel combustibile esausto, dunque, vi sono ancora materiali di valore.





Maggiore sostenibilità

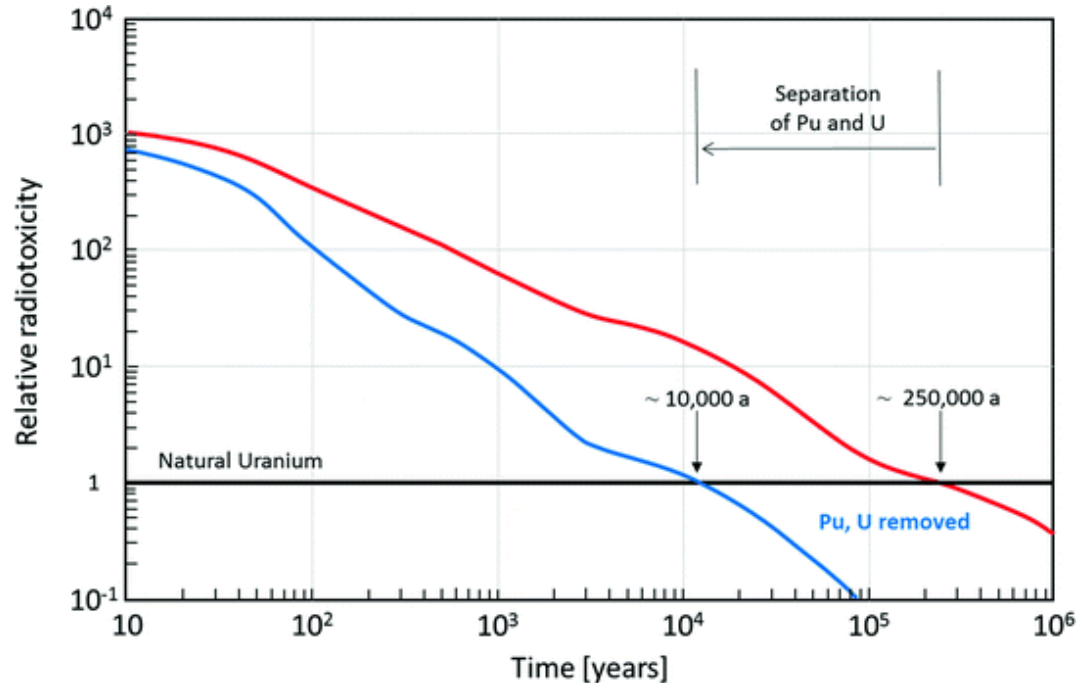
Alcune nazioni attuano il riprocessamento per recuperare alcuni materiali di valore (la maggior parte) e riutilizzarli in reattore.





Maggiore sostenibilità

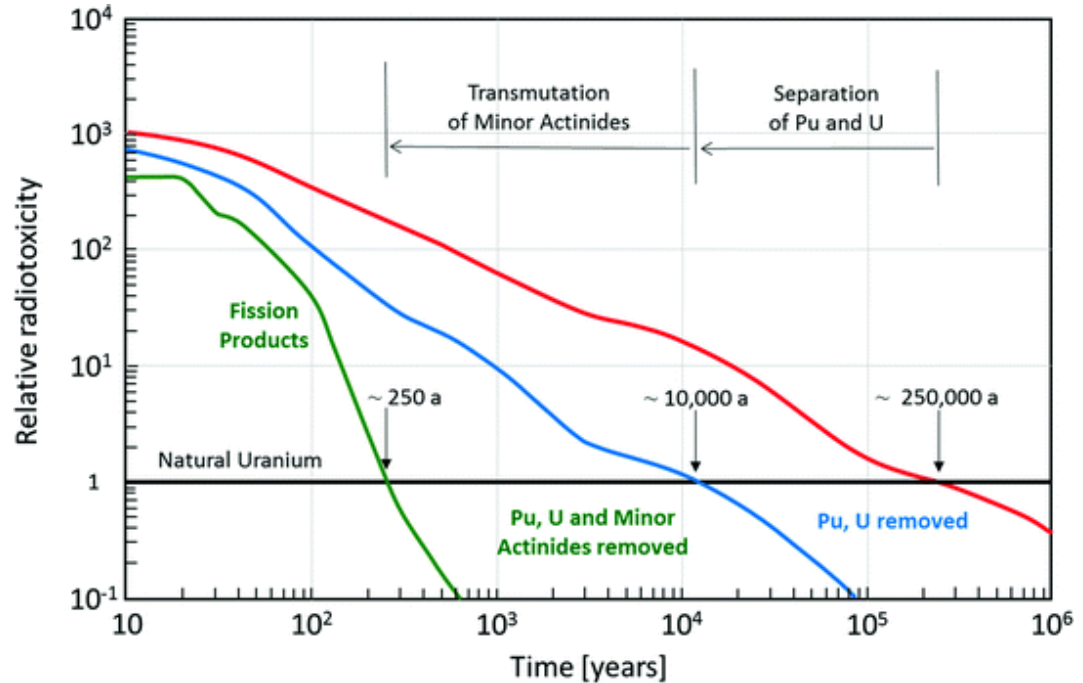
Così facendo, la parte non recuperata del combustibile esausto, oltre ad essere meno in quantità, ha anche una più breve radiotossicità.





Maggiore sostenibilità

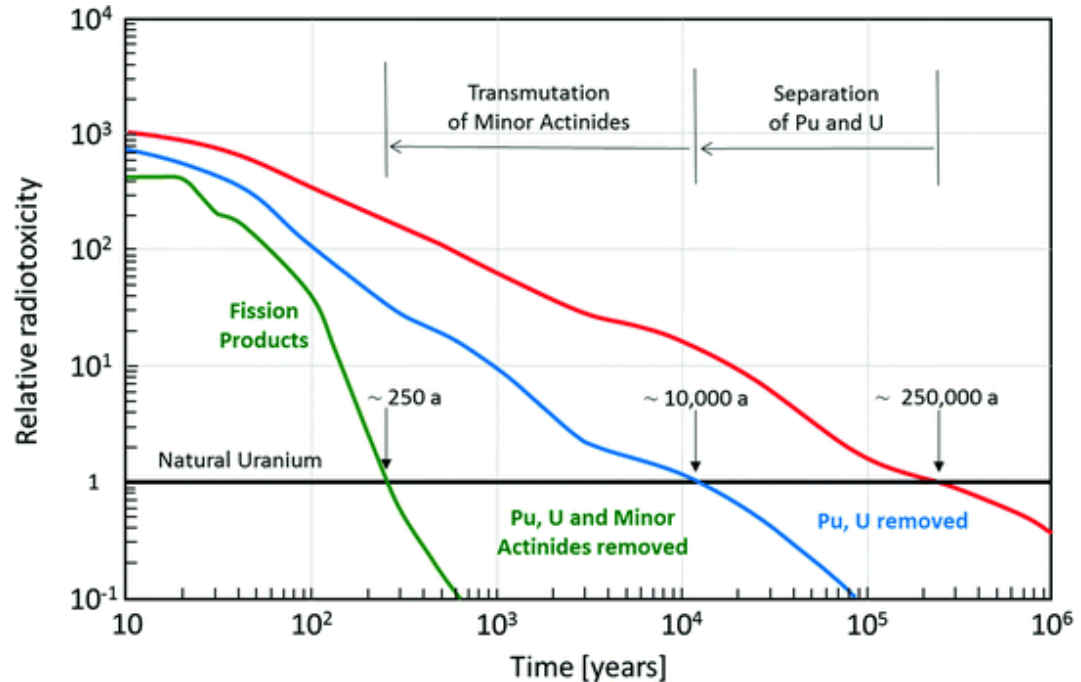
Solo i neutroni a spettro veloce possono riutilizzare tutti i materiali di valore presenti nel combustibile esausto.

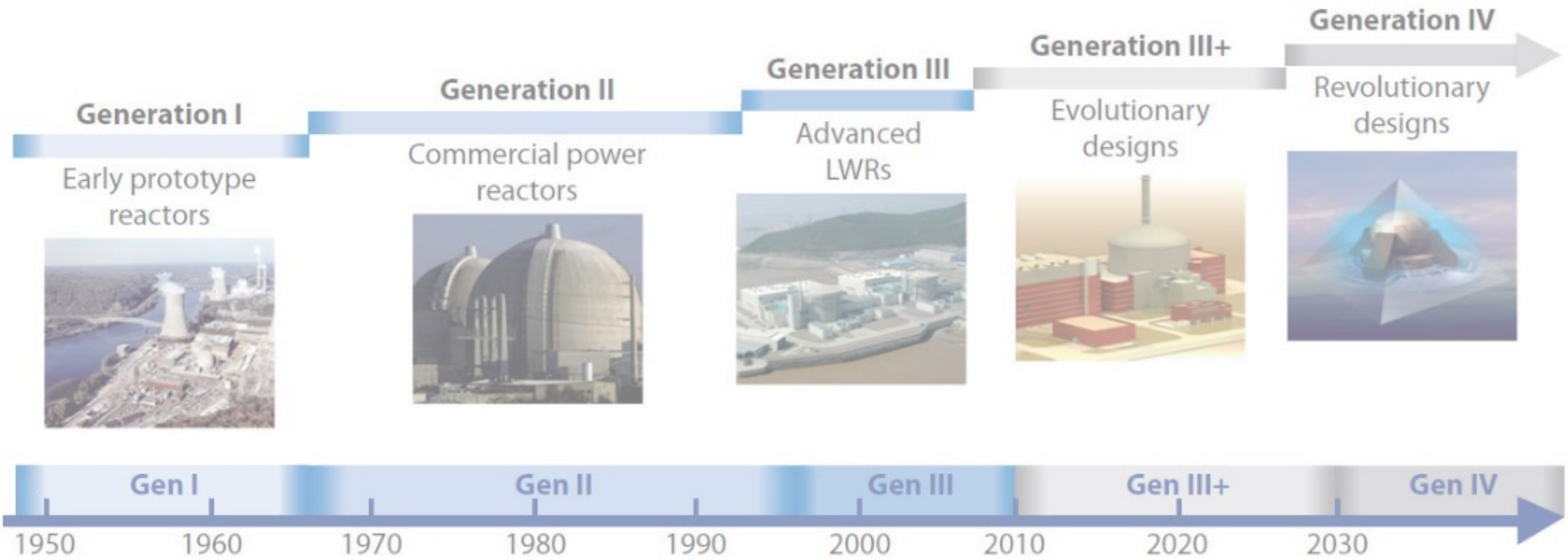




Maggiore sostenibilità

In questo modo, la parte non recuperata non solo è la minima possibile (le sole «ceneri» della fissione), ma ha anche un tempo di sorveglianza molto inferiore.





Le prossime “Generazioni”



3½

Generazione III+

Concetti evolutivi



Evoluzione dei sistemi

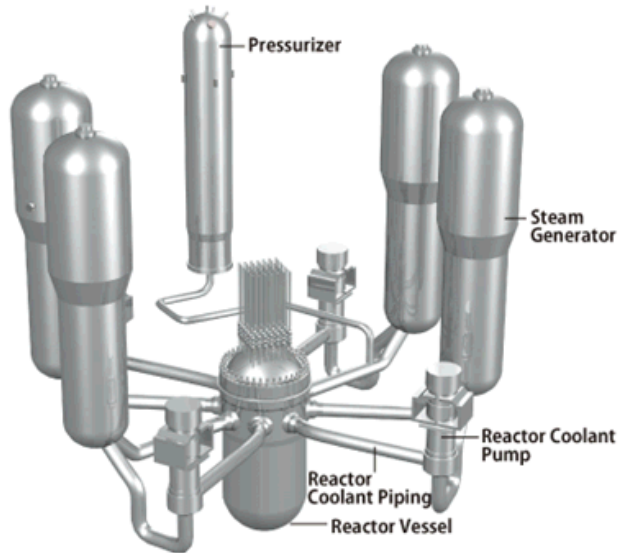
Sono catalogati di Generazione III+ tutti gli impianti di potenza per i quali l'ottimizzazione dei reattori (già operata per quelli di Generazione III) è stata spinta ancora oltre.

È questo il caso, ad esempio, dei reattori piccoli e modulari (SMR) ad acqua.

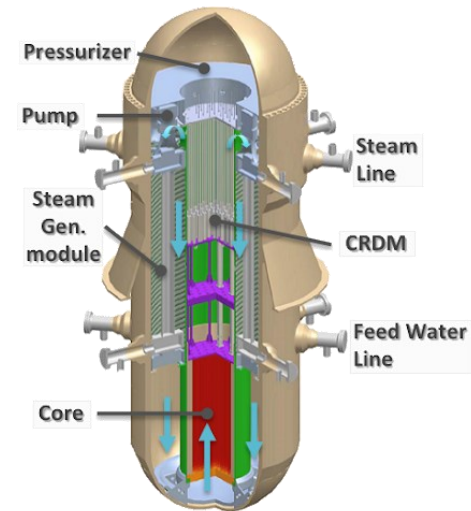


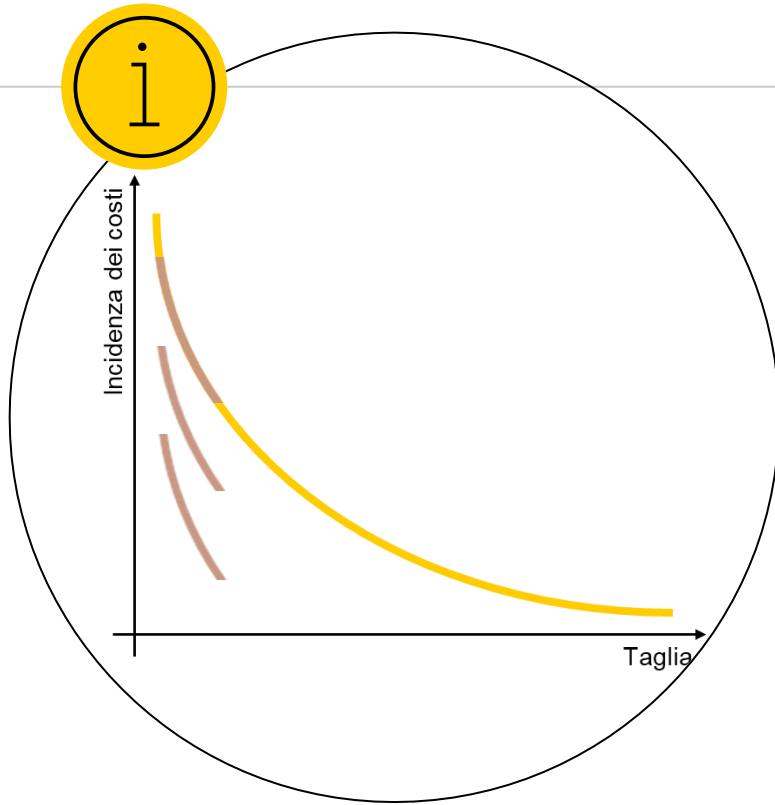
PWR

Tradizionale



SMR integrato





È utile sapere che...

la piccola taglia fa venire meno l'economia di scala, necessitando di altre vie per la competitività economica:

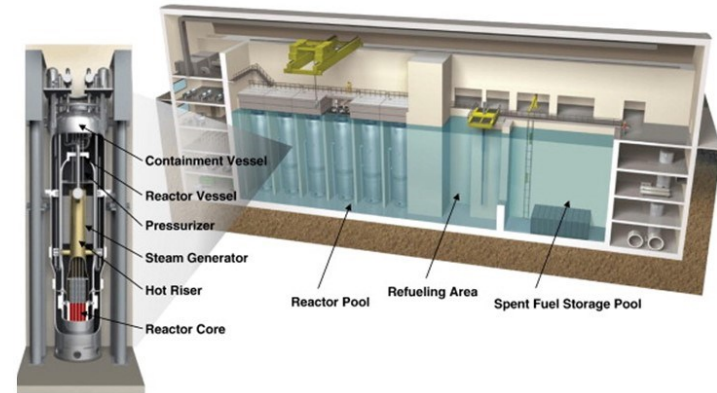
- modularizzazione
- produzione in fabbrica
- fabbricazione in serie



Cosa bolle in pentola

NuScale Power Module™

- Anno: (2025–30)
- Potenza: 40 MW



4

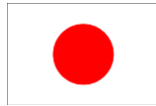
Generazione IV

Concetti rivoluzionari



La visione per il futuro

Nei primi anni 2000, un gruppo di 100 esperti da 10 nazioni diverse hanno dato vita al Generation-IV International Forum (GIF) per discutere su quali caratteristiche dovranno avere gli impianti nucleari per incontrare le necessità delle società del futuro.





La visione per il futuro

A valle della discussione sono stati elaborati 8 obiettivi essenziali, articolati sulle quattro aree fondamentali di

- sicurezza ed affidabilità
- sostenibilità
- economicità
- resistenza alla proliferazione e protezione fisica



Sicurezza e affidabilità

1

L'esercizio dei sistemi di Generazione IV dovrà eccellere in sicurezza ed affidabilità.

2

I sistemi di Generazione IV dovranno avere una bassissima probabilità e grado di danneggiamento del nocciolo.

3

I sistemi di Generazione IV dovranno eliminare la necessità di un piano di emergenza fuori dal sito nucleare.



Sostenibilità

1

I sistemi di Generazione IV dovranno assicurare una generazione sostenibile di energia che incontri gli obiettivi di qualità dell'aria ed un uso efficiente del combustibile per una produzione su scala mondiale.

2

I sistemi di Generazione IV dovranno minimizzare e gestire i loro rifiuti nucleari ed in particolare ridurre l'onere di gestione a lungo termine, migliorando così la protezione della salute pubblica e dell'ambiente.



Economicità

1

I sistemi di Generazione IV dovranno avere un chiaro vantaggio sull'intero ciclo di vita rispetto ad altre fonti energetiche.

2

I sistemi di Generazione IV dovranno avere un livello di rischio finanziario comparabile a quello di altri progetti energetici.



Resistenza alla proliferazione e protezione fisica

1

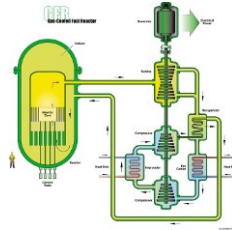
I sistemi di Generazione IV dovranno incrementare la garanzia di essere molto poco attraenti e la via meno desiderabile per la diversione o il furto di materiali utilizzabili per le armi, e fornire una protezione fisica maggiore contro atti di terrorismo.



I sei concetti identificati

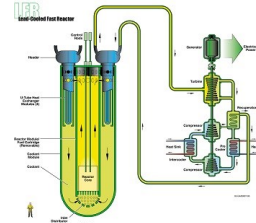
GFR

Gas-cooled
Fast Reactor



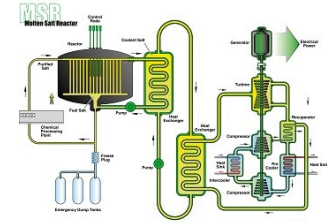
LFR

Lead-cooled
Fast Reactor



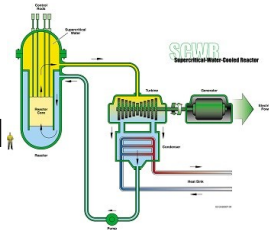
MSR

Molten
Salt
Reactor



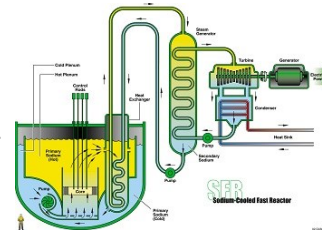
SCWR

Supercritical
Water
Reactor



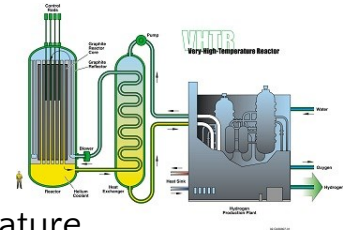
SFR

Sodium-cooled
Fast
Reactor



VHTR

Very-High
Temperature
Reactor





Tra visione e realtà

Reattori di Generazione IV sono ancora ovunque in fase di progettazione, con la sola eccezione di BREST, il primo al mondo, di tipo LFR, in costruzione in Russia. L'entrata in funzione è prevista per il 2026, insieme a tutte le fabbriche annesse per la chiusura del ciclo del combustibile.



Cosa verrà poi

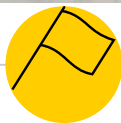
BREST-OD-300

- Anno: (2026)
- Potenza: 300 MW



ENEA

Il contributo italiano

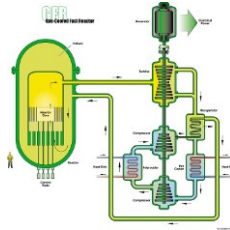




I sei concetti identificati

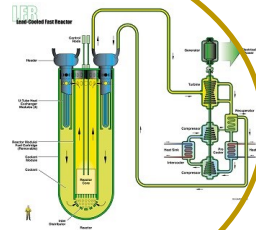
GFR

Gas-cooled
Fast Reactor



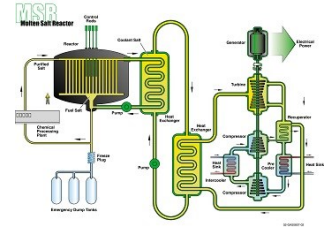
LFR

Lead-cooled
Fast Reactor



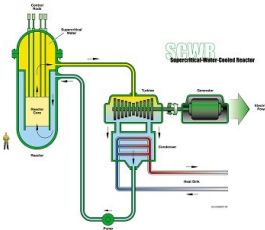
MSR

Molten
Salt
Reactor



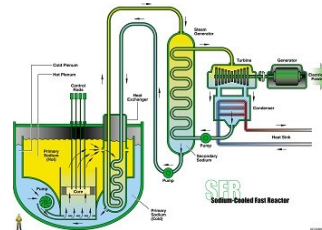
SCWR

Supercritical
Water
Reactor



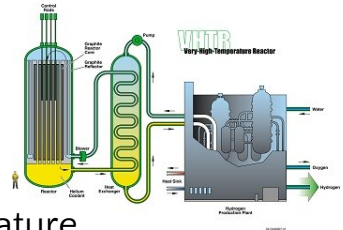
SFR

Sodium-cooled
Fast
Reactor



VHTR

Very-High
Temperature
Reactor





Primi studi

In Europa, le prime ricerche sulla tecnologia degli LFR risalgono agli anni '90, con un ruolo fondamentale di ENEA.

Furono infatti costruite a Brasimone le prime installazioni sperimentali su cui fu possibile iniziare a studiare la tecnologia.



Primi studi

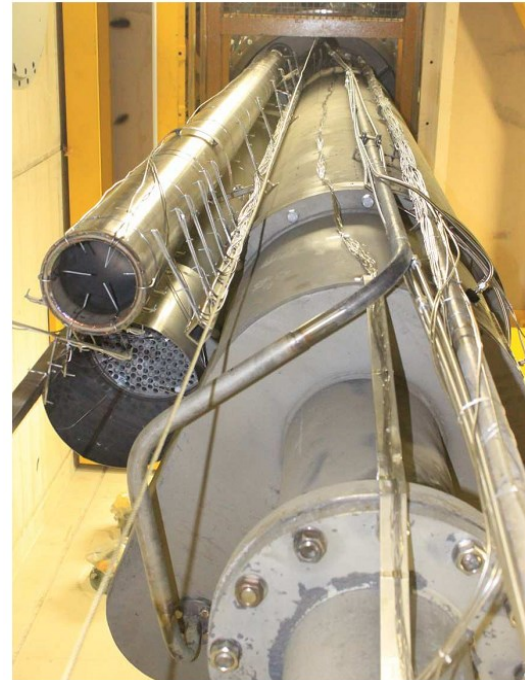
- ◎ LECOR
un circuito a piombo
fuso per prove di
corrosione sui materiali





Primi studi

- CIRCE
una grande piscina di eutettico piombo-bismuto fuso (fino a pochi anni fa, la più grande al mondo) per prove di termoidraulica e di comportamento di componenti





Costituzione di un sistema

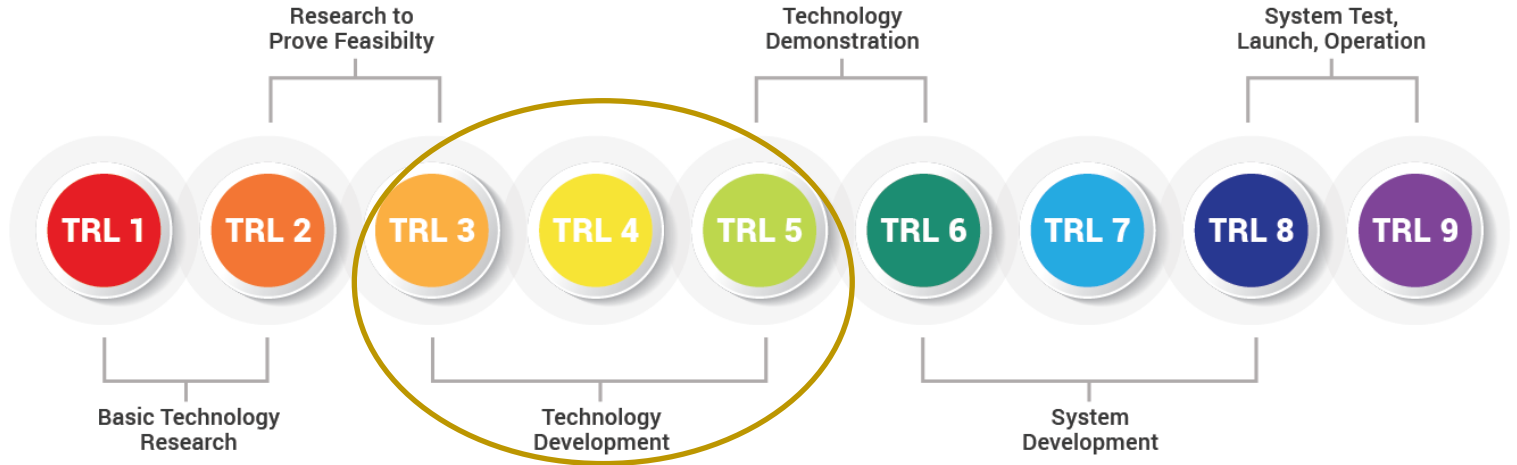
Sotto la spinta propulsiva dell'ENEA, tutte le principali organizzazioni nazionali del settore – dall'università all'industria – si sono unite in un sistema nazionale, e hanno fatto passi da gigante sulla tecnologia dei metalli liquidi pesanti.





Risultati ottenuti

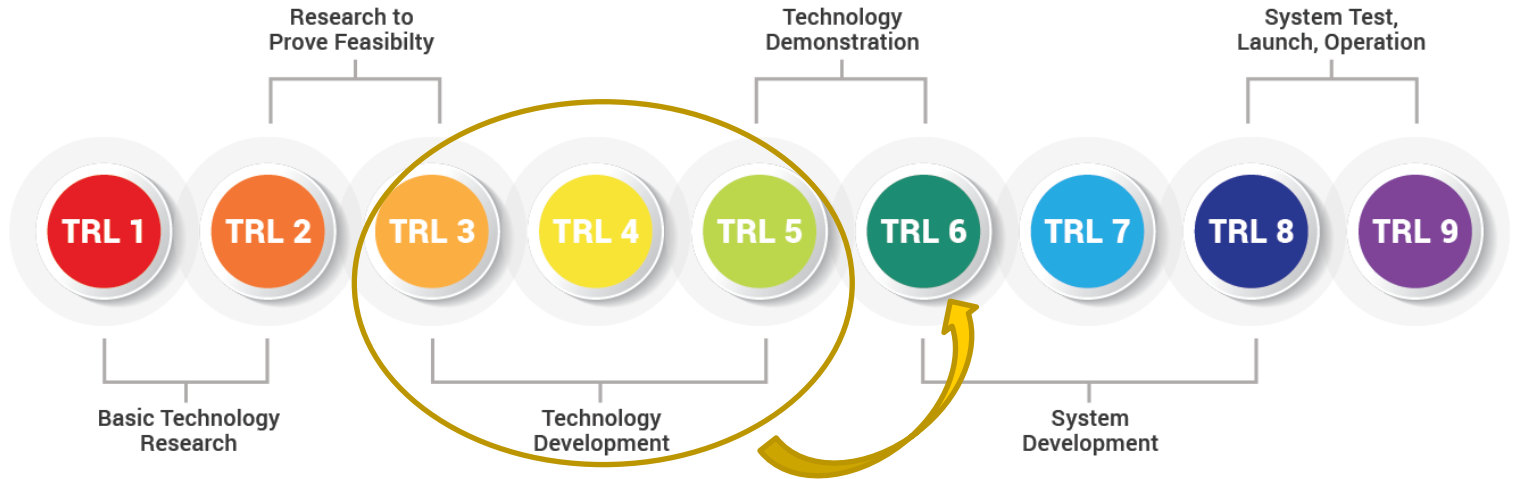
Grazie alle attività condotte da allora, il TRL della tecnologia ha oggi raggiunto un livello fra 3 e 5.





Prossimi obiettivi

Questo comporta che si è ormai prossimi a compiere il passo successivo: la dimostrazione!





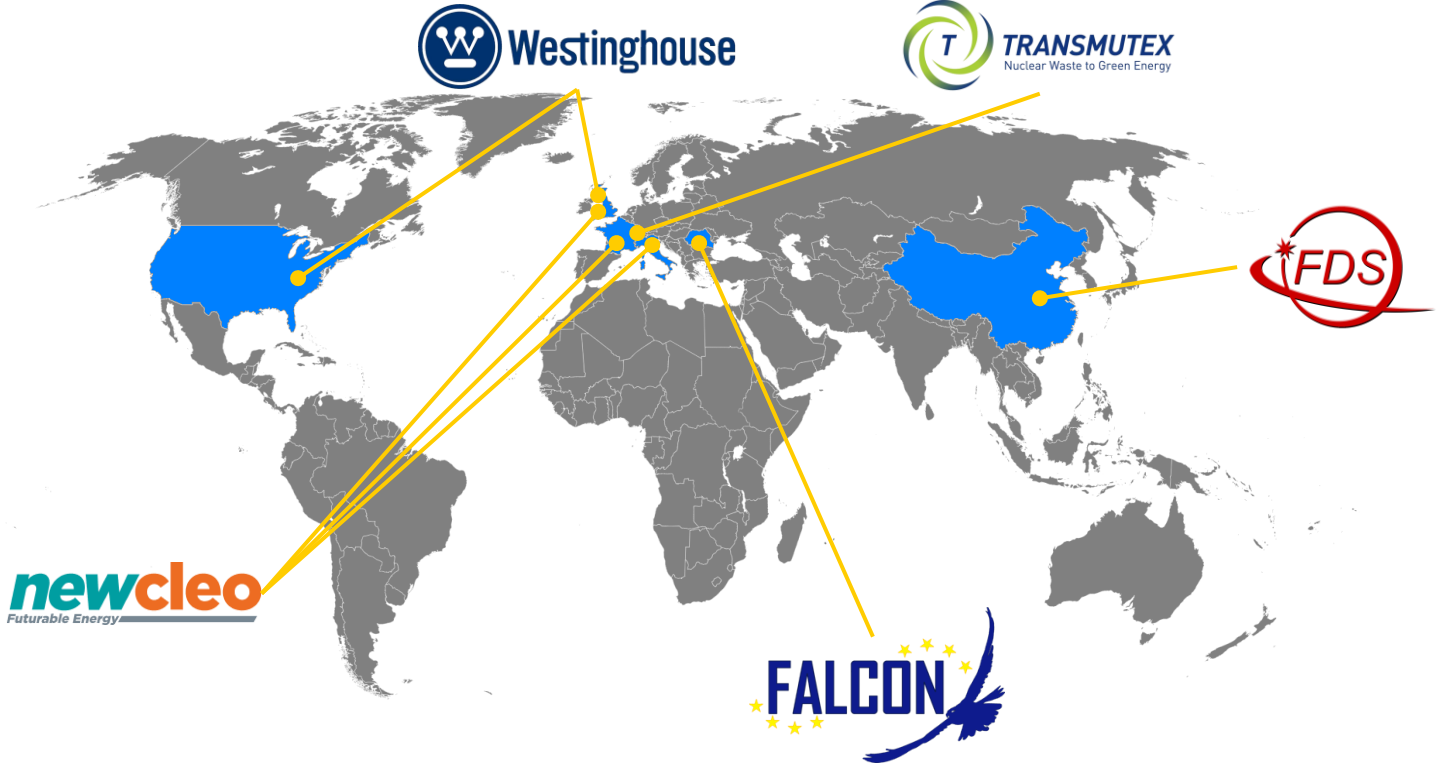
Prossimi obiettivi

Gli sforzi fatti dal sistema nazionale hanno valso il riconoscimento di un ruolo di leadership nel panorama internazionale.

Il che si riflette anche in uno spettro di collaborazioni con svariate industrie, nazionali e non, su progetti che già guardano alla prospettiva del loro sfruttamento commerciale.



Collaborazioni internazionali





Grazie!

Ci sono **domande** ?