

Associazione Meccanica, online
30 gennaio 2024

Una nuova ribalta è possibile per l'energia nucleare anche in Italia?

Davide Orecchia, dottorando in *Scienze
e Tecnologie Energetiche e Nucleari*
presso il **Politecnico di Milano**



Di cosa vogliamo parlare?

Fissione nucleare e produzione di energia

- Energia nucleare oggi: Mondo, Europa...Italia
- Il ruolo dell'energia nucleare negli scenari di decarbonizzazione
- Sicurezza, costi, accettabilità sociale

Gestione rifiuti radioattivi

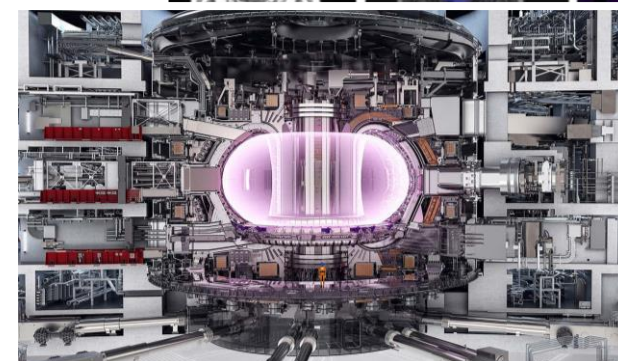
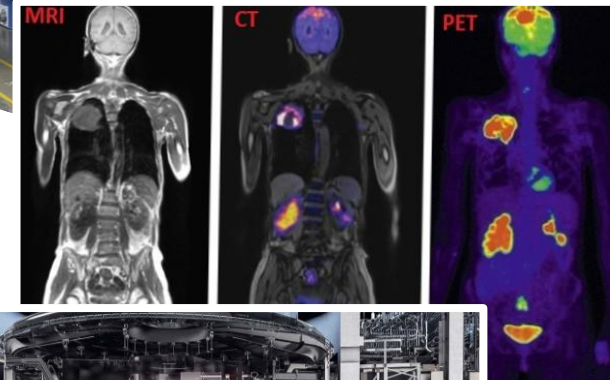
- Radioattività, effetti delle radiazioni ionizzanti
- Deposito nazionale italiano

Applicazioni non energetiche delle tecnologie nucleari

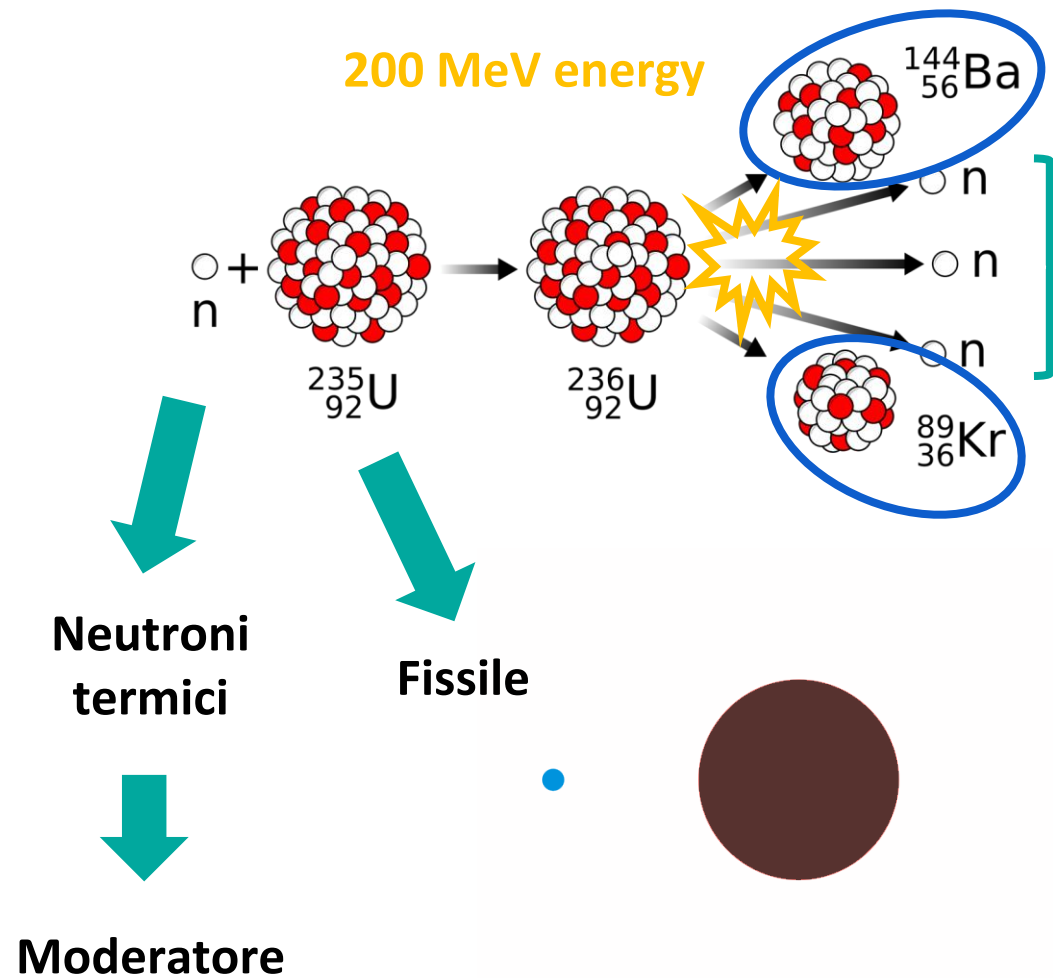
- Medicina nucleare
- Industria

Ricerche sulla fusione nucleare

- Approcci per la realizzazione di un impianto a fusione nucleare
- Storia, stato attuale e prospettive della fusione nucleare
- Le tecnologie della fusione nucleare



La fissione nucleare: Fermi e i neutroni termici



Prodotti di fissione
Mezza tavola periodica!

Reazione a catena

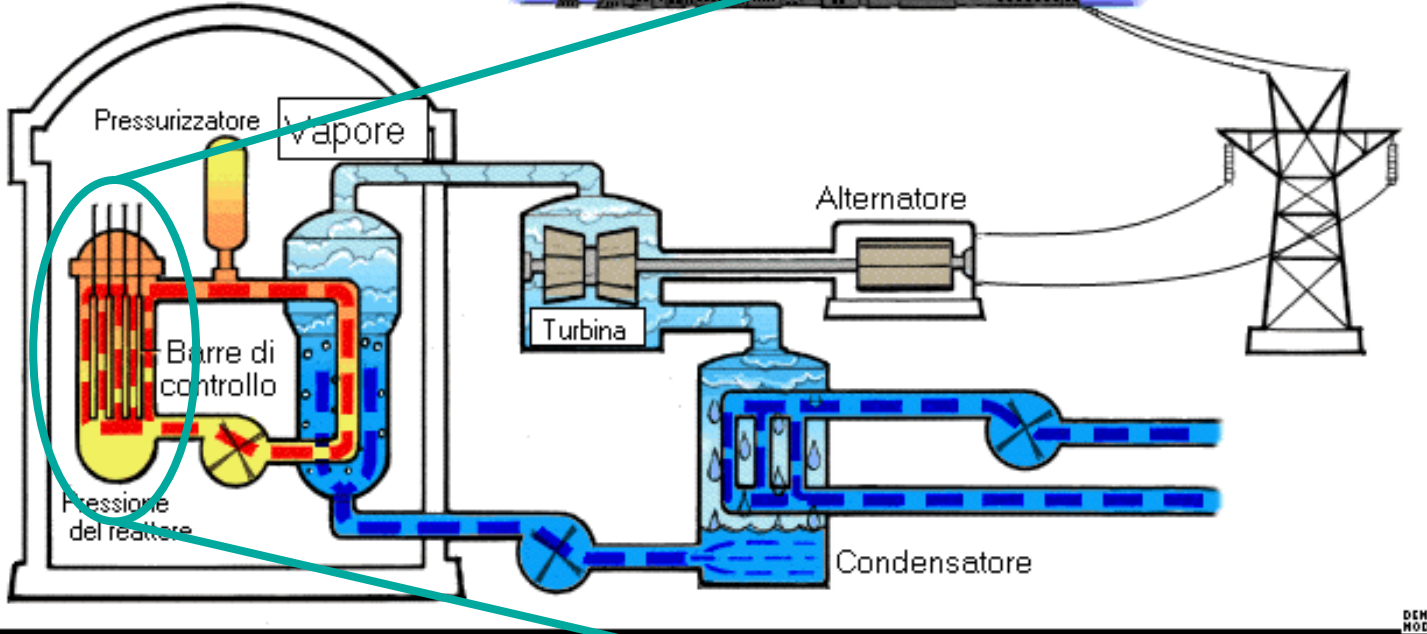


${}^{235}\text{U}$	0.72 %
${}^{238}\text{U}$	99.28%

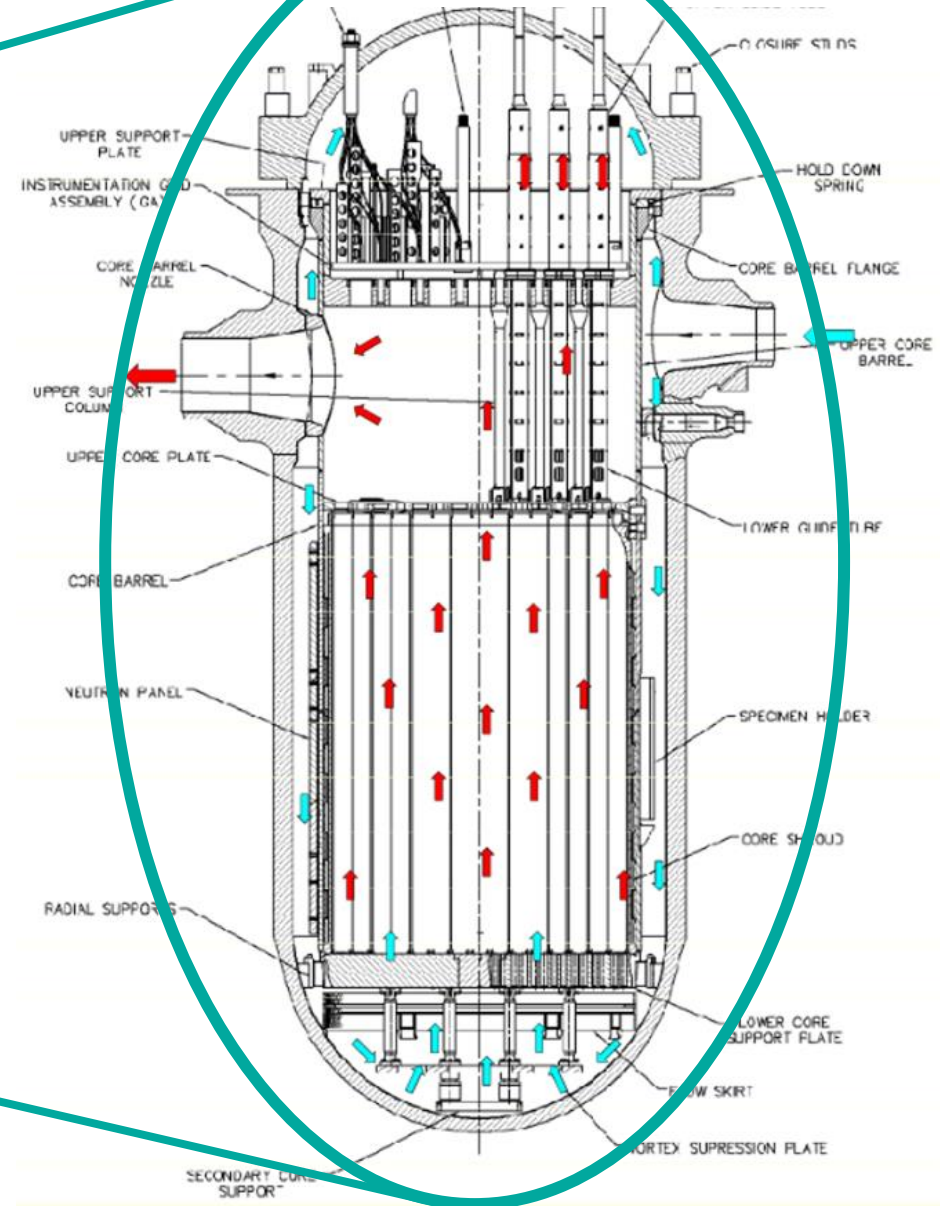


Come funziona una centrale nucleare?

Contenitore del nocciolo

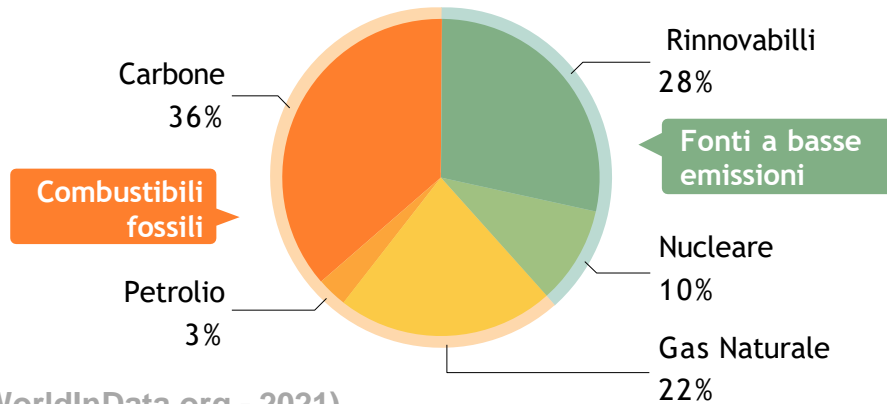


PWR



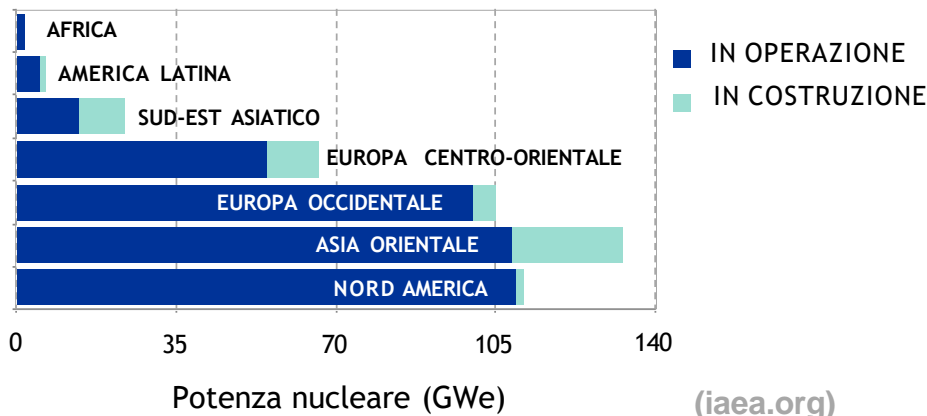
Energia Nucleare nel mondo

Produzione elettrica mondiale per fonte:



(OurWorldInData.org - 2021)

- **441** reattori nucleari **in operazione**
- **52** reattori nucleari sono **in costruzione**

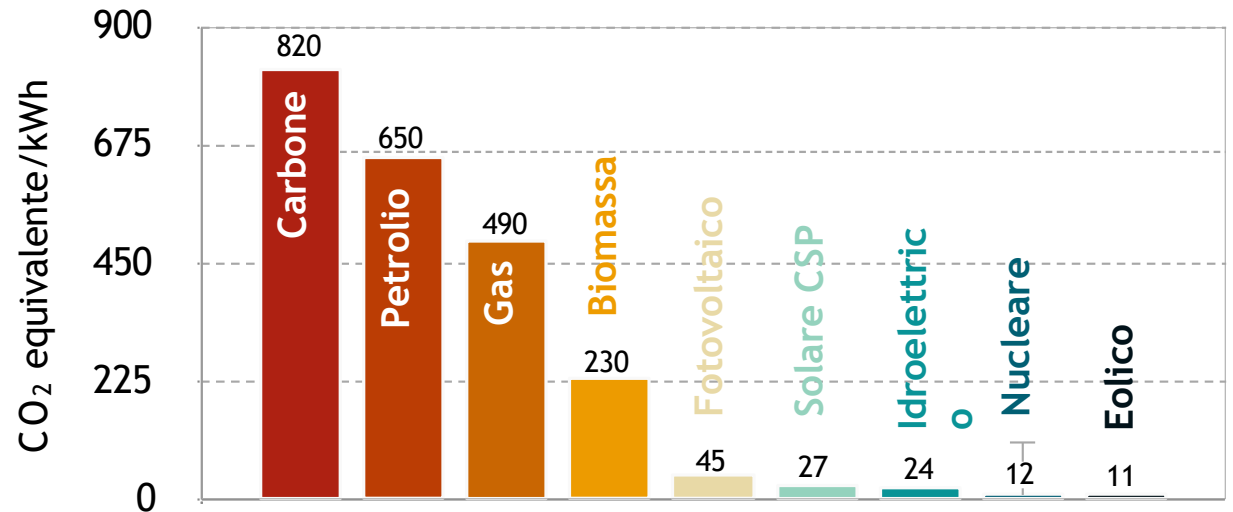


(iaea.org)

In un anno si producono **2790 TWh** di energia elettrica con il nucleare nel mondo, circa **10 volte il fabbisogno elettrico italiano**.

(iea.org - 2019)

Dagli anni '70 ad oggi, l'energia nucleare ci ha fatto risparmiare circa **70 miliardi di tonnellate di CO₂**.



(IPCC, 2014)

Energia Nucleare nel mondo



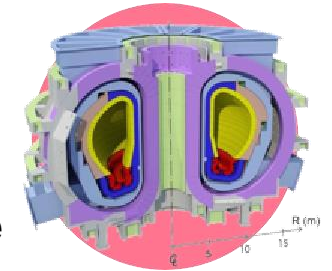
Gen II

Quasi totalità dei reattori oggi in operazione.
Estensione vita fino a 60-80 anni.



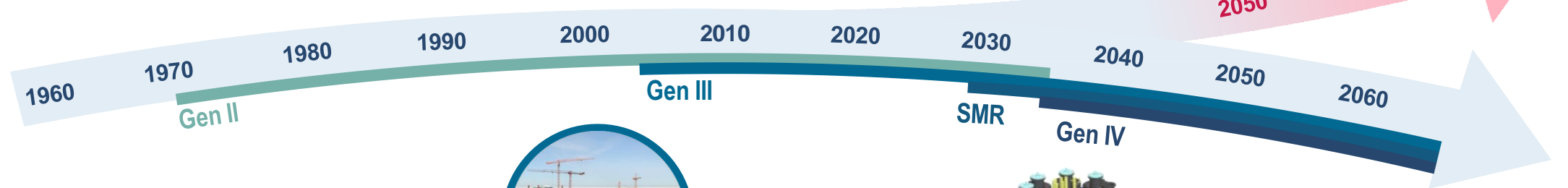
SMR

Reattori modulari di piccola taglia (< 300 MWe).



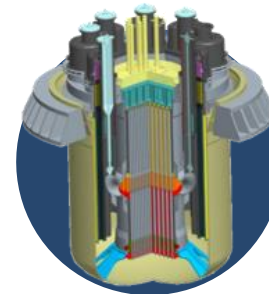
DEMO

Primo prototipo di reattore a **fusione nucleare.**



Gen III (Gen III+)

Alcuni sono già in operazione (Cina, Emirati Arabi, Corea, Russia, India).
52 in costruzione nel mondo.



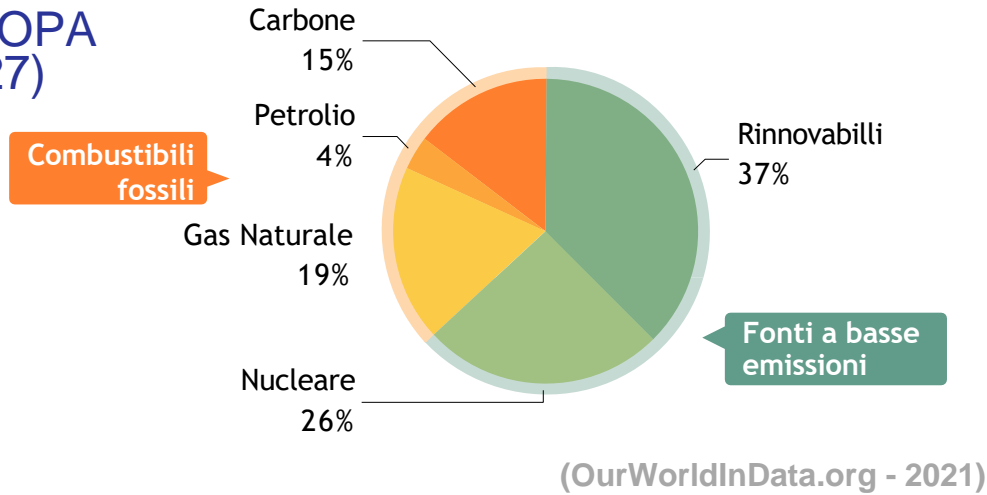
Gen IV

Raffreddamento a metalli liquidi o sali fusi.
Possibilità di **bruciare i rifiuti radioattivi a lunga vita.**

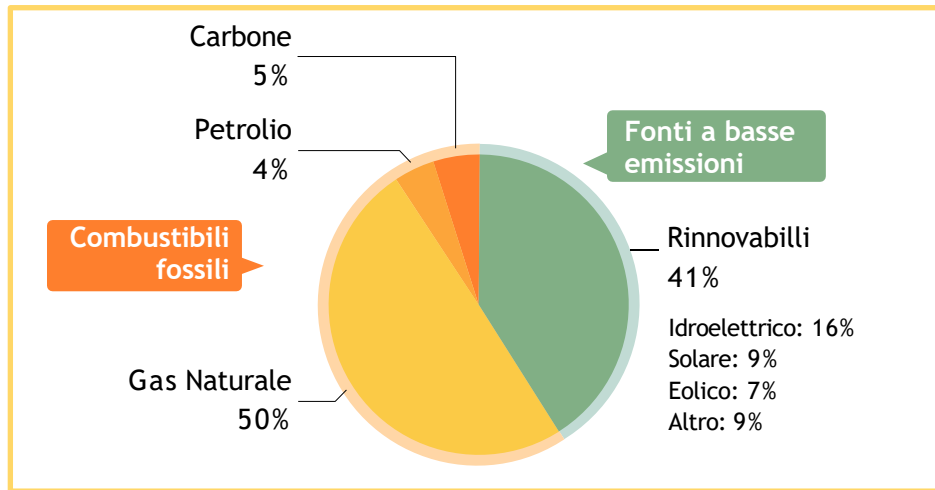
Energia Nucleare in Europa... e in Italia

Energia elettrica prodotta dalle diverse fonti:

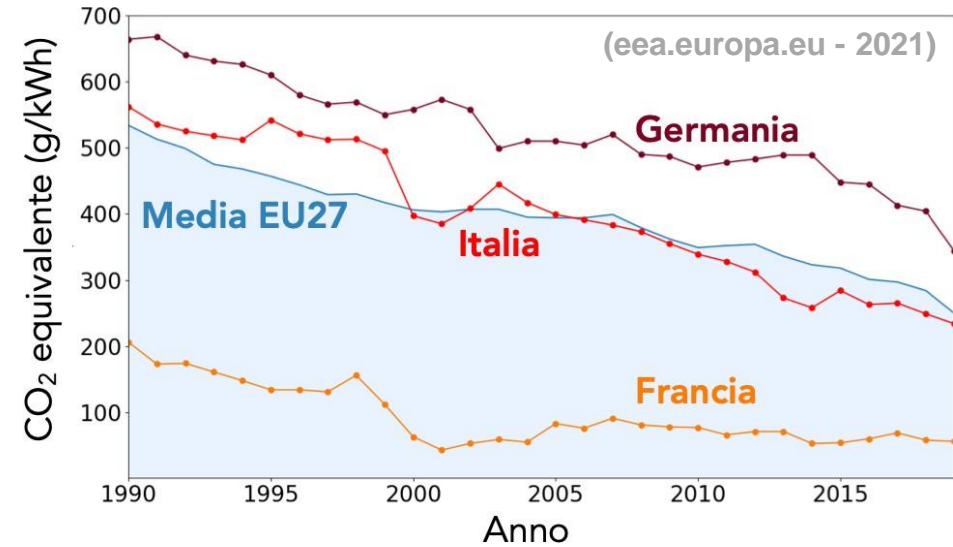
EUROPA (EU27)



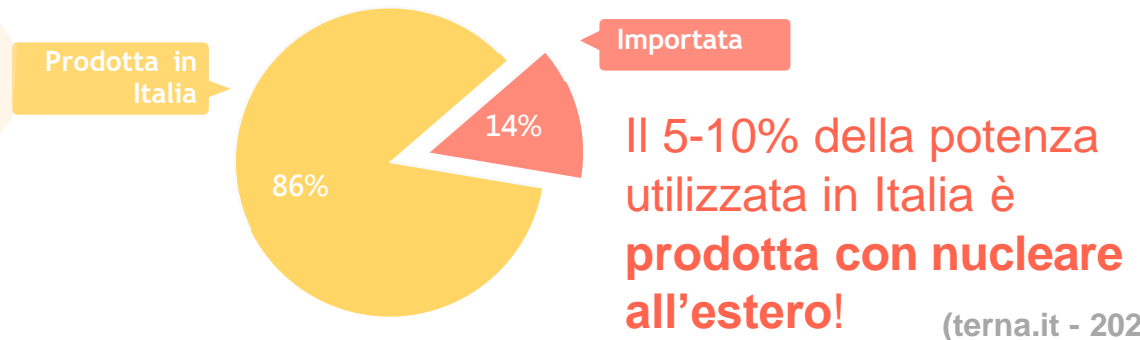
ITALIA



Emissioni di CO₂ per la produzione nazionale di energia elettrica.

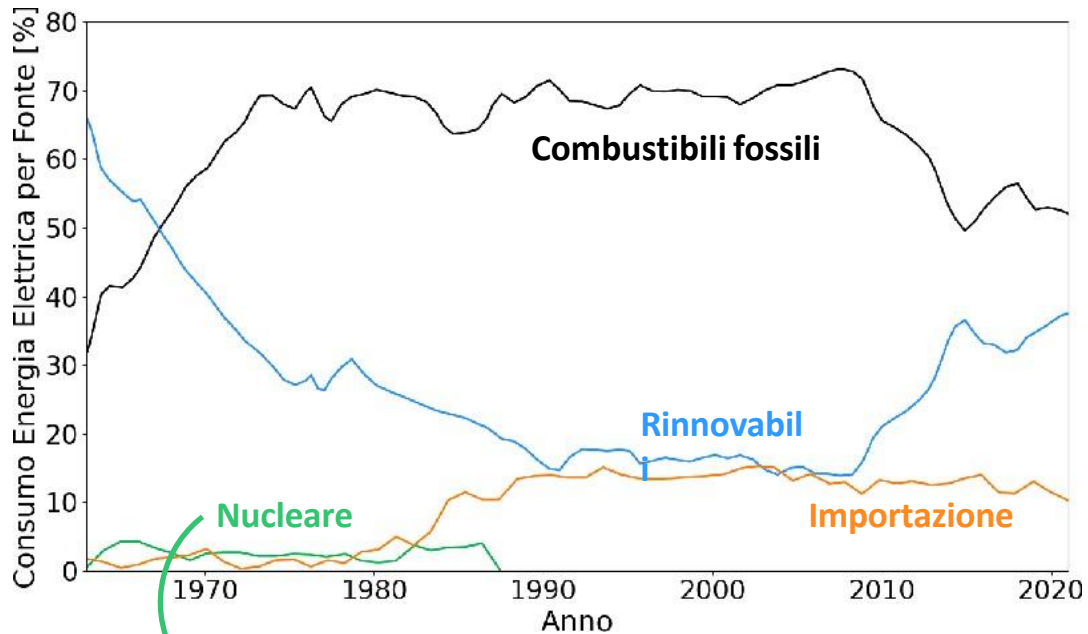


Energia elettrica consumata in Italia:



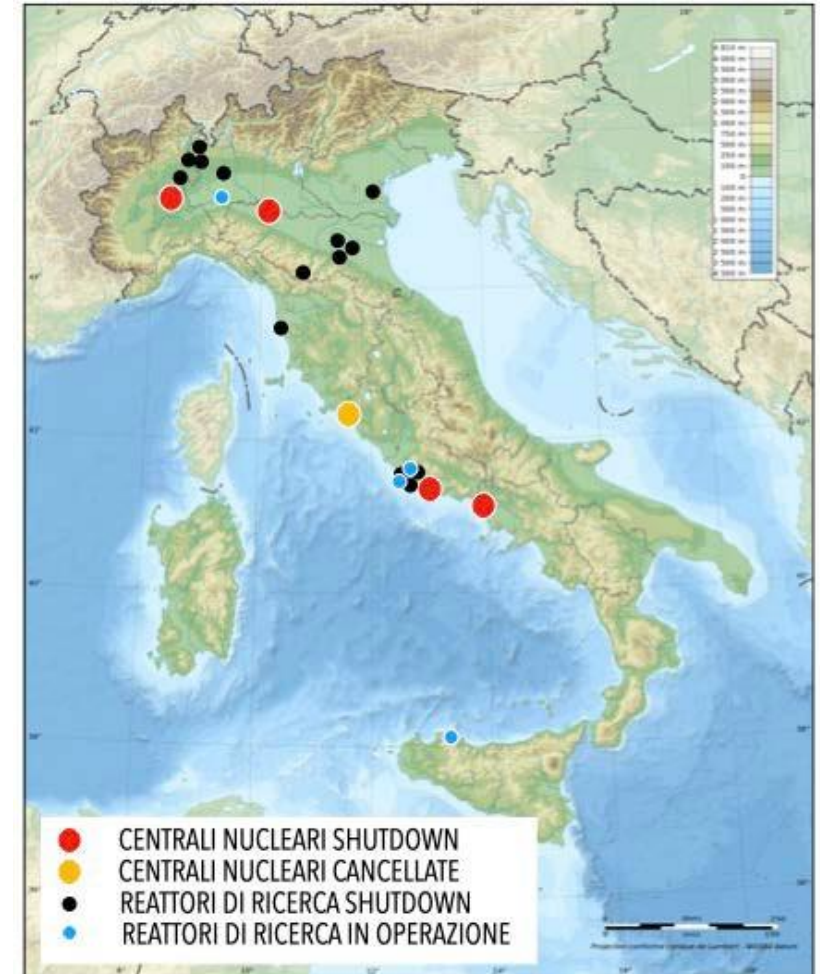
Energia Nucleare in Italia

Consumo di energia elettrica in Italia, storico delle fonti e delle importazioni.



4 centrali nucleari in operazione in Italia dagli anni '60 al 1987

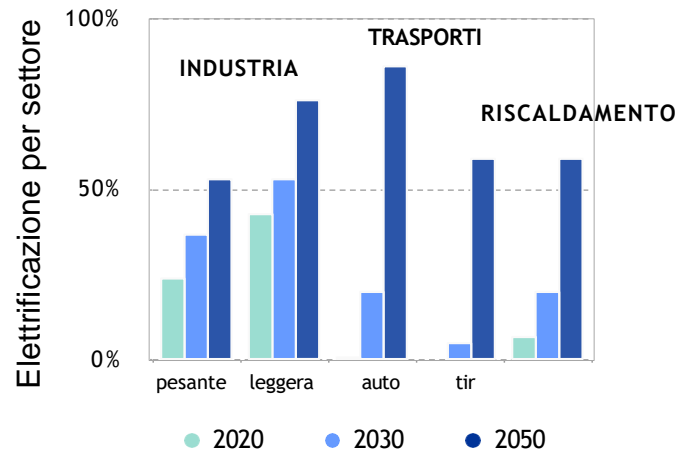
Una quinta era in costruzione ed è stata cancellata dopo il referendum



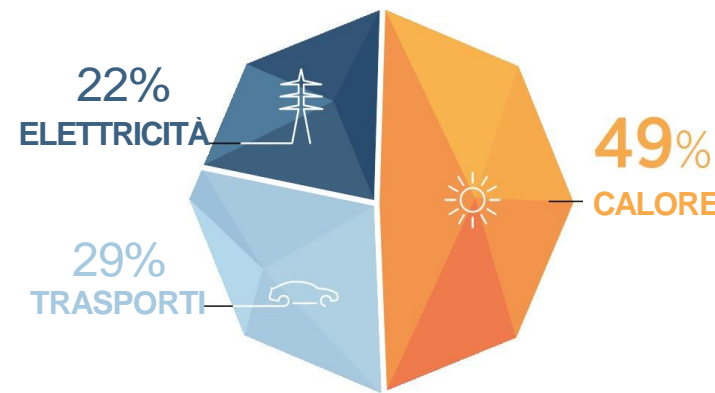
Ruolo dell'Energia Nucleare negli scenari di decarbonizzazione

“Dobbiamo guardare a tutte le fonti energetiche pulite per trarre il massimo da queste opzioni. I futuri sistemi energetici a basse emissioni dovranno produrre molta più elettricità, per includere anche trasporti e produzione industriale. Le Nazioni avranno bisogno di sistemi affidabili a basse emissioni come backup per le fonti rinnovabili, per quando mancano sole e vento.”

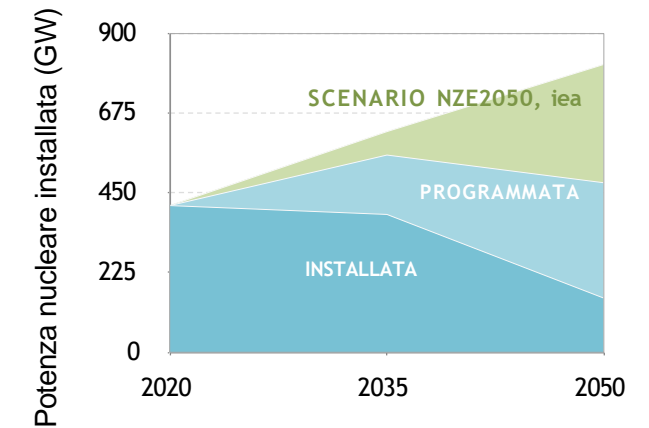
Fatih Birol, Direttore Esecutivo, International Energy Agency (IEA)



L'elettrificazione di tutti i settori **aunderà**, dunque avremo bisogno di produrre più energia elettrica.



Ma continueremo ad avere bisogno anche di **calore** e di **propulsione** per i trasporti.



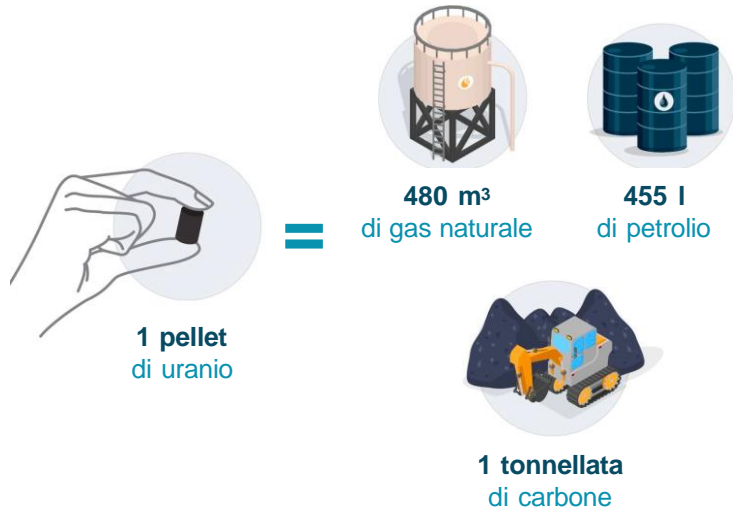
Per raggiungere gli obiettivi NZE2050, dobbiamo installare mediamente **20GW di nucleare all'anno!**

(iea.org, NZE 2050)

L'**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** è l'organo dell'ONU dedicato allo studio scientifico dei cambiamenti climatici: tra i 90 scenari studiati da IPCC si stimano **1160 GW di energia nucleare** installati nel **2050**, più del doppio di quella attuale!

Ruolo dell'Energia Nucleare negli scenari di decarbonizzazione

L'energia nucleare è una risorsa per la decarbonizzazione del settore elettrico, ma anche dell'industria e dei trasporti.



I rifiuti radioattivi di alto livello prodotti in Svizzera (36% di energia nucleare) in 60 anni.

L'alta densità di energia, permette di **utilizzare in modo efficiente le risorse**: dal combustibile, ai materiali di costruzione, al suolo.

Il nucleare produce energia a **basse emissioni di CO₂** ed in modo **stabile**.

La quantità di **rifiuti prodotti è esigua**, se confrontata con le altre fonti energetiche.

Esempi di scenari di decarbonizzazione

Ontario, Canada

Popolazione: 14,5 milioni

Ha decarbonizzato la produzione di energia elettrica in 11 anni, con un mix energetico prevalentemente basato su **energia nucleare (60%)** e **idroelettrico (24%)**.

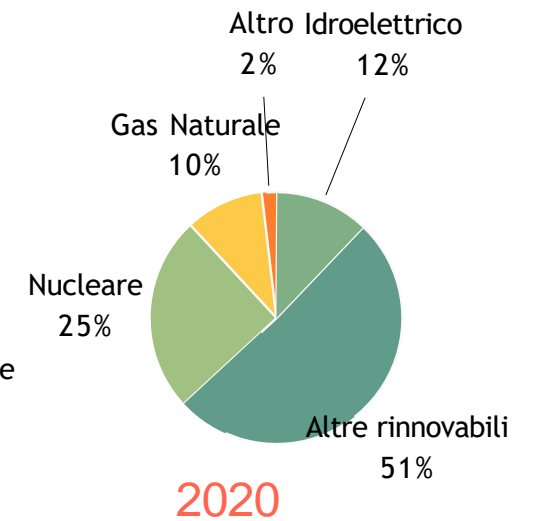
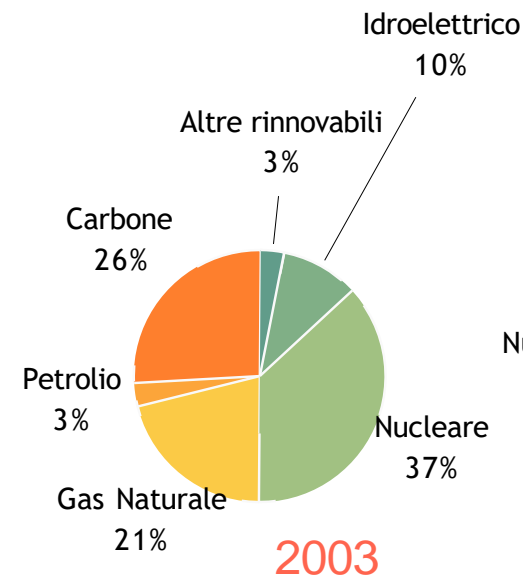
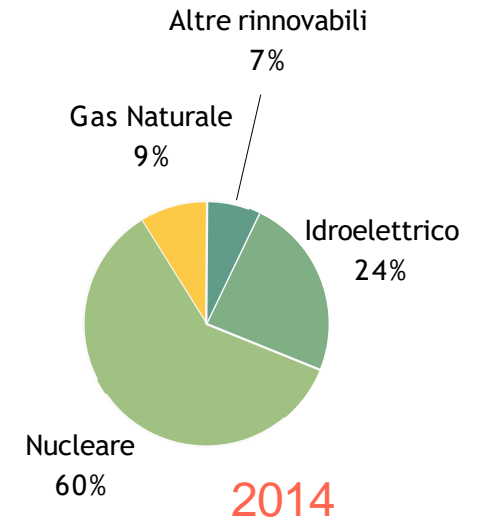
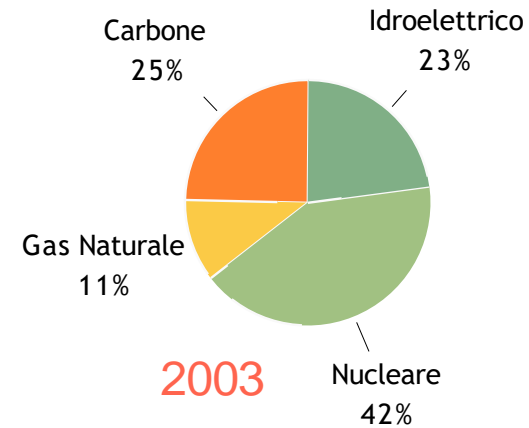
(ontario.ca)

Scozia, Regno Unito

Popolazione: 5,5 milioni

Ha decarbonizzato la produzione di energia elettrica in 17 anni, con un mix energetico prevalentemente basato su **energie rinnovabili (63%, di cui 45% eolico)** e un contributo anche dall'**energia nucleare (25%)**.

(gov.scot)



Ostacoli allo sviluppo dell'energia nucleare: programmazione, investimenti, organizzazione, accettabilità sociale

L'esperienza occidentale degli ultimi decenni ha mostrato criticità, che non sono state registrate in altri paesi (Cina, Emirati Arabi, Corea...)

1. Aumento dei **costi** e delle **tempistiche** per la costruzione di reattori di Gen III
2. Mancanza di stabilità nella **politica energetica** a lungo termine
3. Mancanza di "allenamento" del **tessuto industriale**
4. Problematiche legate alla **comunicazione** e all'**accettazione sociale**

Esempio: il caso dell'AP1000 (Gen III)



CORRIERE DELLA SERA / ESTERI

GIAPPONE

Fukushima, il governo e la Tepco «responsabili» del disastro nucleare

La decisione di un tribunale giapponese sei anni dopo gli incidenti che provocarono oltre 18mila morti e dispersi. La zona scelta per alcuni eventi delle Olimpiadi 2020

la Repubblica

IL REPORTAGE

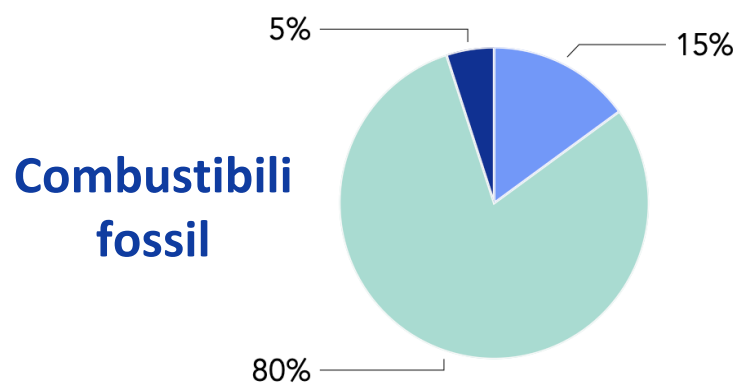
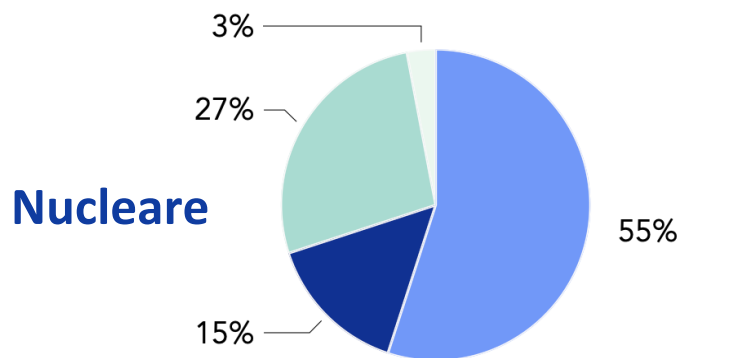
Tokyo capitale in agonia "Qui non vivremo più"

DAL NOSTRO INVIATO GIAMPAOLO VISETTI

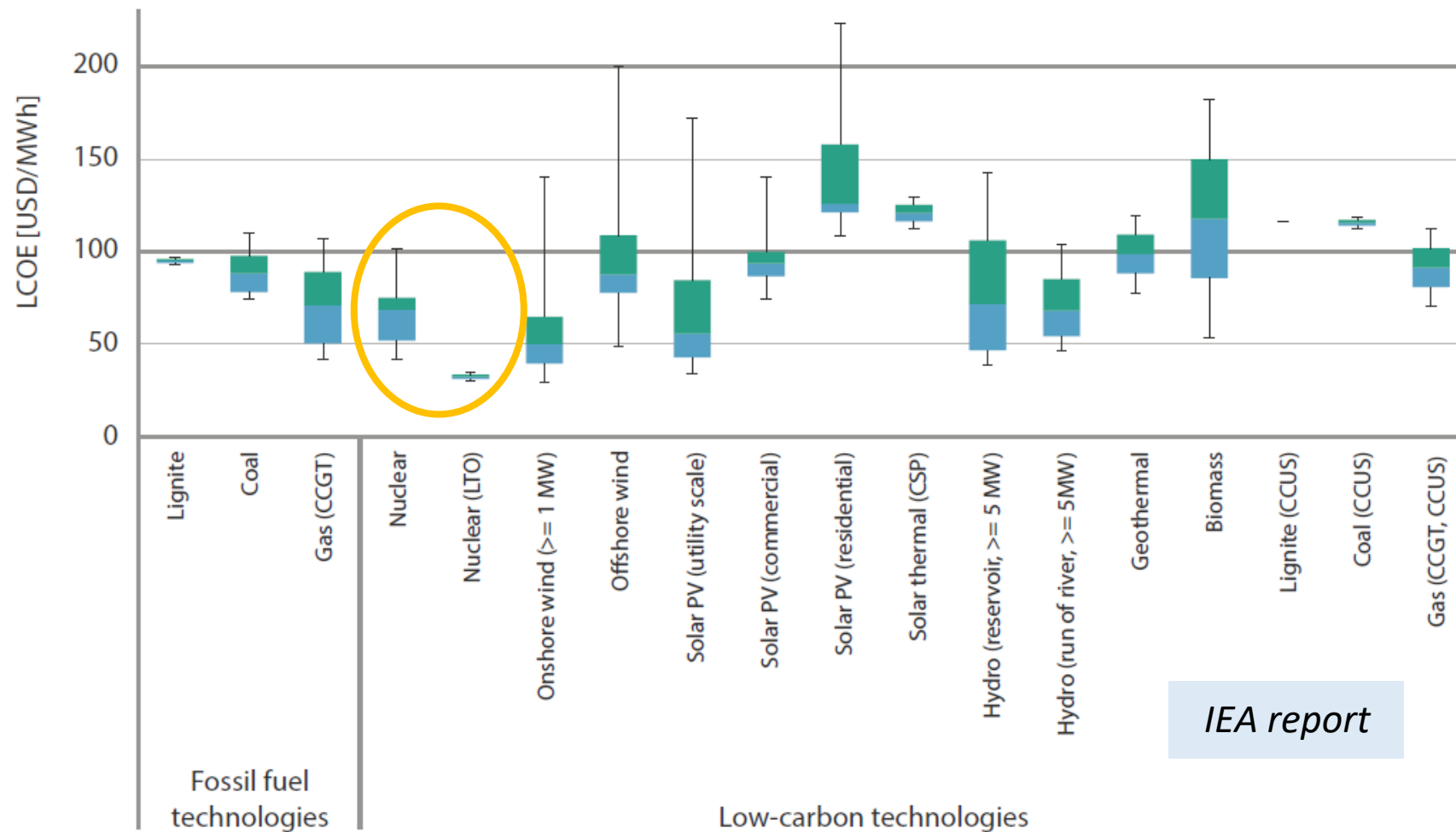
Paura e incubo radiazioni: in q



Costi delle fonti energetiche a confronto



- Investimento
- Operazione e manutenzione
- Combustibile
- Decommissioning e smaltimento rifiuti



Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Sicurezza dell'energia nucleare

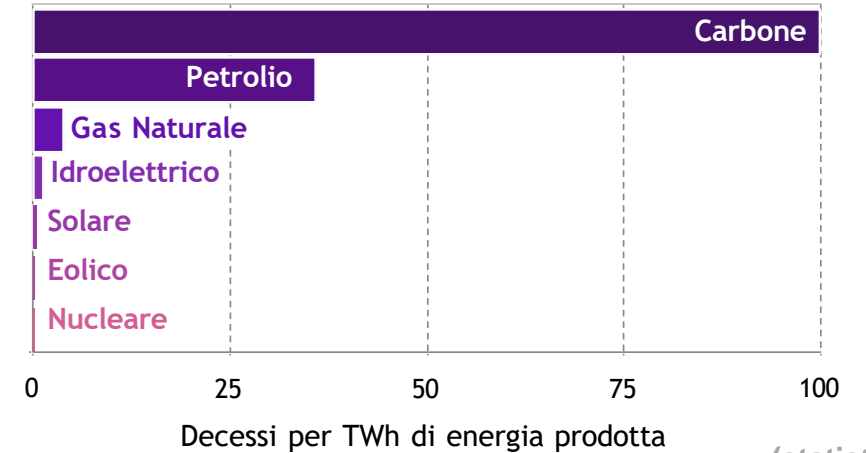
La percezione del rischio

Avresti detto che l'animale più pericoloso è la zanzara?



Mortalità delle fonti energetiche

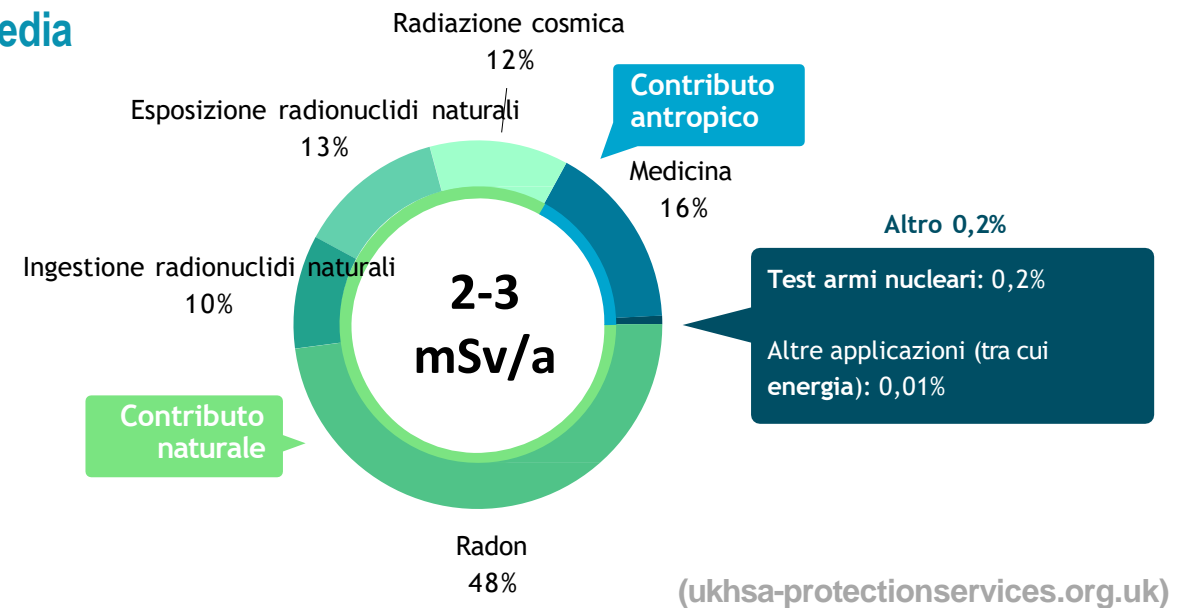
Nessuna attività umana è esente da rischi ma stando ai dati, **l'energia nucleare è tra le fonti energetiche più sicure**



(statista.org)

Radioattività e dose efficace media

Quanto pesano gli **incidenti nucleari** e le **attività umane** sulla dose efficace media annuale di un cittadino?



(ukhsa-protectionservices.org.uk)



La moderna cultura della sicurezza industriale prende le mosse dall'industria nucleare!

Radioattività in banane

 $\approx 0.1 \mu\text{Sv}$

E cioè, a quanto corrisponde?

Dormire accanto a qualcuno

MENO DI UNA BANANA

Vivere un anno vicino a una centrale nucleare



Controllo di sicurezza in aeroporto

0.00025 mSv



2,5 BANANE

Radiografia dentale

0.005 mSv



50 BANANE

Volo in aereo New York - Los Angeles (6 ore di volo)

0.04 mSv



400 BANANE

Sostare per 2 ore nei pressi di Fukushima 2 mesi dopo l'incidente

1000 BANANE ~ UN VOLO MILANO - LOS ANGELES

0.1 mSv



Fare una TAC

10 mSv



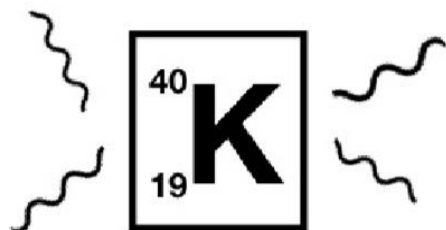
100MILA BANANE



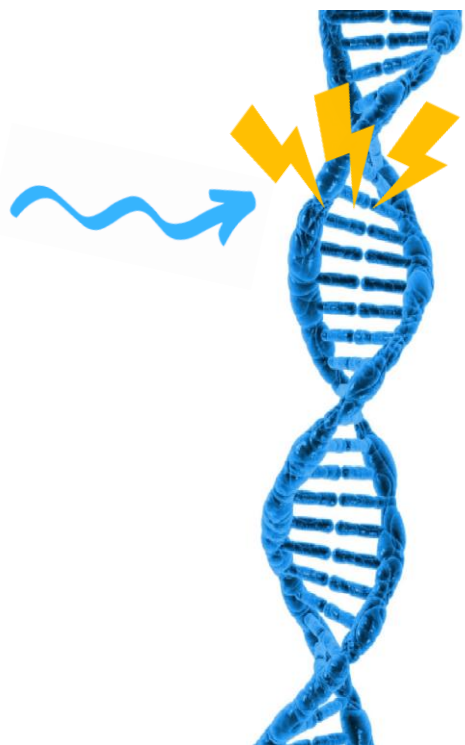
Dose alla quale si ha evidenza sperimentale di aumento del rischio di tumore

100 mSv

1 MILIONE DI BANANE



Effetti biologici delle radiazioni **ionizzanti**



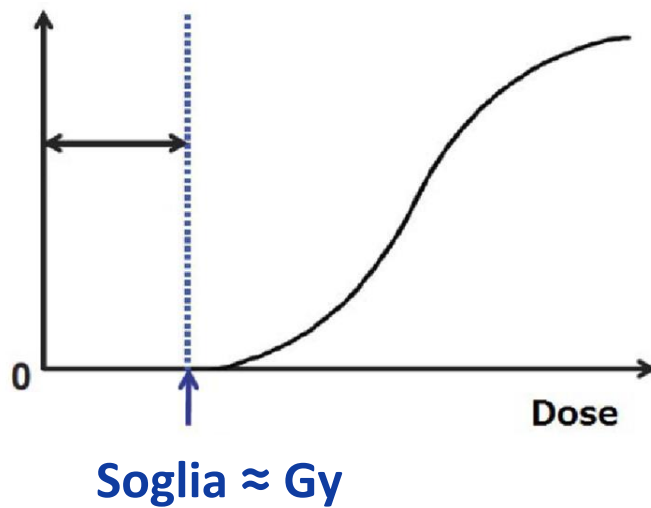
$$Sv = \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$Gy = \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Sensibilità tessuto
Tipologia radiazione

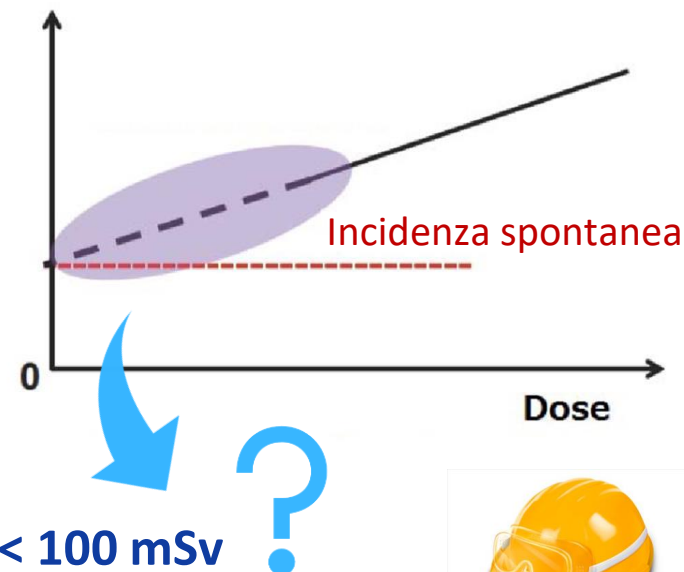
Effetti deterministici

Danni ad organi e tessuti



Effetti Probabilistici

Aumento di insorgenza di tumori



Modello lineare senza soglia



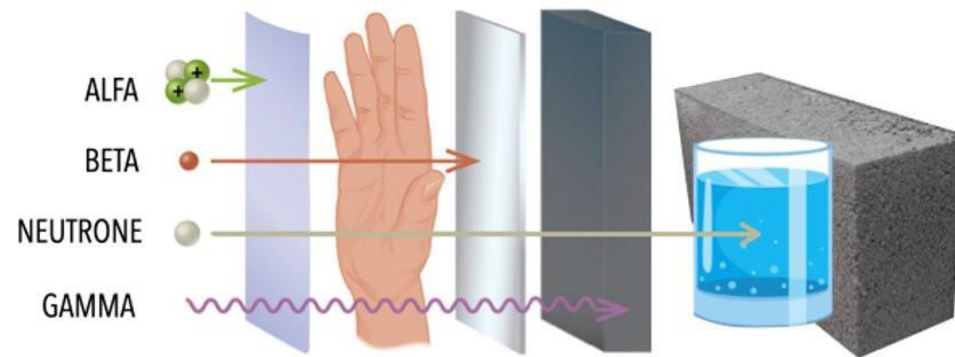
ALARA

I rifiuti radioattivi: alta, media, bassa attività

L'attività

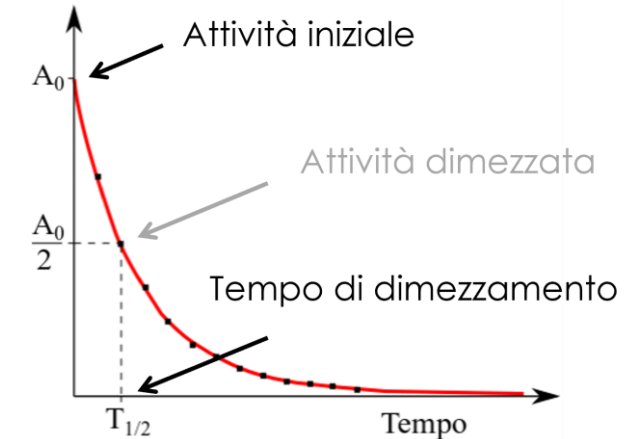
I rifiuti radioattivi si suddividono in rifiuti a **bassa, media e alta attività**.

L'**attività** di un rifiuto, a valle di tutti i possibili stadi di processamento, è una quantità sulla **quale non si agisce artificialmente**: segue l'evoluzione temporale ed i tempi di vita propri dei radionuclidi coinvolti.



La dose efficace

La dose efficace è una quantità sulla quale possiamo agire, ricorrendo a barriere. È possibile **abbattere la dose** derivante da un rifiuto radioattivo a livelli che non siano dannosi per gli esseri viventi.

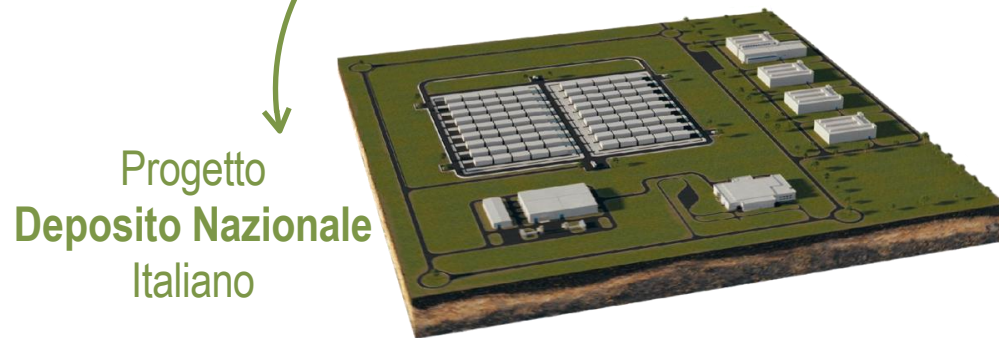
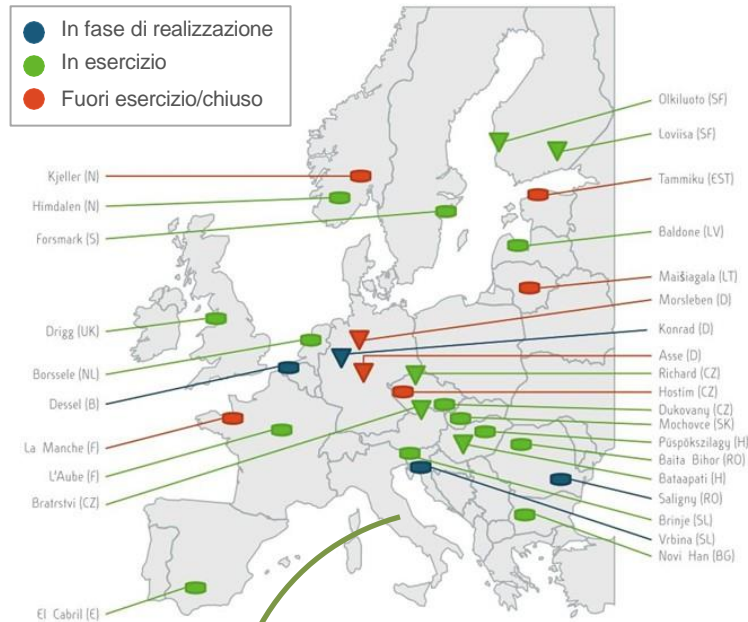


Le strategie di confinamento dei rifiuti radioattivi

Impiego di barriere che schermino le radiazioni ionizzanti emesse, per un tempo sufficiente rispetto allo scopo stabilito (es: trasporto, stoccaggio temporaneo, smaltimento definitivo), riducendo il rischio a livelli di **piena sicurezza per essere umano e ambiente**.

I rifiuti radioattivi: depositi per lo smaltimento definitivo

Rifiuti a bassa e media attività



Rifiuti ad alta attività: il combustibile esausto

Stoccaggio del combustibile esausto per **50 anni** (riduzione di circa 1000 volte del calore generato dai prodotti di fissione).
Lo stoccaggio avviene in speciali contenitori, detti **cask**.

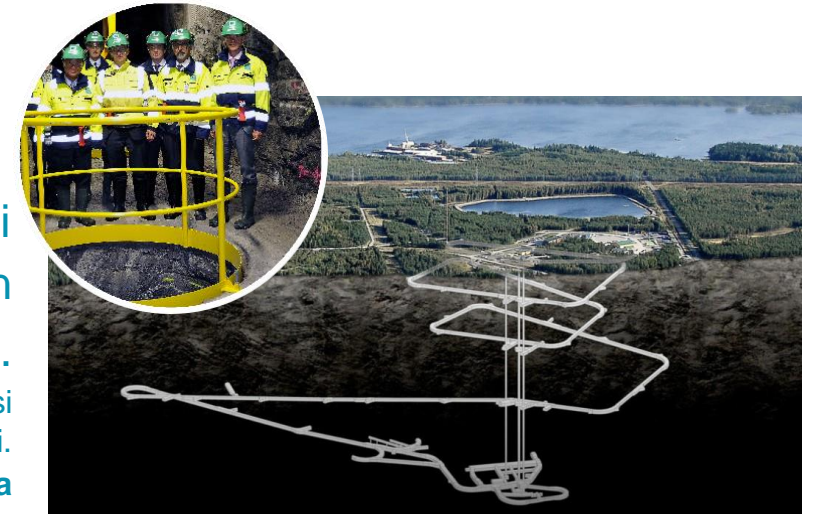


Smaltimento definitivo in **depositi geologici** (250-1000 metri di profondità).

Il **deposito geologico** di **Onkalo**, in **Finlandia** entrerà in **funzione nel 2025**.

Ospiterà tutti i rifiuti nucleari finlandesi pregressi e futuri.

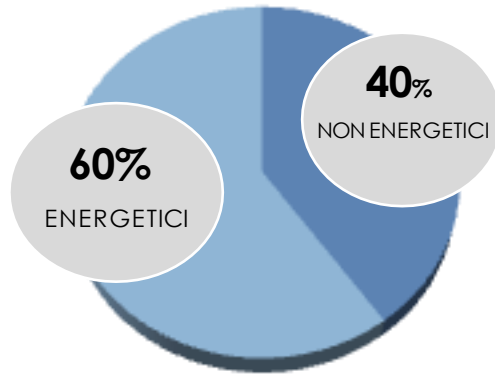
Progetti analoghi in **Francia, Svezia, Canada**



Quanti e quali sono i rifiuti radioattivi italiani da gestire?

La gestione dei rifiuti radioattivi italiani deve considerare i **rifiuti pregressi** (prodotti negli anni passati) e quelli **futuri**, che si produrranno nei prossimi anni.

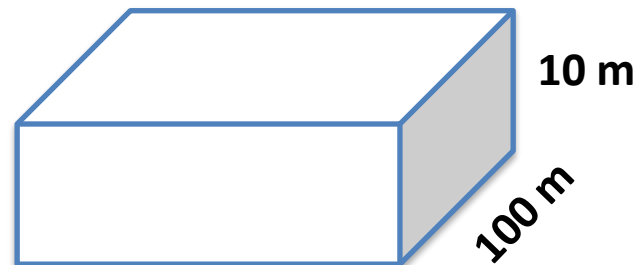
Circa il **60%** deriva dal **settore energetico**, derivanti dalle centrali elettronucleari italiane, e **40%** deriva da **settori non energetici** (medicina, ricerca, industria...)



- Circa **78.000 m³** di rifiuti radioattivi a **Molto Bassa e Bssa Attività**
- Circa **17.000 m³** di rifiuti radioattivi a **Media e Alta Attività**

TOTALE circa 95.000 m³
di cui circa 45.000 m³ pregressi e il
restante da produrre nei prossimi anni

Rifiuti radioattivi conferiti al DN
su un periodo di circa 100 anni
(50 passati + 50 futuri)



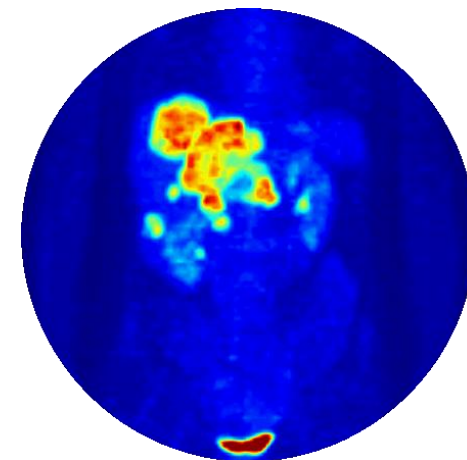
Applicazioni e tecnologie nucleari non energetiche

- **RX**: Radiografia a raggi X, **CT**: tomografia computerizzata, **MRI**: risonanza magnetica nucleare
- **Scintigrafia**, **SPECT**: tomografia ad emissione di singolo fotone, **PET**: tomografia ad emissione di positroni
- **Radioterapia**, **adroterapia** oncologica

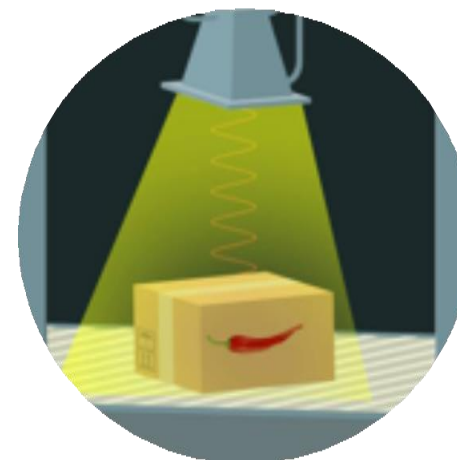
- **Sterilizzazione** di presidi sanitari o derrate alimentari
- Analisi/controlli non distruttivi (es. **sicurezza aeroportuale**)
- Radiografie e tomografie di **componenti meccanici**

Università e centri di ricerca nei più svariati ambiti delle scienze e tecnologie nucleari (fissione nucleare, fusione nucleare, rivelatori di radiazioni, radiochimica, gestione dei rifiuti radioattivi, combustibile nucleare...)

Medicina



Industria



Ricerca



Esperienze di gestione: depositi di superficie francesi

PATRIMOINE CULTUREL ET GASTRONOMIQUE

Choux à choucroute
Label Rouge

Champagne grand cru
AOC - AOP

Coteaux champenois rosé
AOC - AOP

Chaource
AOC - AOP

Volailles de la Champagne
IGP

Coteaux champenois rouge
AOC - AOP

Champagne premier cru
AOC - AOP

Champagne
AOC - AOP

Coteaux champenois blanc
AOC - AOP

Rosé des Riceys
AOC - AOP

Soumaintrain
IGP



© Air Drone Netcam 2019

L'Aube

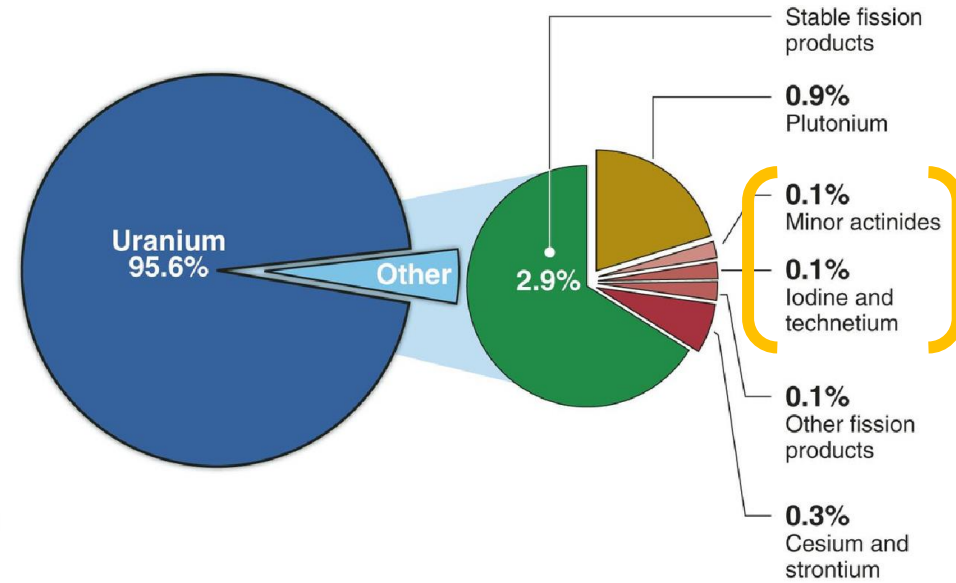
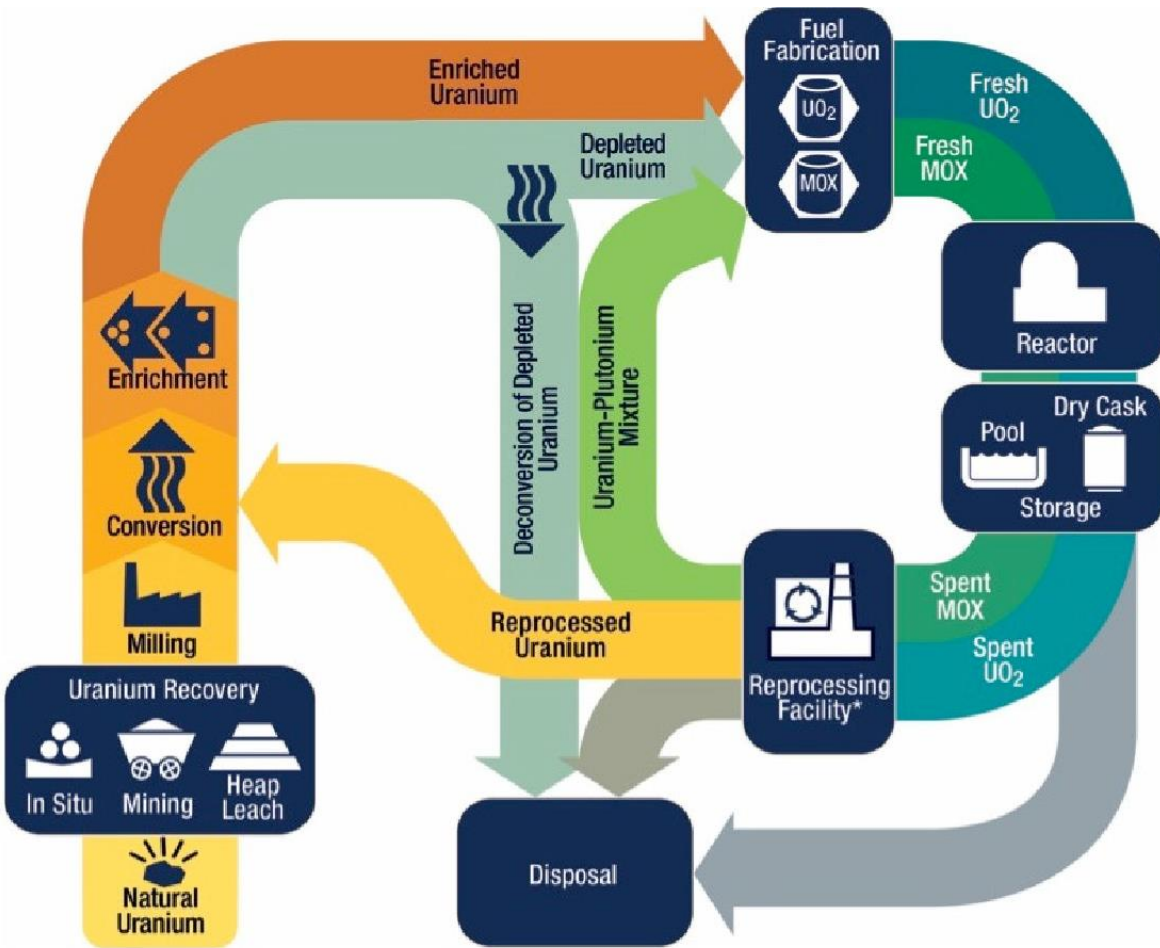


La Manche



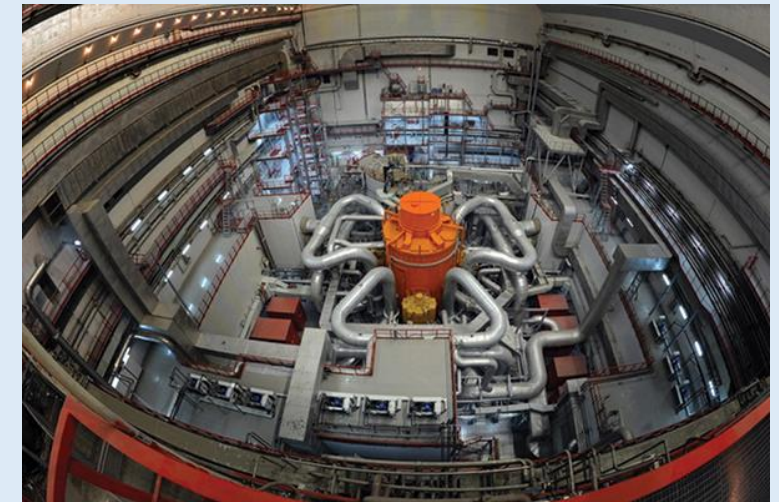
E se volessi fare di più?

Riprocessamento del combustibile



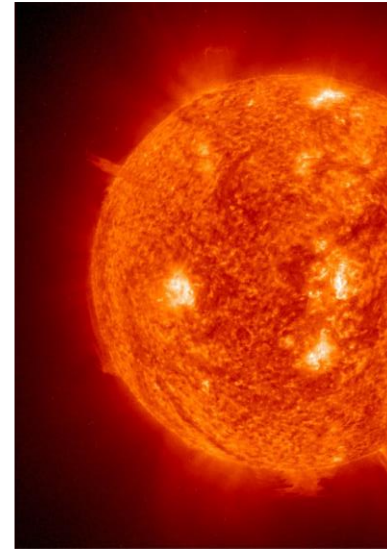
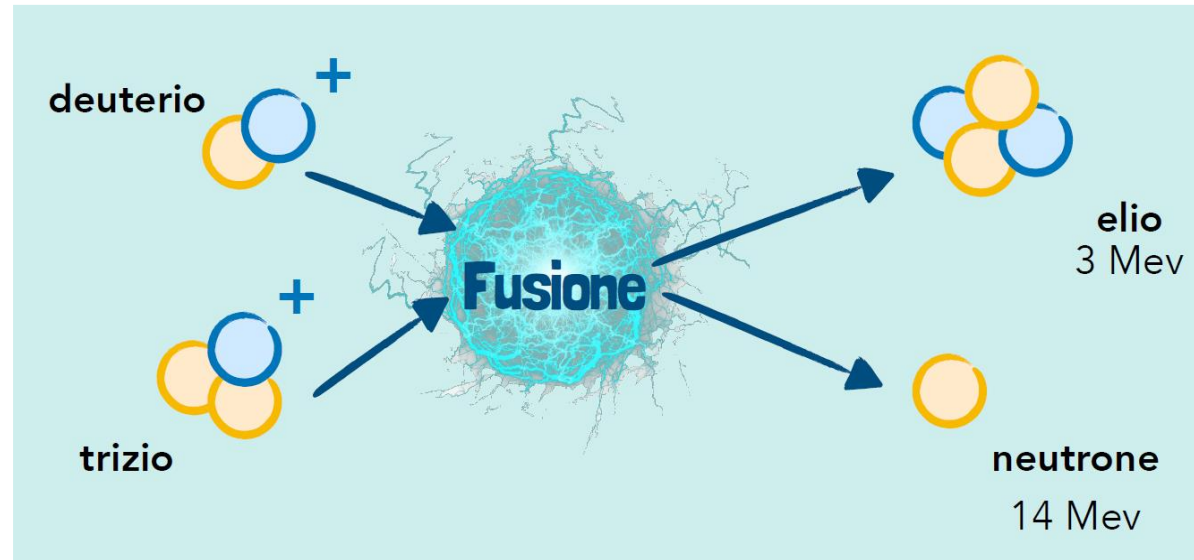
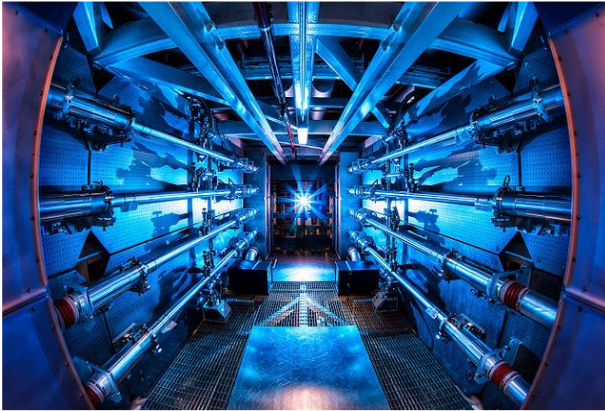
Reattori a neutroni veloci

Riduzione drastica o totale dei rifiuti radioattivi a lunga vita



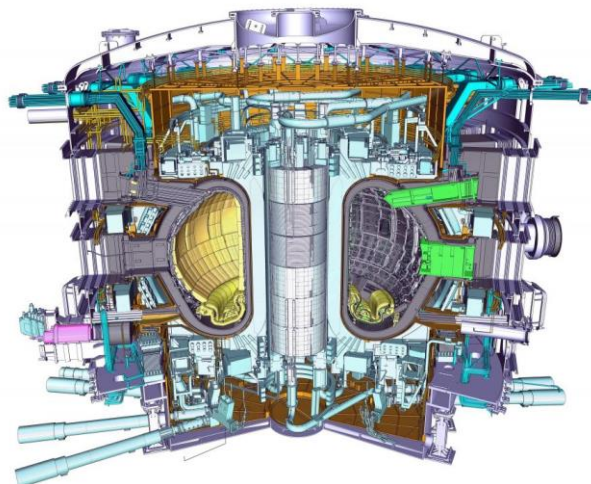
Fusione Nucleare

Confinamento inerziale



Confinamento magnetico

ITER

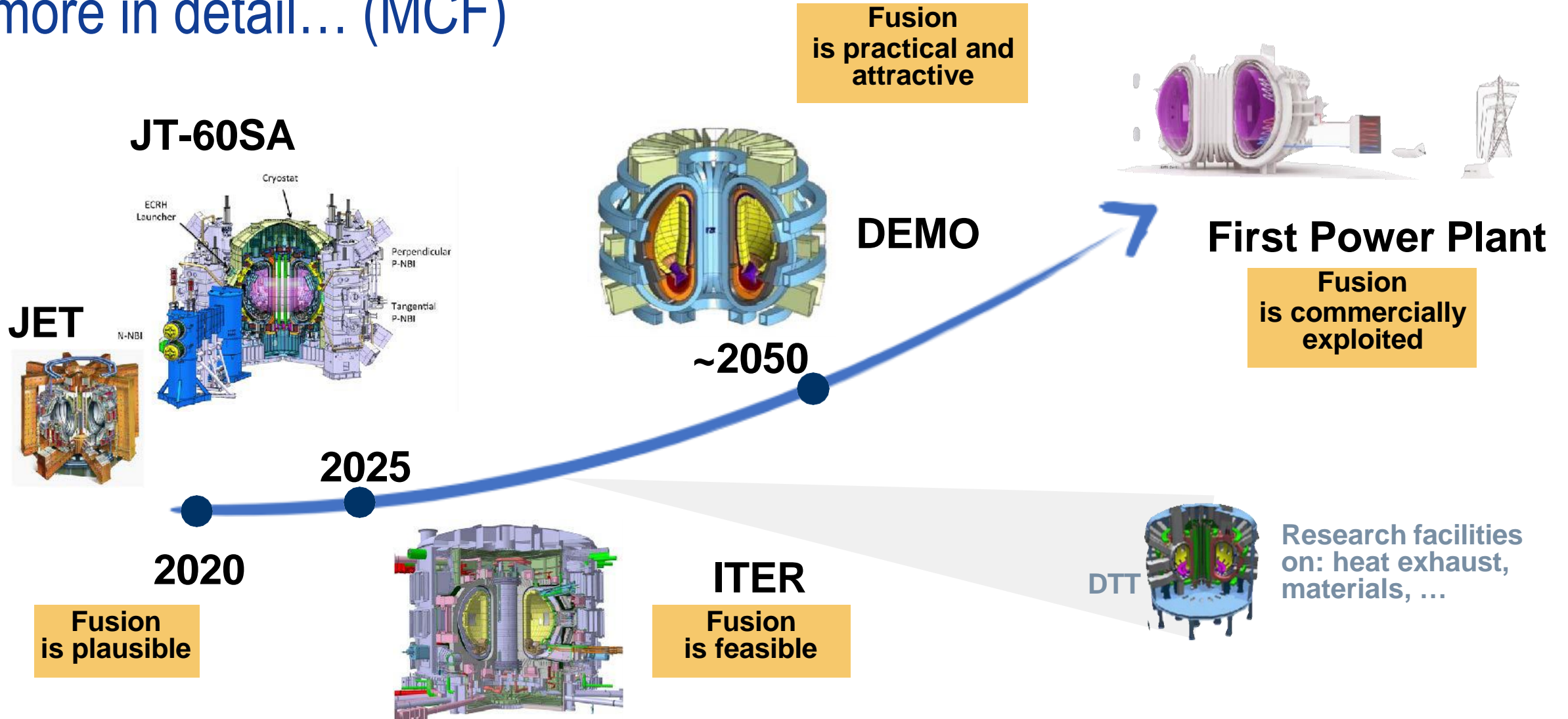


- Quantità virtualmente **illimitata** di energia
- Nessun rifiuto radioattivo **(a lunga vita!)**
- Intrinsecamente **sicuro**

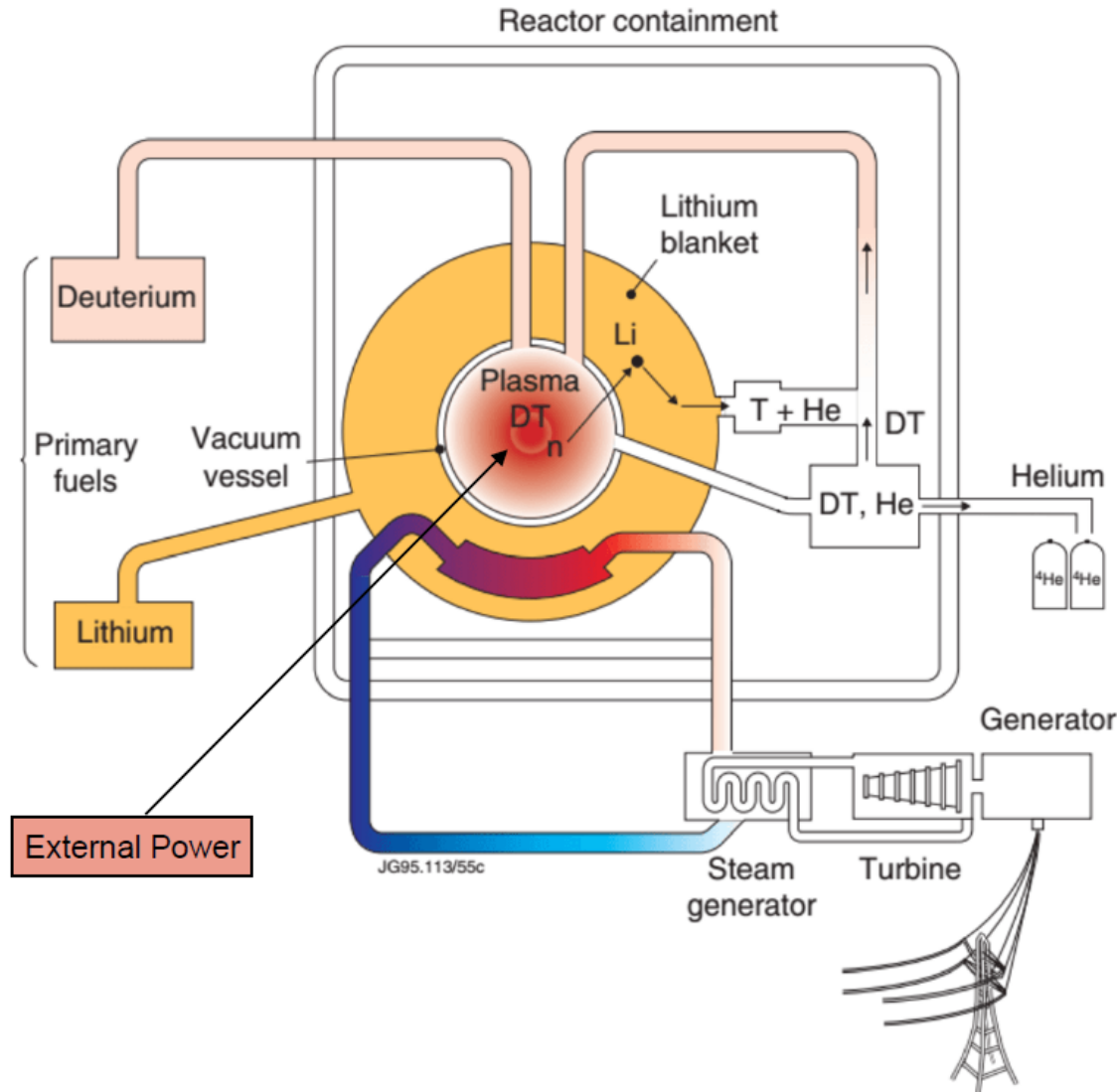


- **Scienza** estremamente complessa
- **Ingegneria** ancora più complessa
 - **Costi** elevati
 - **Non esiste ancora!**

Foreseen future timeline toward fusion energy more in detail... (MCF)



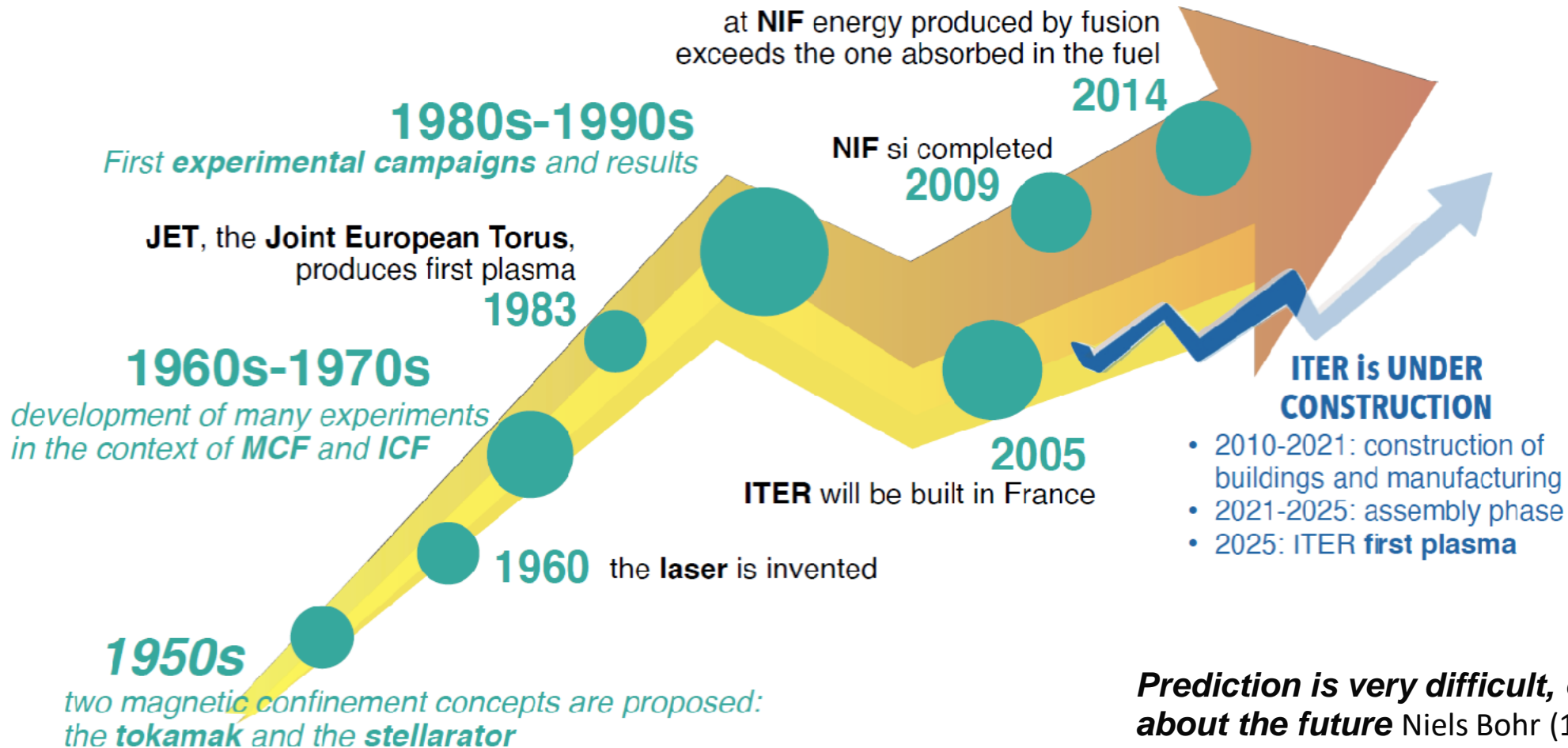
Schema di un impianto a fusione nucleare



Considerevoli sfide tecnologiche ed ingegneristiche

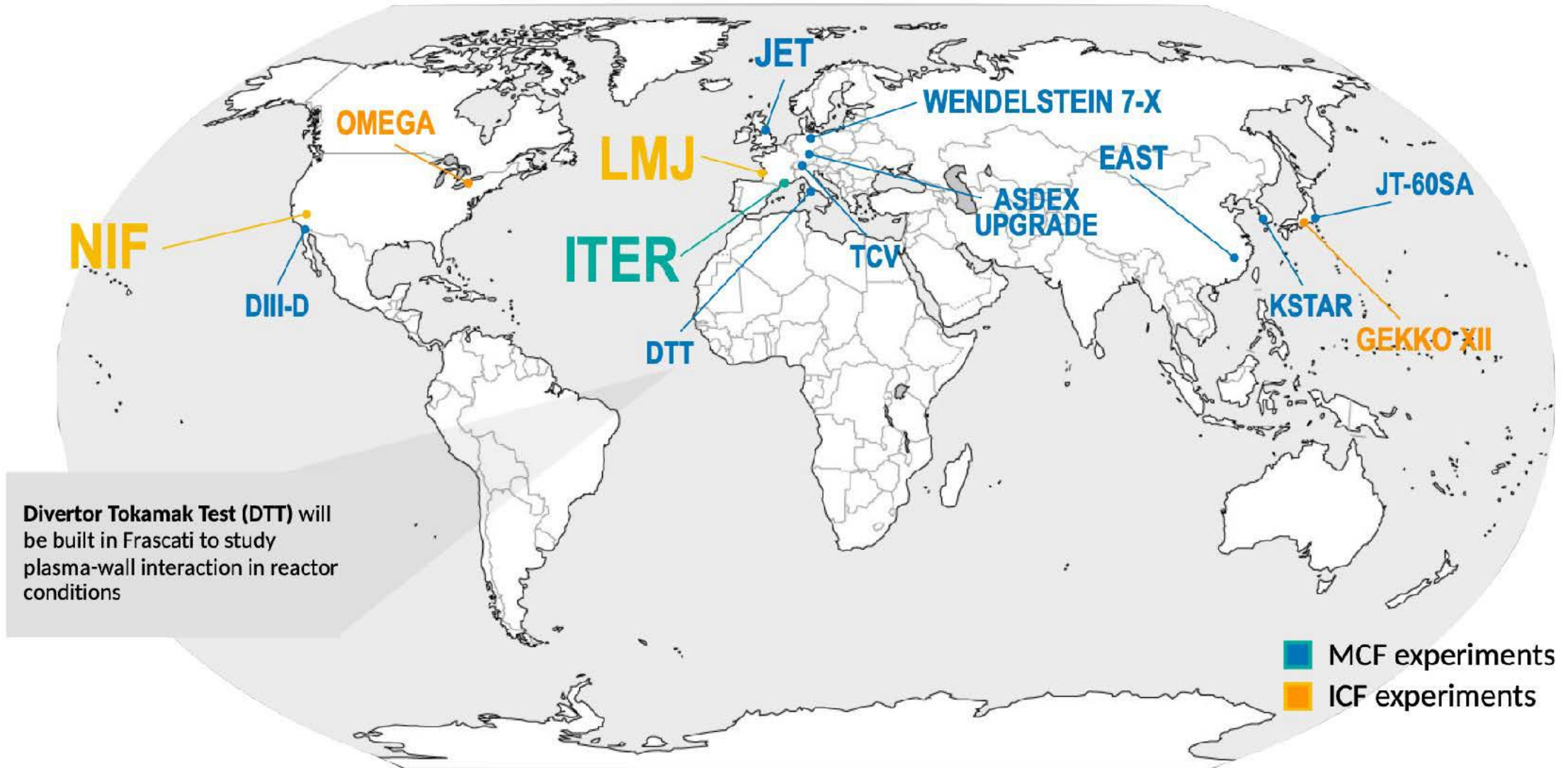
- Come **fornire energia** al plasma dall'esterno
- **Carichi termici** sui materiali e rimozione del calore
- **Irradiazione** dei materiali strutturali e di prima parete
- **Mantello**: trasporto del calore, gestione e trasporto del trizio
- Sistemi di **conversione** dell'energia

History of fusion research in a nutshell



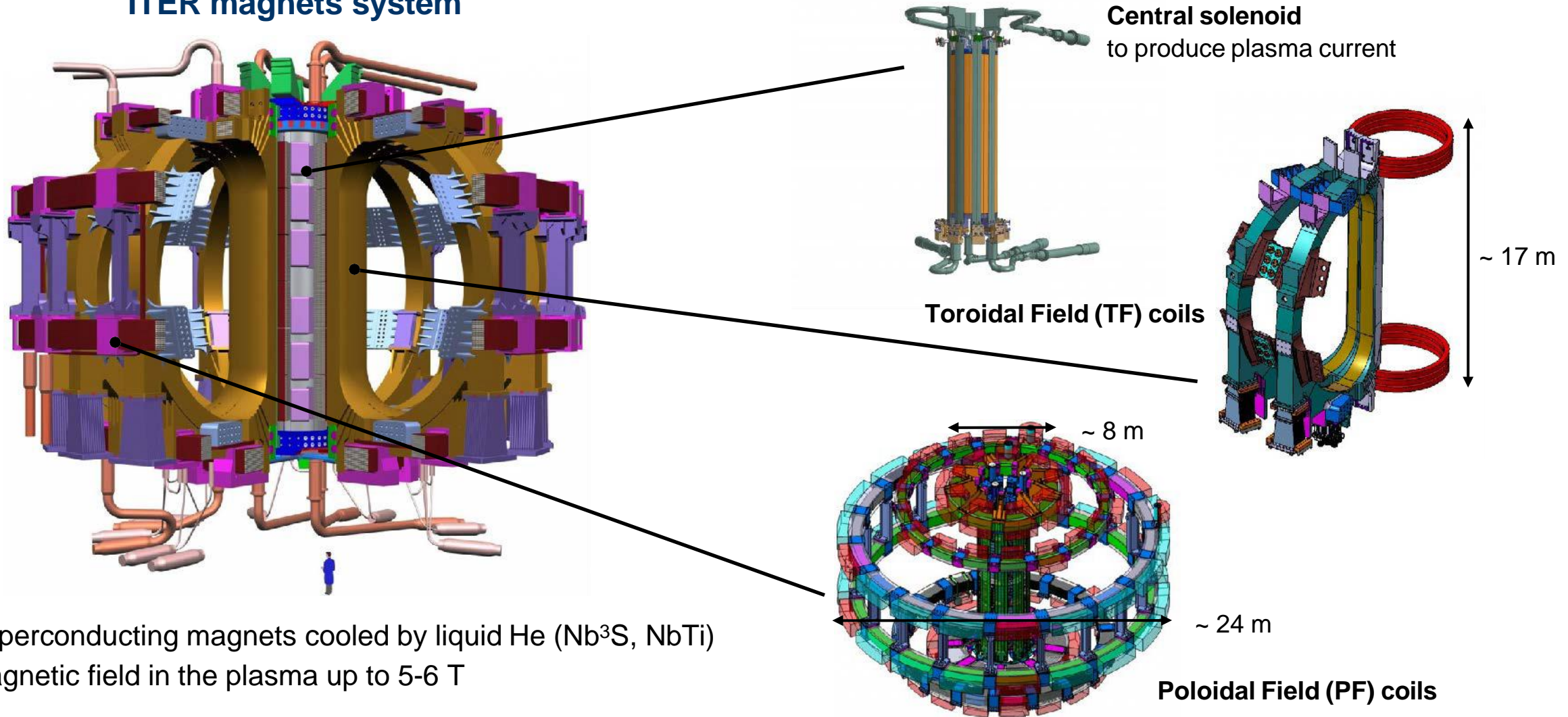
("Fusion will be achieved within the next 10 years!")

Today's world map of fusion research



Technology for fusion: superconducting magnets (MCF)

ITER magnets system



- Superconducting magnets cooled by liquid He (Nb^3S , NbTi)
- Magnetic field in the plasma up to 5-6 T

Technology for fusion: superconducting magnets (MCF)

Toroidal Field coils are built off-site

Europe will manufacture 10 TF coils and Japan 8 plus one spare. The first of the eighteen ITER TF coils has been built in Italy at La Spezia, by ASG Superconductors.



Poloidal Field coils are built on-site



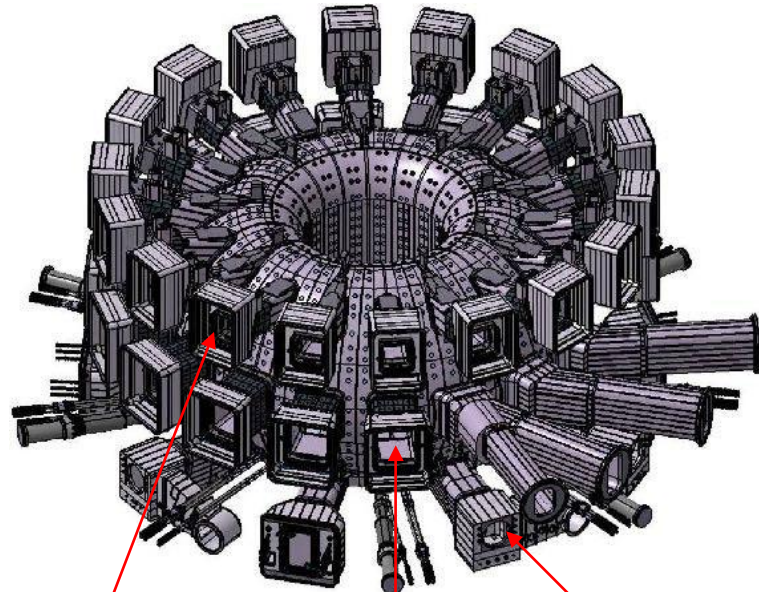
Poloidal Field coils under construction

PF coils construction building

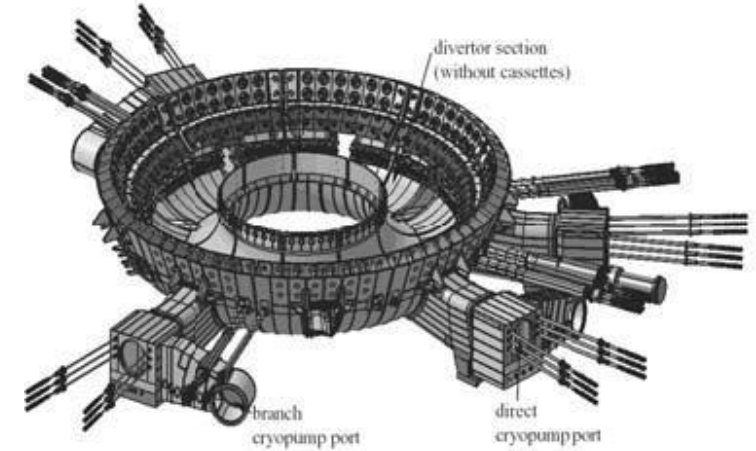
Tokamak building



Technology for fusion: vacuum vessel and pumping system (MCF)

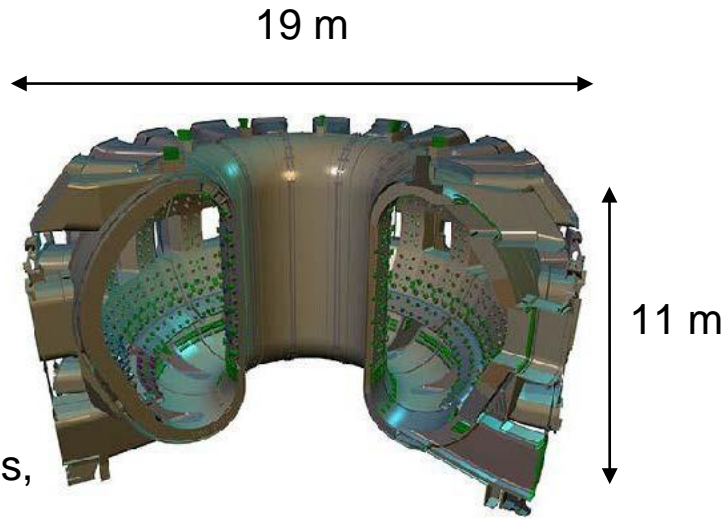


- First safety barrier
- Inner diameter: 6 m
- 5.000 t
- 1.400 m³
- Inner surface hosting first wall and test blanket modules



18 sup access
17 equatorial access
9 inf access

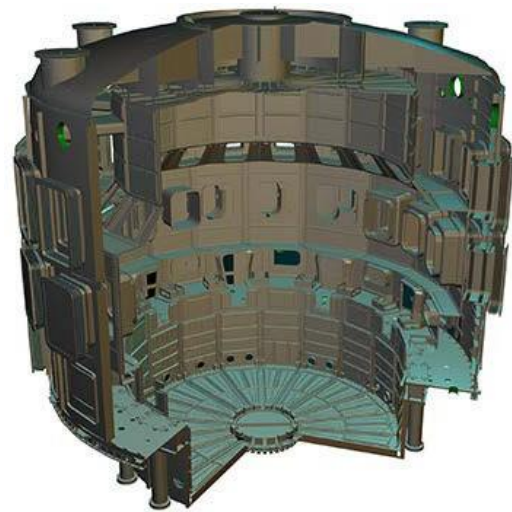
for: diagnostics, external heating, vacuum systems, remote handling



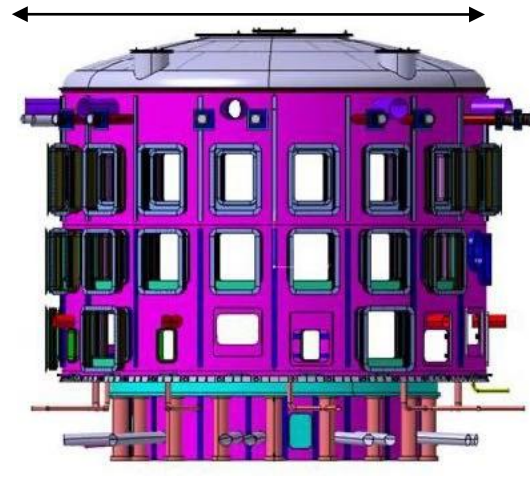
- Need to make vacuum over 1.400 m³ (vessel) and 8.500 m³ (cryostat)
- Vacuum level: < 1e-3 mbar
- 24-48 hours required

Technology for fusion: the criostat (MCF)

Cryostat



36 m



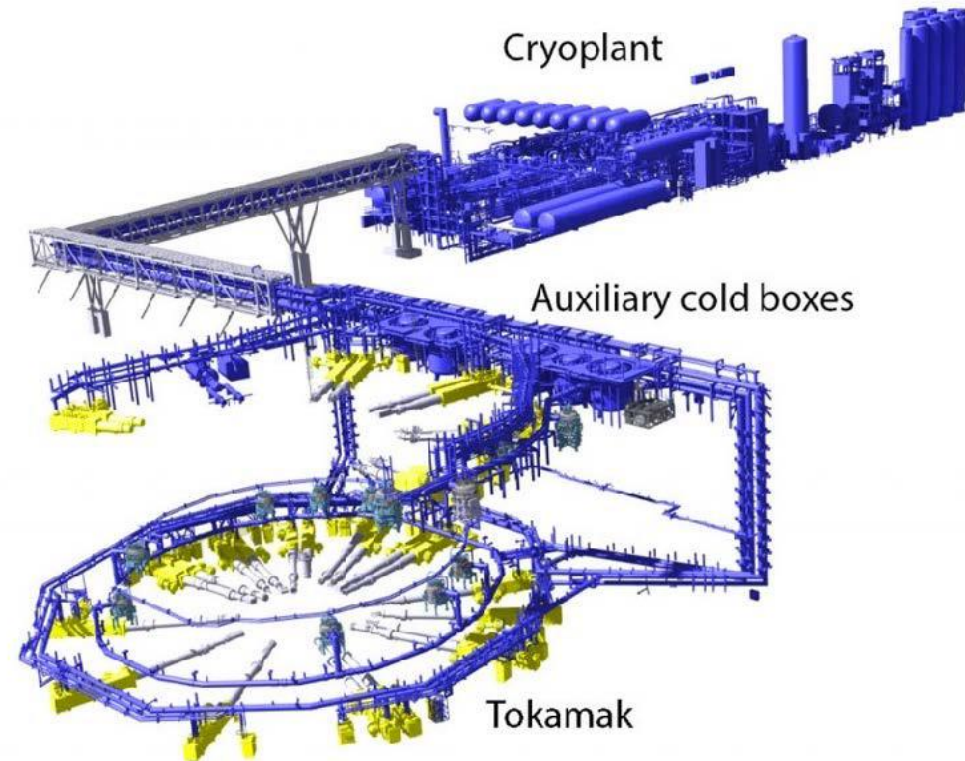
31 m

Liquid He cryogenic system is required
(world largest)

Access for:

- Diagnostics
- External heating
- Cooling system
- ...
- Stainless steel
- Two concentric structures
- 8.500 m³
- He gas as thermal insulator

Bridge



Cryoplat

Auxiliary cold boxes

Tokamak



A cura di

prof. Matteo Passoni

Dr. Davide Orecchia

PhD. Elena Tonello

Grazie dell'attenzione!

Reattori di IV generazione

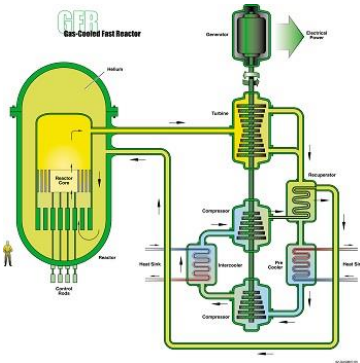


Expertise | Collaboration | Excellence

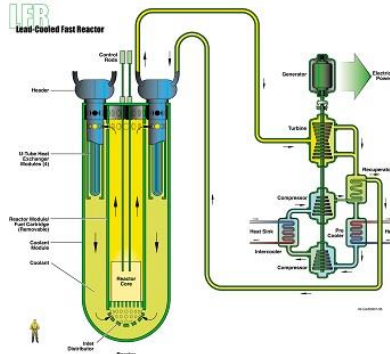


- 1. Sicurezza e affidabilità
- 2. Sostenibilità
- 3. Economicità
- 4. Resistenza alla proliferazione

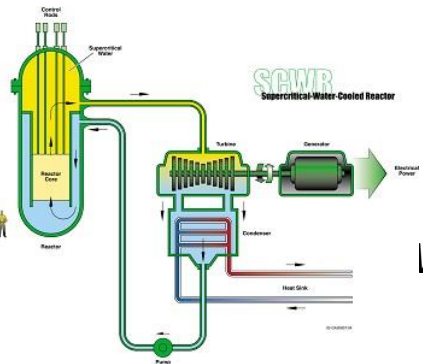
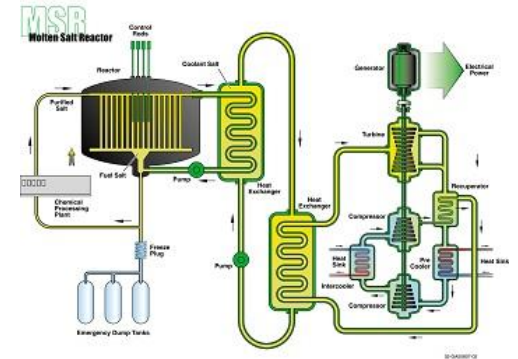
GFR
Gas-cooled Fast Reactor



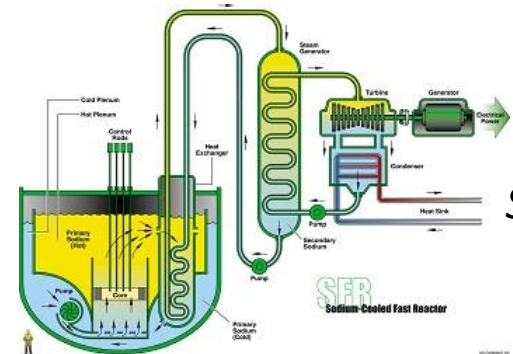
LFR
Lead-cooled Fast Reactor



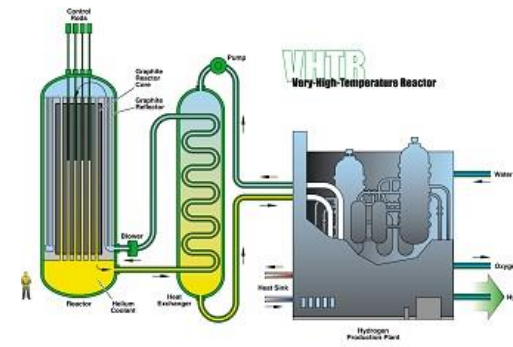
MSR
Molten Salt Reactor



SCWR
Supercritical Water Reactor

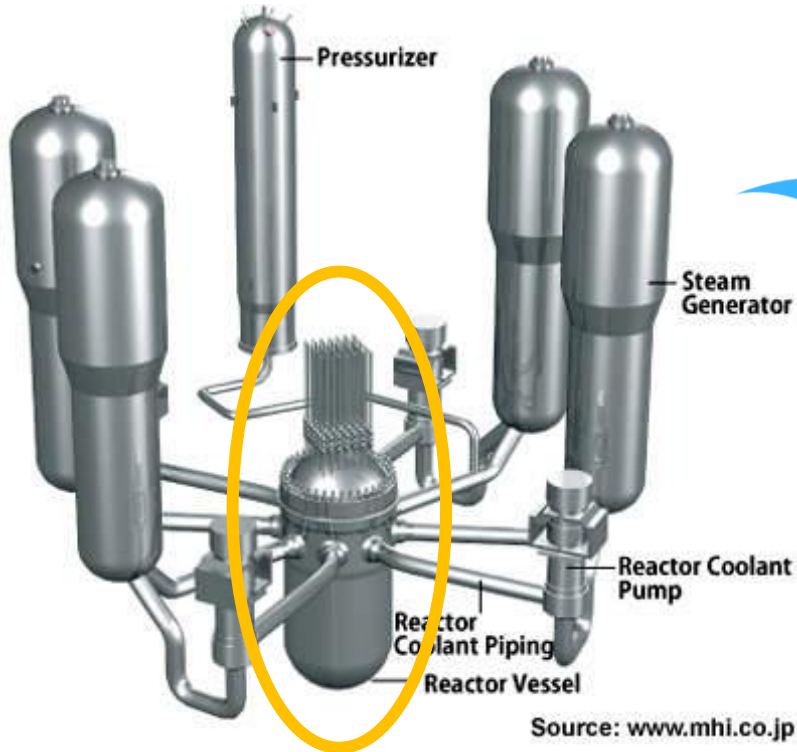


SFR
Sodium-cooled Fast Reactor

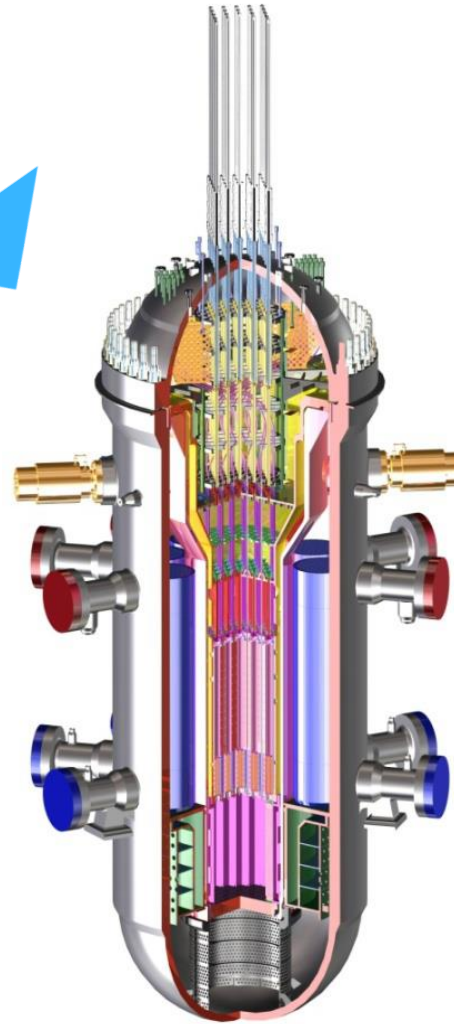


VHTR
Very High Temperature Reactor

Small Modular Reactors (SMR)



meno di
300 MWe



- Economicità
- Modularità
- Meno requisiti sul sito di installazione
- Sicurezza passiva
- Flessibilità di applicazione

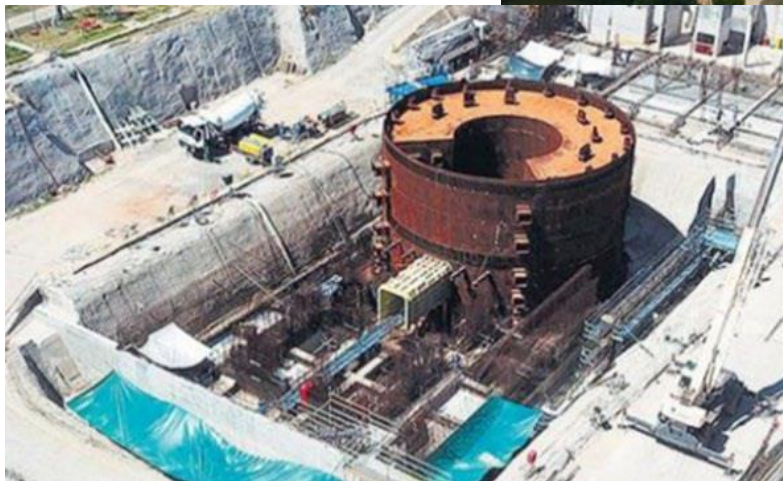
(teleriscaldamento, grande industria, produzione di idrogeno, desalinizzazione acqua marina)

Small Modular Reactors (SMR)



KLT-40S, Russia

HTR-PM, China



CAREM-25,
Argentina

- Economicità
- Modularità
- Meno requisiti sul sito di installazione
- Sicurezza passiva
- Flessibilità di applicazione

(teleriscaldamento, grande industria, produzione di idrogeno, desalinizzazione acqua marina)

Gli incidenti nucleari

Chernobyl (1986)

Come è successo?

Criticità dei reattori RBMK a bassa potenza. Gli operatori hanno portato il reattore in condizione di criticità, violando le norme di sicurezza.

Può succedere ancora?

No, i reattori RBMK sono stati utilizzati solo in Unione Sovietica e comunque ora sono tutti spenti. I paesi occidentali non hanno mai utilizzato questo tipo di reattore perché non rispettava i criteri di sicurezza.

Quali sono i danni alla salute?

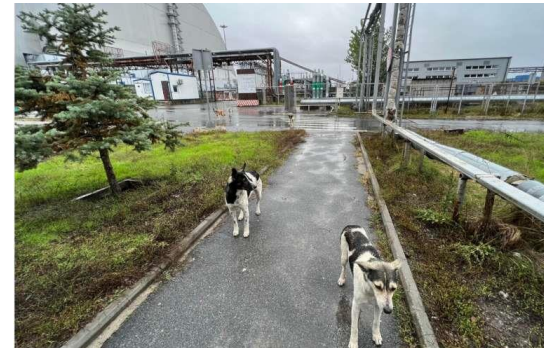
Danni da radiazione: dobbiamo distinguere tra effetti deterministici (alte dosi) ed effetti stocastici (dosi più basse). I danni deterministici si manifestano come **sindrome acuta da radiazioni (ARS)**, mentre gli effetti stocastici sono molto difficili da stimare.

Quante sono state le vittime?

3 lavoratori morti a causa dell'esplosione del reattore. 134 lavoratori della centrale ricoverati per ARS. Di questi, 28 sono morti a poca distanza dall'incidente. Furono evacuate 115.000 persone.

Quali sono le condizioni oggi?

Dose attuale a Chernobyl: 1-10 microSv/h.
Stiamo parlando dello stesso ordine di grandezza della dose ricevuta volando in aereo (5 microSv/h).



Nessun effetto generazionale

*Yeager M et al.,
Science 2021*

*UNSCEAR report
«Sources and
effects of ionizing
radiation»*

*G. J. Spatola et al.,
Science Advances 2023*

Gli incidenti nucleari

Come è successo?



Fukushima (2011)

Terremoto di magnitudo 9,1 e conseguente tsunami non hanno causato danni strutturali alla centrale. Mancanza di corrente elettrica e generatori di emergenza sommersi dall'acqua hanno causato il mancato raffreddamento del nucleo.

Può succedere ancora?

Dopo Fukushima, ingenti risorse sono state impiegate per dotare le centrali esistenti di sistemi di raffreddamento passivi (che non necessitano di corrente elettrica).

Quali sono i danni alla salute?

Danni da radiazione: dobbiamo distinguere tra effetti deterministici (alte dosi) ed effetti stocastici (dosi più basse). I danni deterministici si manifestano come **sindrome acuta da radiazioni (ARS)**, mentre gli effetti stocastici sono molto difficili da stimare.

Quante sono state le vittime?



37 lavoratori ricoverati con lesioni fisiche.
2 lavoratori ricoverati per bruciature da radiazione.
1 lavoratore morto nel 2018 per tumore ai polmoni, ritenuto direttamente causato dal disastro.
Il terremoto e lo tsunami hanno causato quasi 20.000 vittime.
Furono evacuate 154.000 persone.

Quali sono le condizioni oggi?

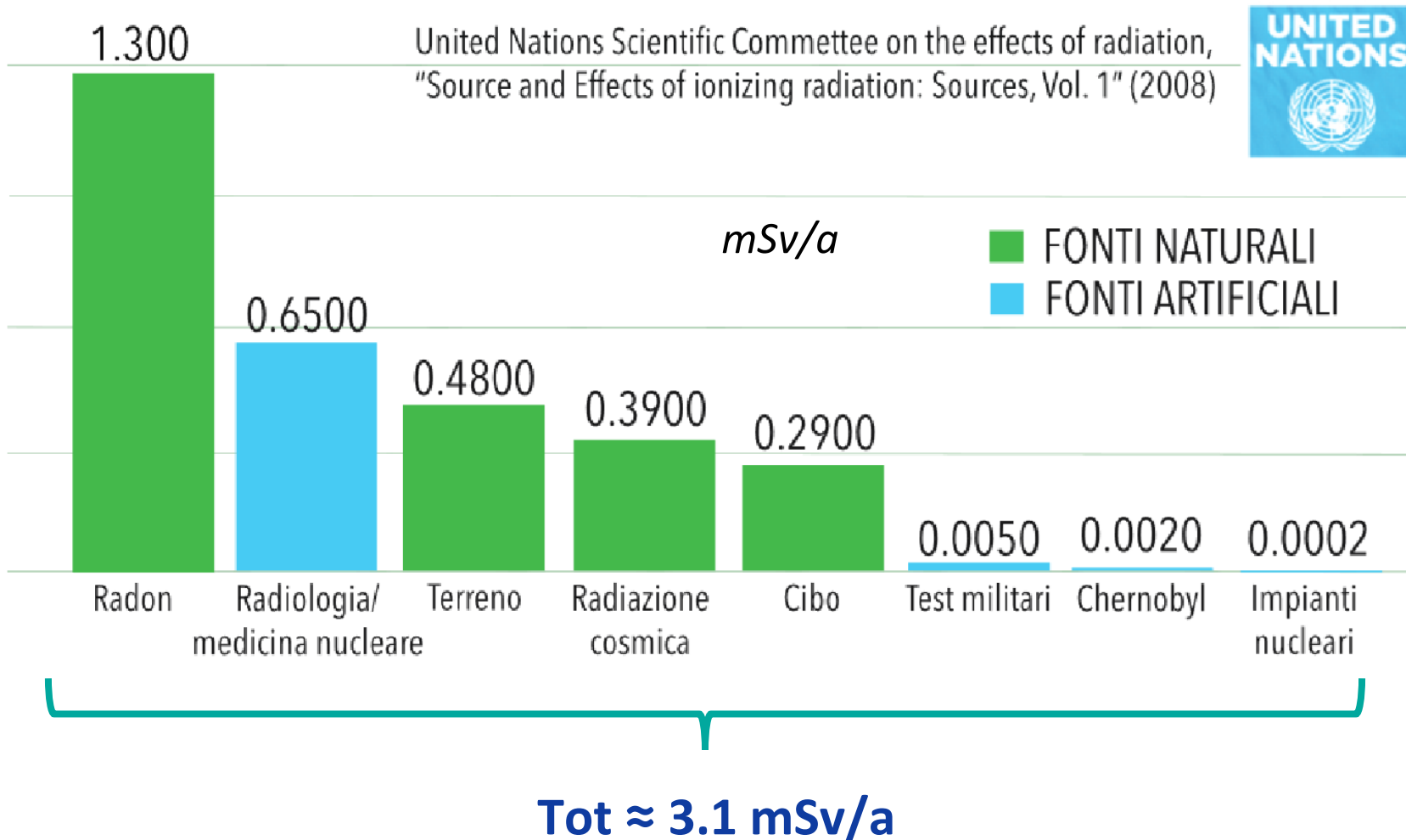
Stiamo parlando dello stesso ordine di grandezza della dose ricevuta volando in aereo (5 microSv/h).
Massima dose a Fukushima oggi: 3 microSv/h.

Nessun effetto generazionale

*Yeager M et al.,
Science 2021*

*UNSCEAR report
«Sources and effects of ionizing radiation»*

Fondo di radioattività naturale



≈ 7 mSv/a



50 e più mSv/a

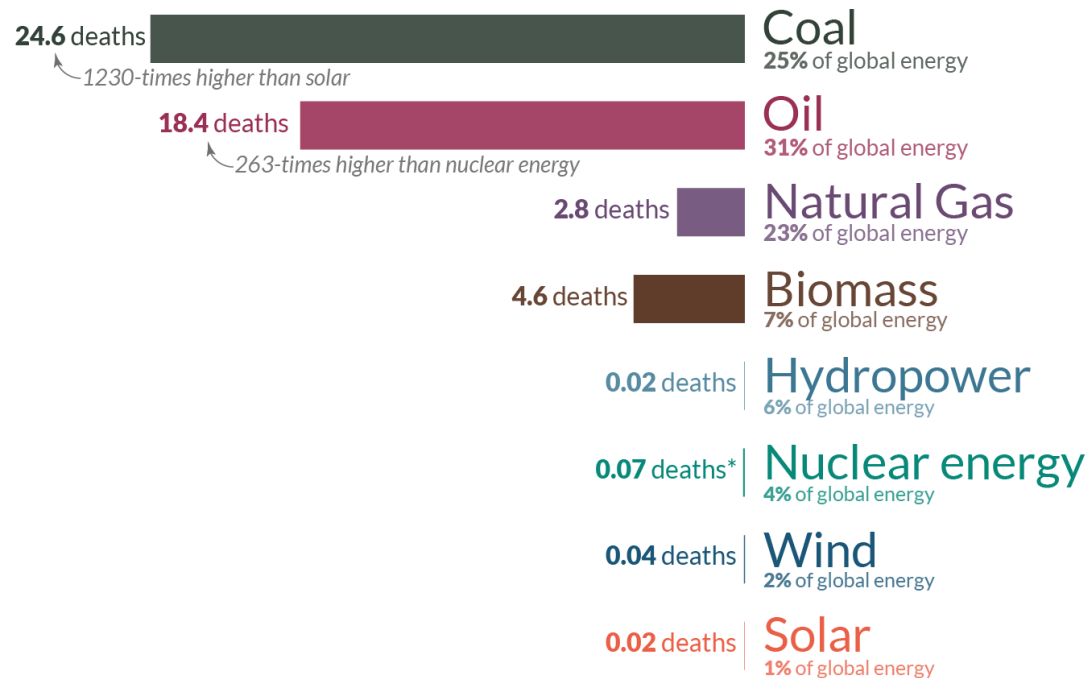
Confronto tra fonti di energia: più sicure e pulite



What are the **safest** and **cleanest** sources of energy?

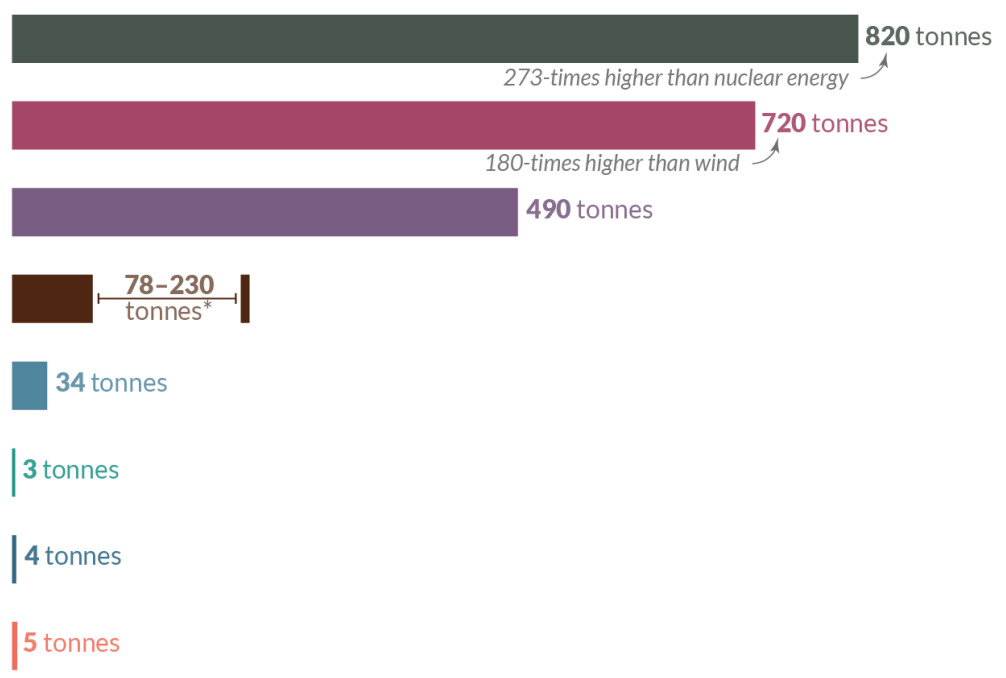
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of energy production.
1 terawatt-hour is the annual energy consumption of 27,000 people in the EU.



Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO₂-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 160 people in the EU.



*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop residues vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.

*The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).

Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.

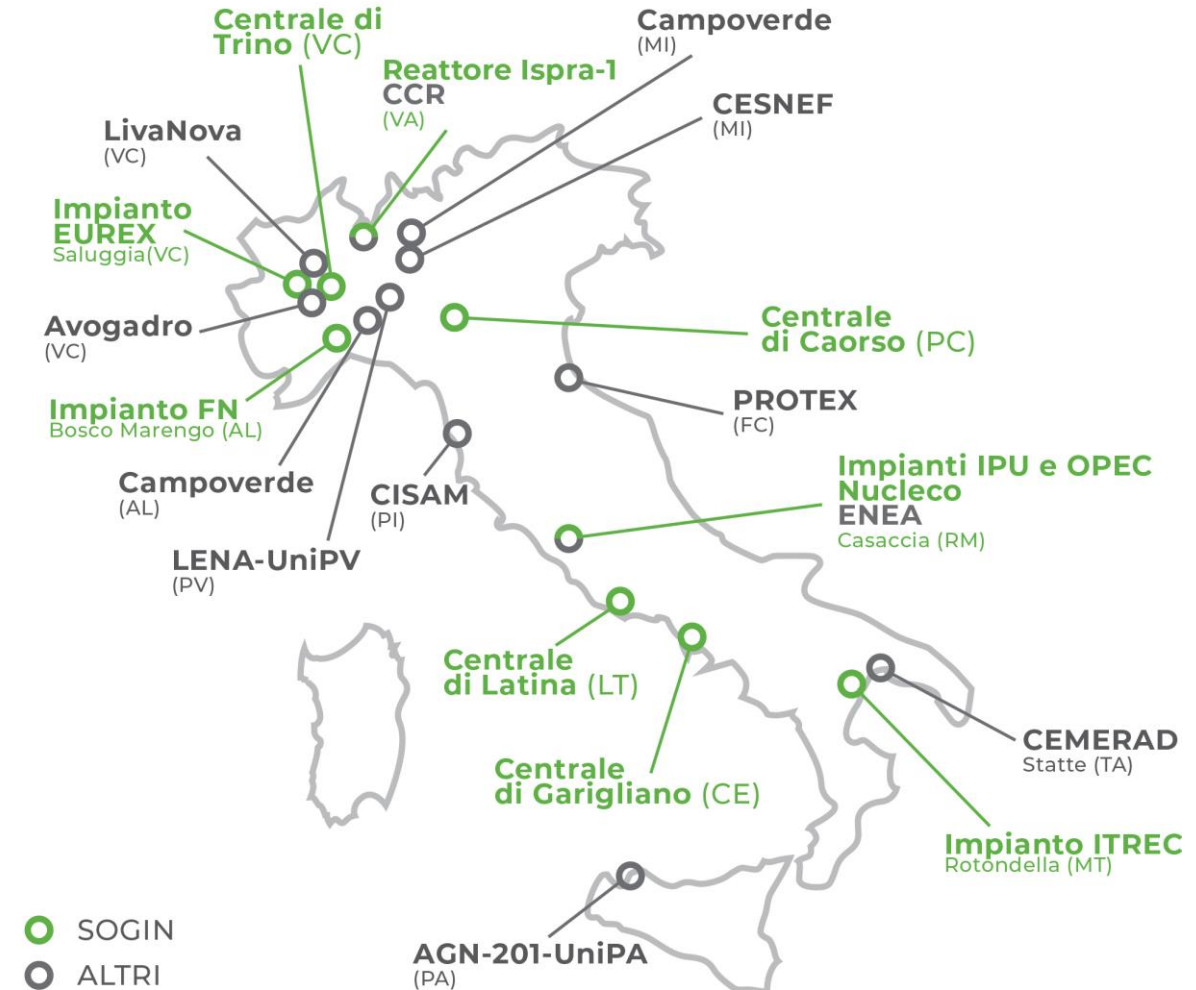
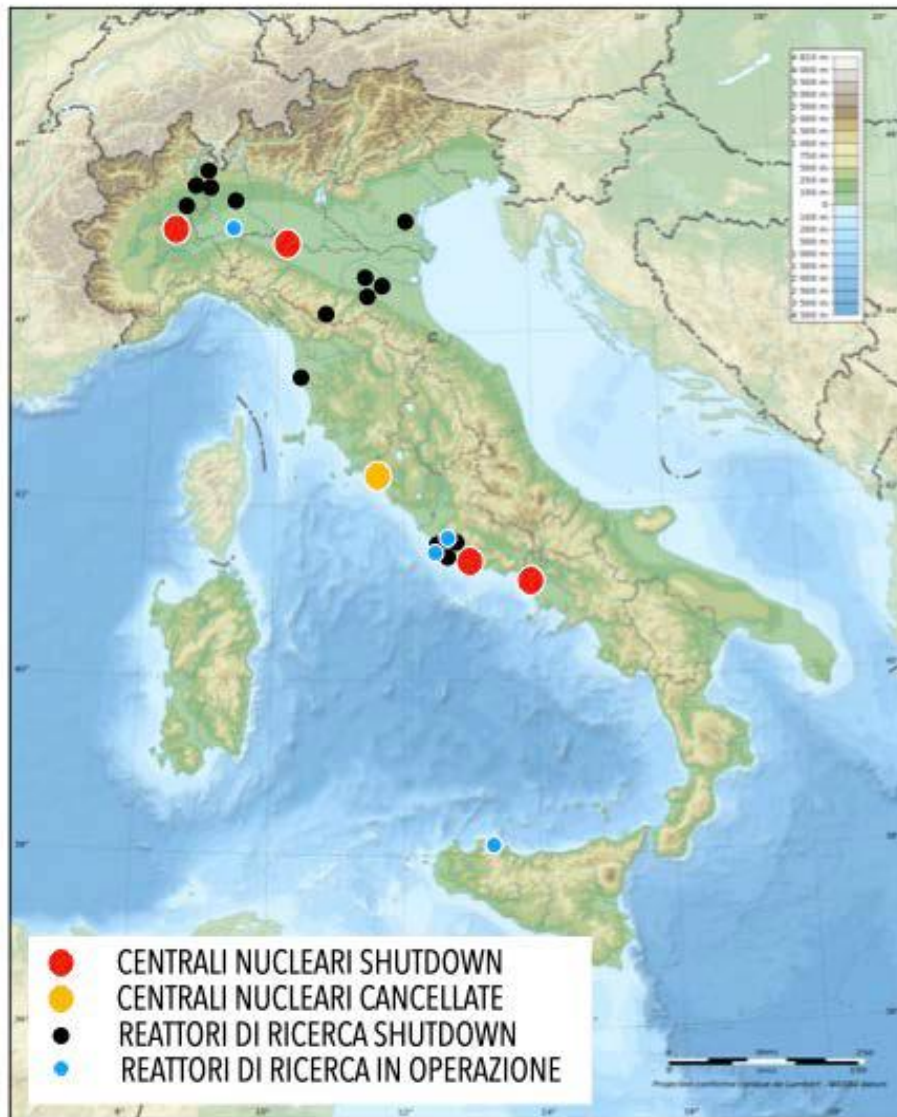
Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*;

Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).

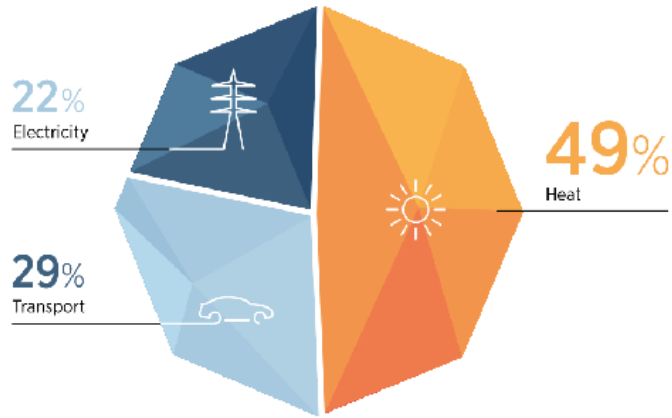
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world’s largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Ci sono reattori nucleari in Italia?



Decarbonizzazione: energia vs energia elettrica



Obiettivo estremamente ambizioso

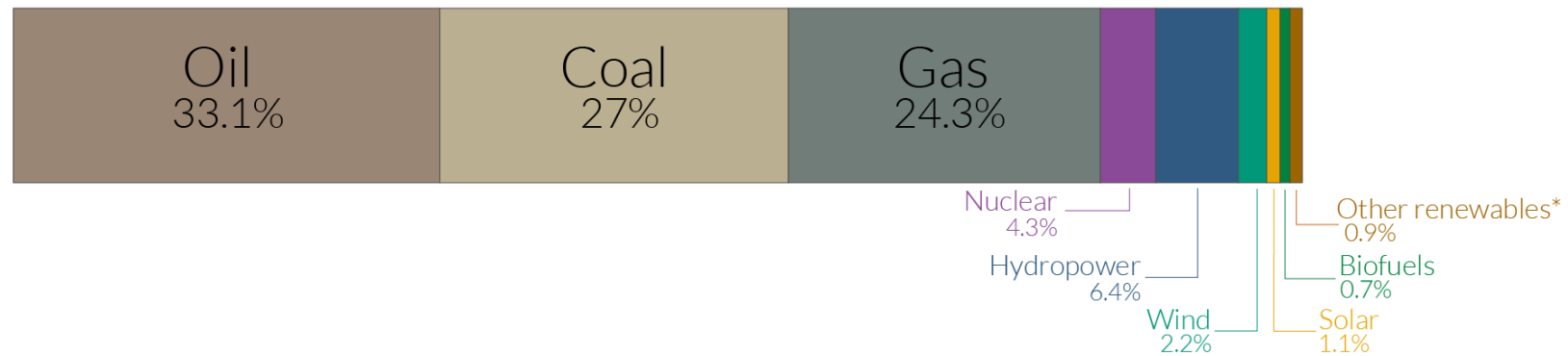
Global primary energy consumption by source

The breakdown of primary energy is shown based on the 'substitution' method which takes account of inefficiencies in energy production from fossil fuels. This is based on global energy for 2019.



84.3% of global energy comes from fossil fuels
(in 2000 it was 86.1%)

11.4% from renewables
15.7% from low-carbon sources



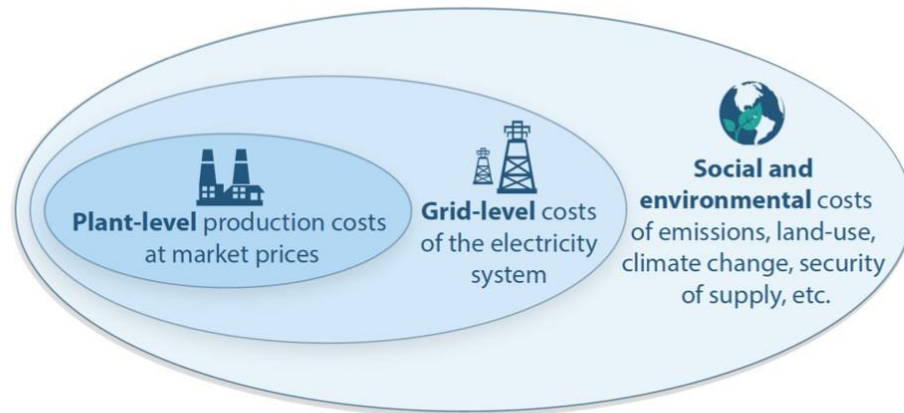
*'Other renewables' includes geothermal, biomass, wave and tidal. It does not include traditional biomass which can be a key energy source in lower income settings.
OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.



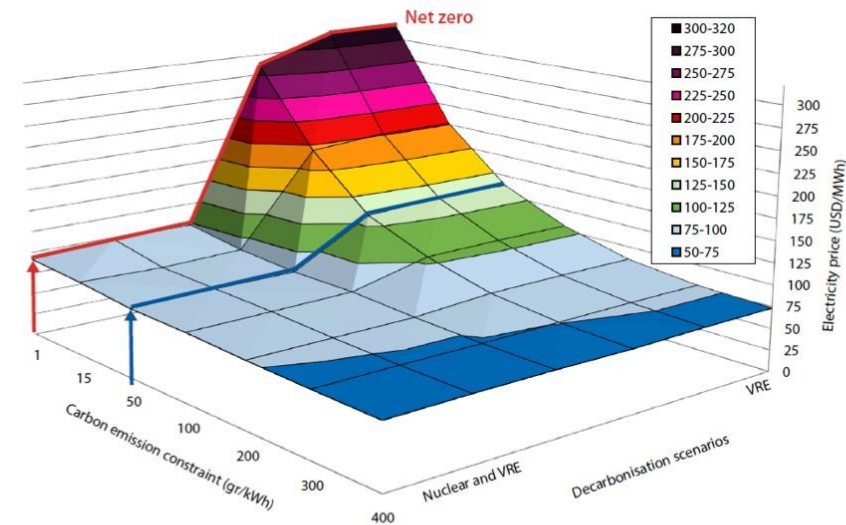
Nuclear Energy Agency (NEA) - report 2022

Understanding the costs of electricity provision



Understanding system costs of electricity

- To understand the costs of electricity provision requires systems level thinking combining plant-level costs, grid-level systems costs, and full social and environmental costs



Total costs for different mixes of electricity (driving to net-zero)

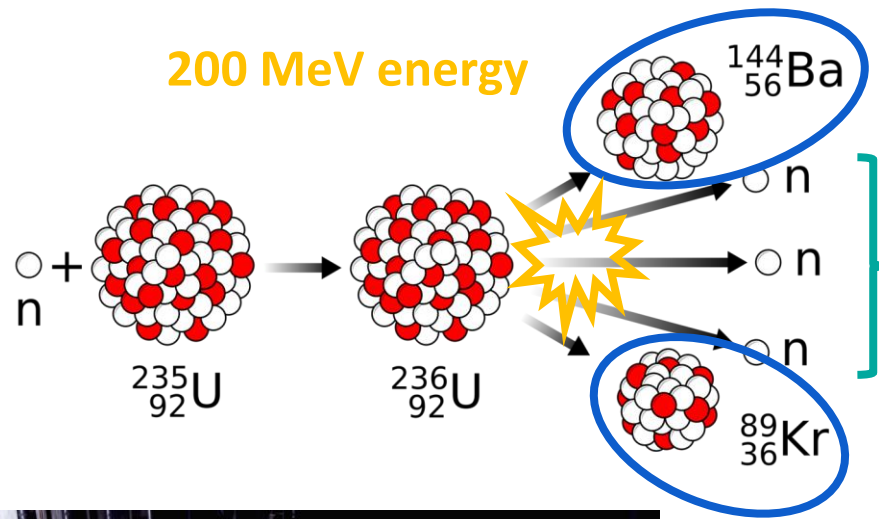
- This 3-dimensional graph shows the effects on total costs as carbon emissions are increasingly constrained. The red line shows what happens to total costs when carbon constraints reach net-zero emissions.

Decarbonizzazione: scenari futuri

Organisation	Scenario	Climate target	Nuclear innovation	Description	Role of nuclear energy by 2050	
					Capacity (GW)	Nuclear growth (2020-50)
IAEA (2021b)	High Scenario	2°C	Not included	Conservative projections based on current plans and industry announcements.	792	98%
IEA (2021c)	Net Zero Scenario (NZE)	1.5°C	Not included but HTGR and nuclear heat potential are acknowledged.	Conservative nuclear capacity estimates. NZE projects 100 gigawatts more nuclear energy than the IEA sustainable development scenario.	812	103%
Shell (2021)	Sky 1.5 Scenario	1.5°C	Not specified	Ambitious estimates based on massive investments to boost economic recovery and build resilient energy systems.	1 043	160%
IIASA (2021)	Divergent Net Zero Scenario	1.5°C	Not specified	Ambitious projections required to compensate for delayed actions and divergent climate policies.	1 232	208%
Bloomberg NEF (2021)	New Energy Outlook Red Scenario	1.5°C	Explicit focus on SMRs and nuclear hydrogen	Highly ambitious nuclear pathway with large scale deployment of nuclear innovation.	7 080	1670%

Many pathways require global installed nuclear capacity to grow significantly, often more than doubling by 2050.

Sicurezza, combustibile e proliferazione



Prodotti di fissione
Mezza tavola periodica!

Reazione a catena

${}^{235}\text{U}$ 0.72 %
 ${}^{238}\text{U}$ 99.28%

Aricchimento

Separazione isotopica

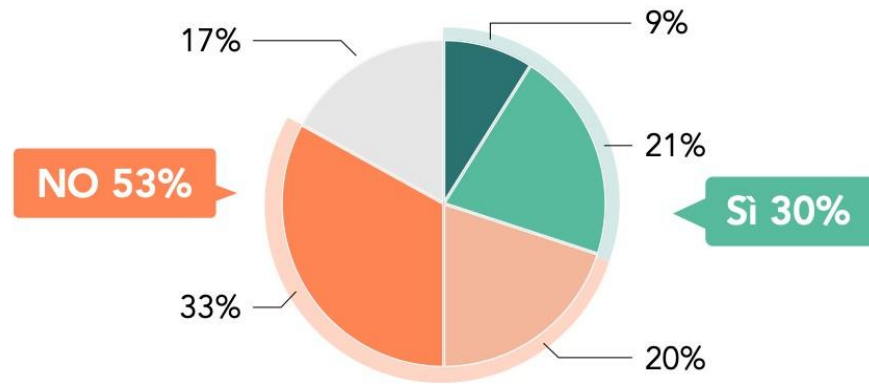
Radioattività e
calore di
decadimento



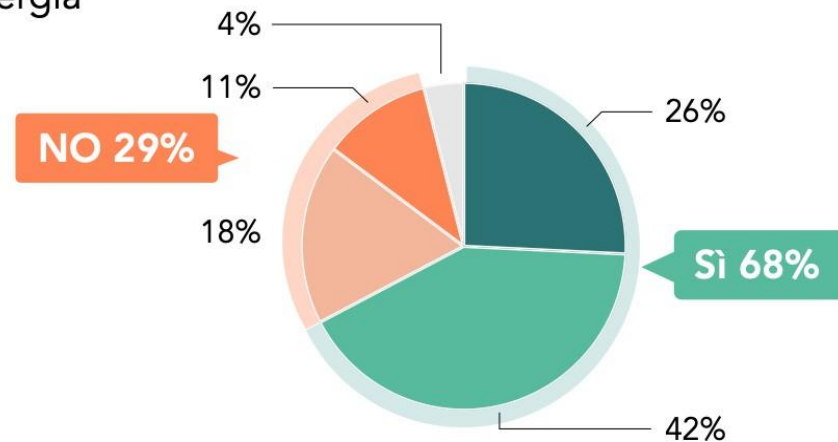
Control rods, safety injection liquid, emergency core cooling systems (high and low pressure), automatic depressurization systems, containment spray system, diesel generators, flywheels, batteries, fuel cladding, reactor vessel, primary and secondary containment, standby gas treatment system...

Accettabilità sociale

Quesito proposto in Italia: Sarebbe favorevole a riconsiderare l'energia nucleare tra le fonti di energia sostenibile?



Quesito proposto negli Stati Uniti: È d'accordo con l'utilizzo dell'energia nucleare negli Stati Uniti?



- Molto d'accordo
- Abbastanza d'accordo
- Abbastanza in disaccordo
- Molto in disaccordo
- Non saprei