

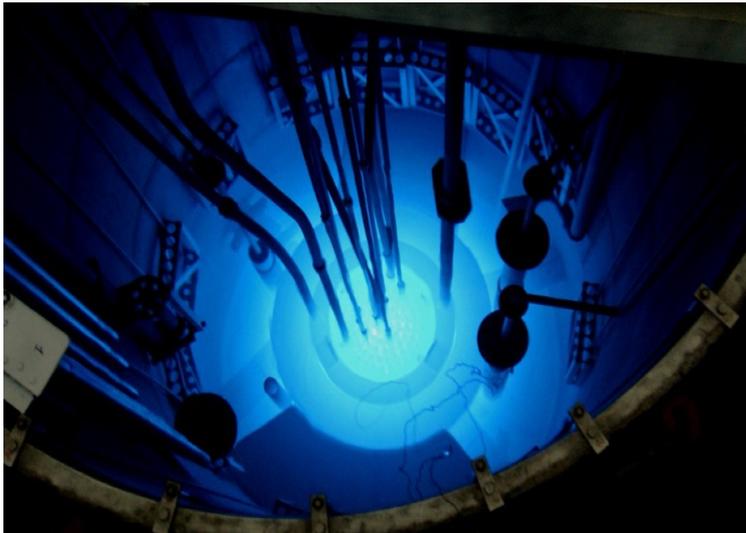


Energia nucleare

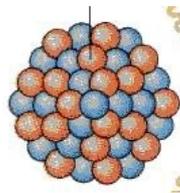
spunti di riflessione



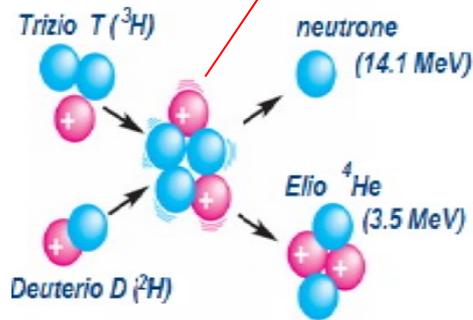
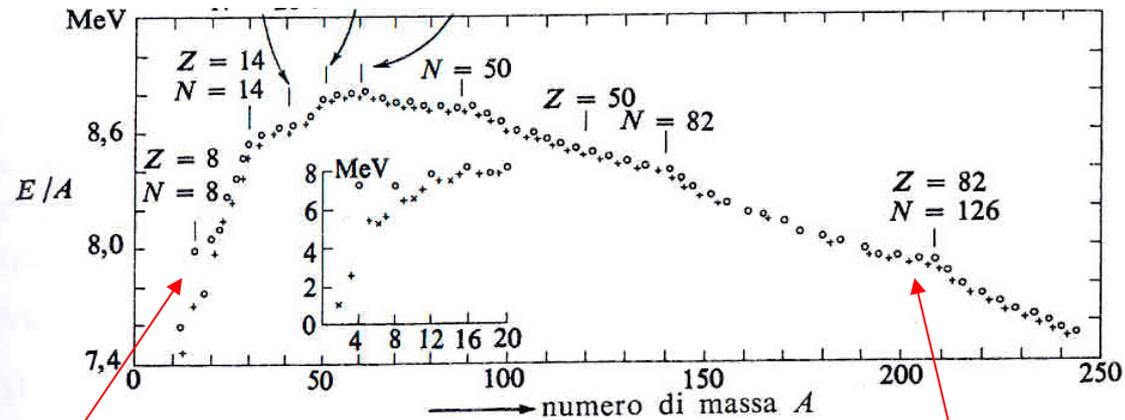
Saverio Altieri
DIPARTIMENTO DI FISICA



ENERGIA dal nucleo



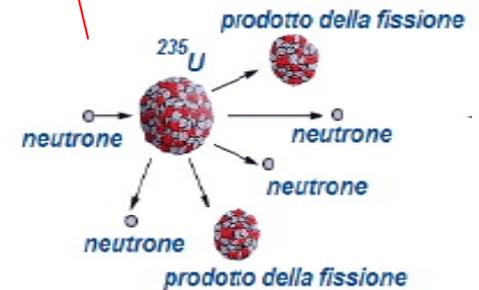
$${}^A_Z X \quad A=Z+N$$



FUSIONE

$$E = mc^2$$

Equazione di
Einstein

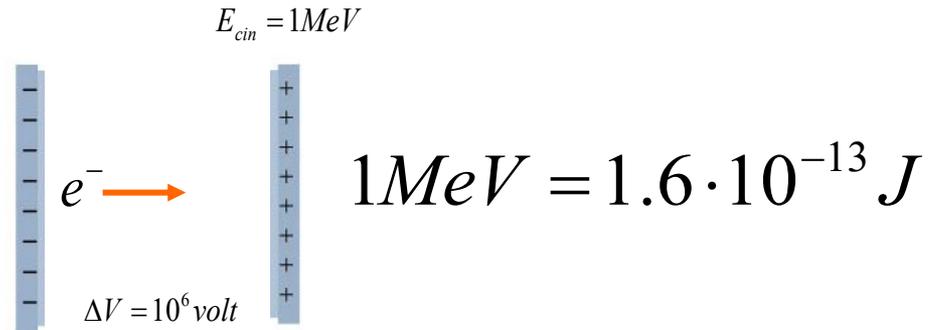


FISSIONE

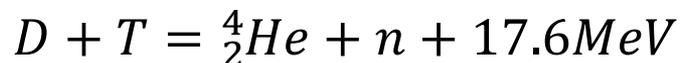
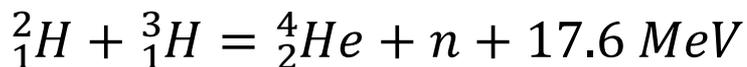
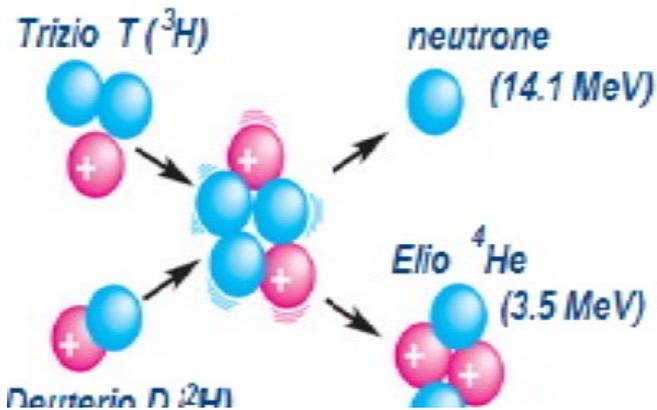
ENERGIA dal nucleo - fusione e fissione

$$E = mc^2$$

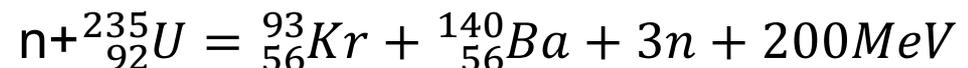
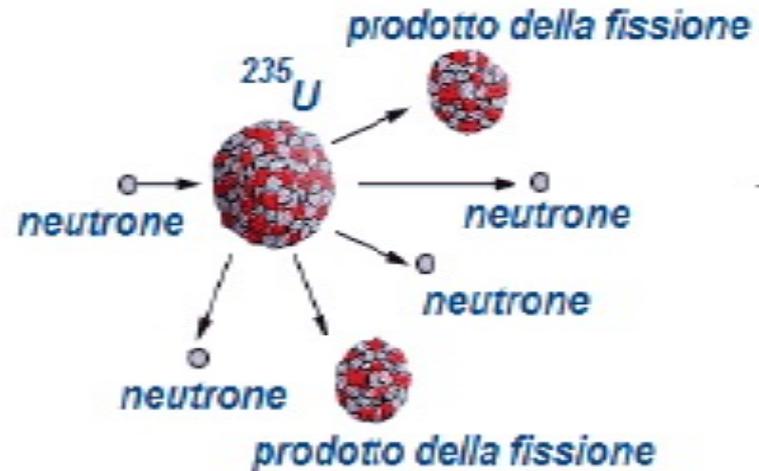
Equazione di Einstein



FUSIONE



FISSIONE



ENERGIA dal nucleare – confronto con fonti fossili

COMBUSTIBILE	H _i [MJ/kg]
Petrolio greggio	41,9
Benzina auto	44,0
GPL	45,7
Gasolio	42,9
Gas naturale	35,9
Metano	37,8
Coke	30,2
Litantrace	31,5

Fusione

250 g di D + 750 g di ⁶Li

216 milioni di MJ

Fissione

1000 g di ²³⁵U

82 milioni di MJ

*Consumo giornaliero di una centrale da 3000 MW
in 1 giorno = 24 h produce energia termica pari a
3000 MW x 24 h = 72 GWh*

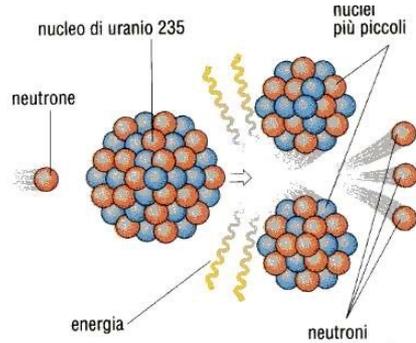
si consumano

3 kg ²³⁵U

5880 ton di petrolio

7800 ton di carbone

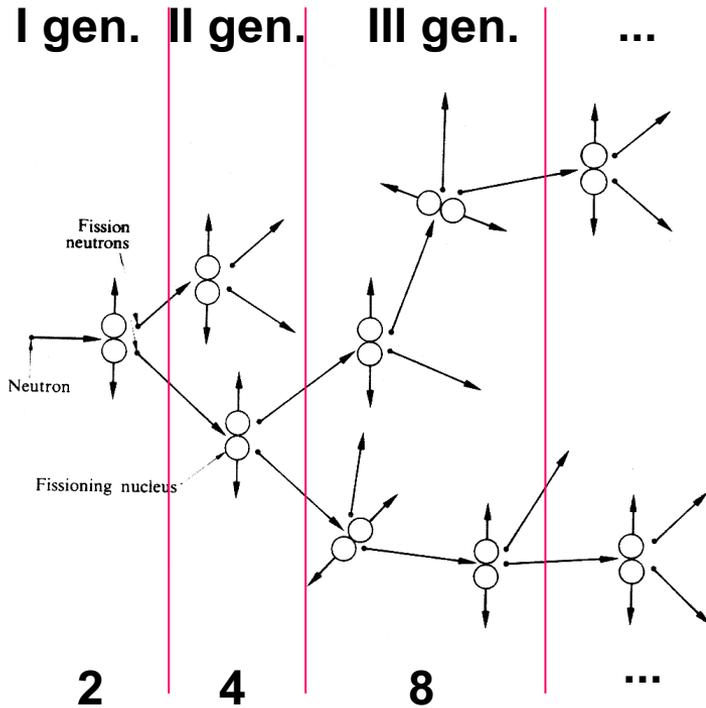
Fissione – la reazione a catena



FATTORE DI MOLTIPLICAZIONE

$$K = \frac{n. \text{ in data gen.}}{n. \text{ in gen. prec.}}$$

$$K \begin{cases} < 1 \rightarrow \text{pop. decresc.} \rightarrow r. \text{ sottocrit.} \\ = 1 \rightarrow \text{pop. costante} \rightarrow \text{REATTORE CRITICO} \\ > 1 \rightarrow \text{pop. crescente} \rightarrow r. \text{ sopracrit.} \end{cases}$$



Reazione autosostenentesi

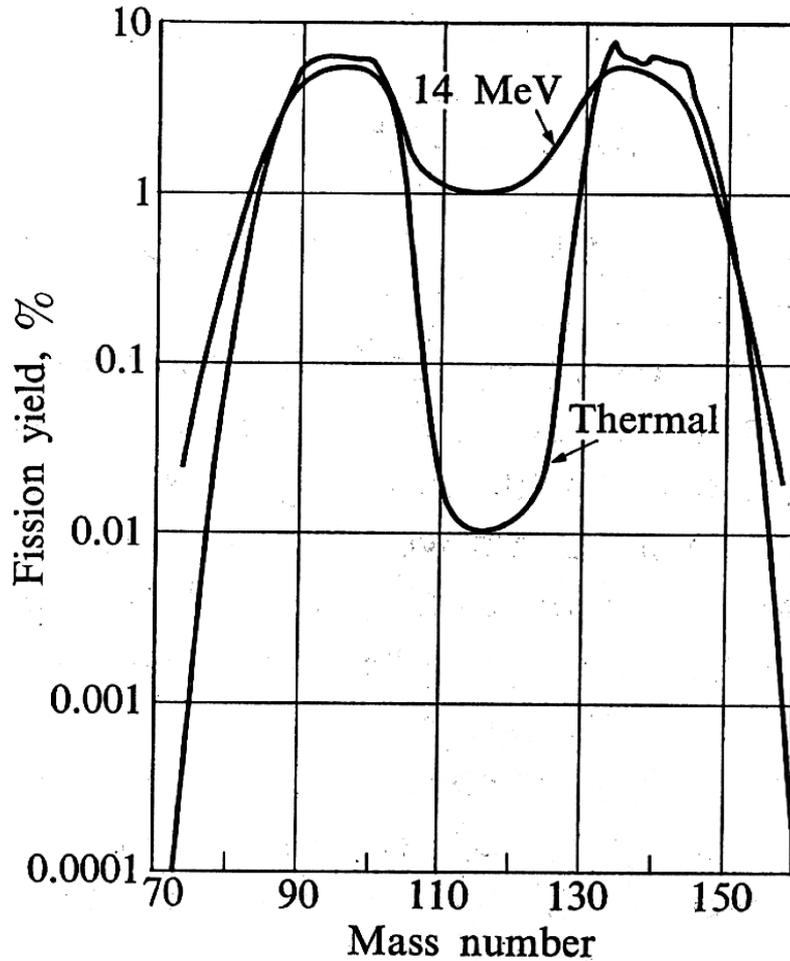
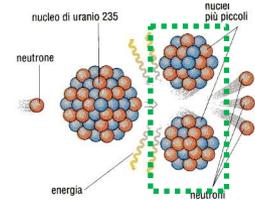
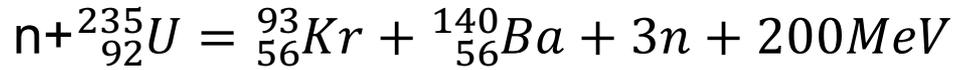
In un reattore nucleare
la reazione procede in maniera
controllata

Due problem da risolvere

Fuga dei neutroni
dal sistema

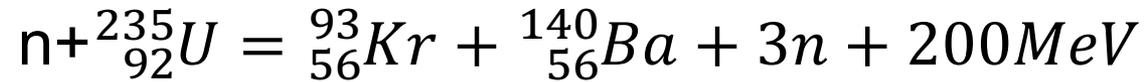
Catture parassite
dei neutroni

I prodotti di fissione



Nuclide	Half-life	Activity (PBq)
${}^{133}\text{Xe}$	5.3 d	6 500
${}^{131}\text{I}$	8.0 d	3 200
${}^{134}\text{Cs}$	2.0 y	180
${}^{137}\text{Cs}$	30.0 y	280
${}^{132}\text{Te}$	78.0 h	2 700
${}^{89}\text{Sr}$	52.0 d	2 300
${}^{90}\text{Sr}$	28.0 y	200
${}^{140}\text{Ba}$	12.8 d	4 800
${}^{95}\text{Zr}$	1.4 h	5 600
${}^{99}\text{Mo}$	67.0 h	4 800
${}^{103}\text{Ru}$	39.6 d	4 800
${}^{106}\text{Ru}$	1.0 y	2 100
${}^{141}\text{Ce}$	33.0 d	5 600
${}^{144}\text{Ce}$	285.0 d	3 300

I prodotti di fissione – sono radioattivi

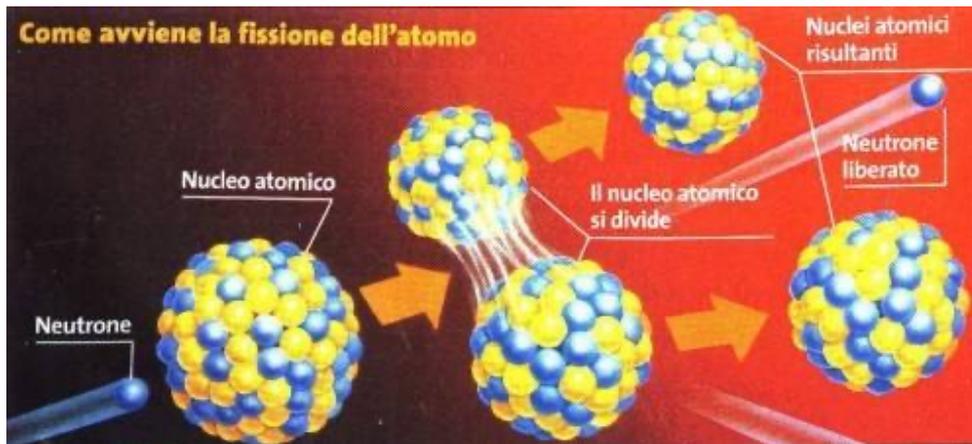


L'energia prodotta dalla fissione
la troviamo come energia
cinetica
dei prodotti di fissione

Sono radioattivi

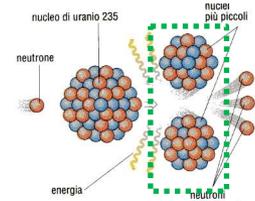


RIFIUTI RADIOATTIVI



emettono:
raggi beta (elettroni)
raggi gamma
neutrini

I prodotti di fissione – producono calore

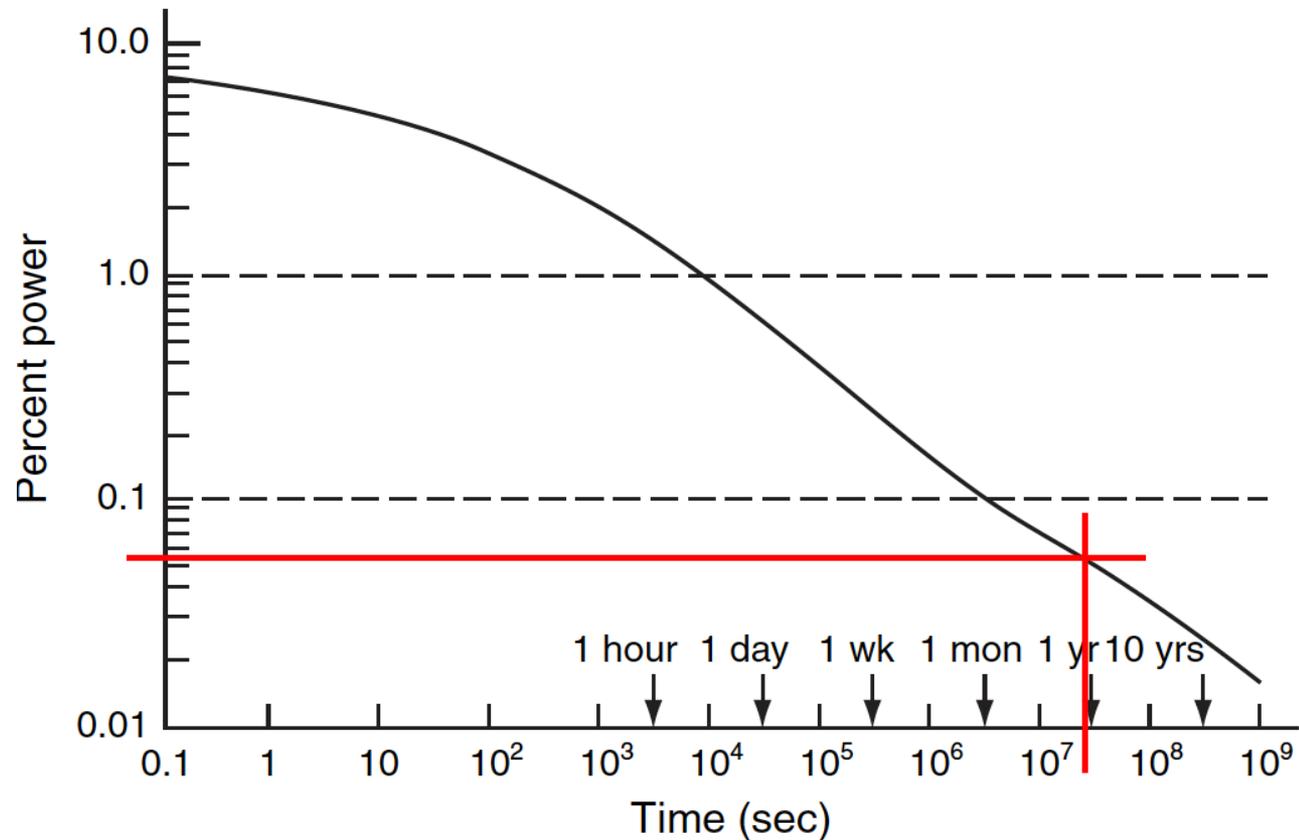


Sono radioattivi

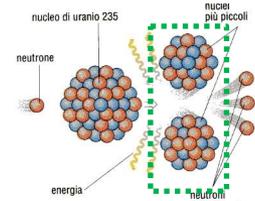


Producono calore
anche a reattore spento

**Fusione del nocciolo
se non interviene il
Sistema di
Raffreddamento di
Emergenza**



I prodotti di fissione - Fukushima



Sono radioattivi



Producono calore
anche a reattore spento

**Fusione del nocciolo
se non interviene il
Sistema di
Raffreddamento di
Emergenza**

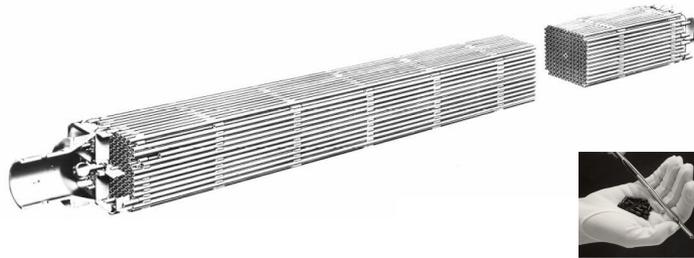
Incidente di Fukushima

11 marzo 2011



I componenti essenziali del nocciolo del reattore

In un reattore nucleare
la reazione procede in maniera
controllata



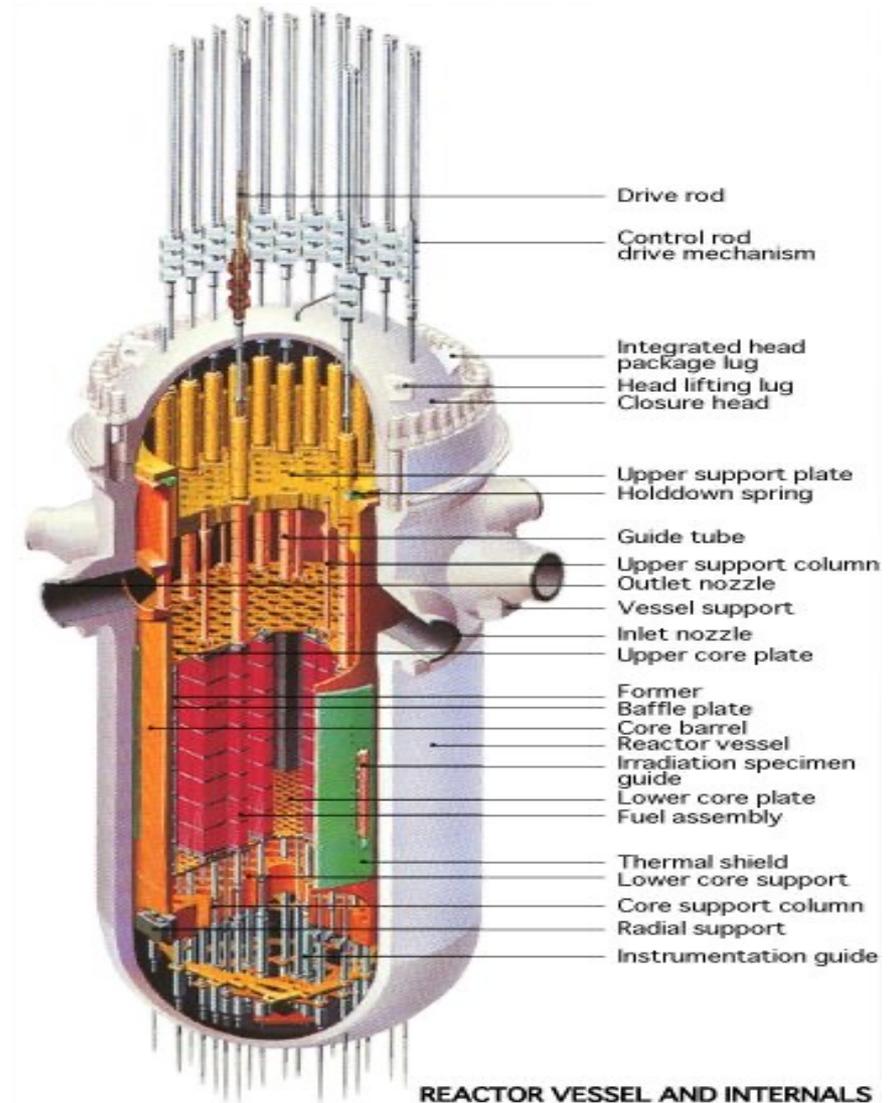
IL COMBUSTIBILE (^{235}U - ^{238}U)

IL MODERATORE (H_2O , D_2O , Be, Grafite ...)

IL RIFLETTORE (H_2O , D_2O , Be, Grafite ...)

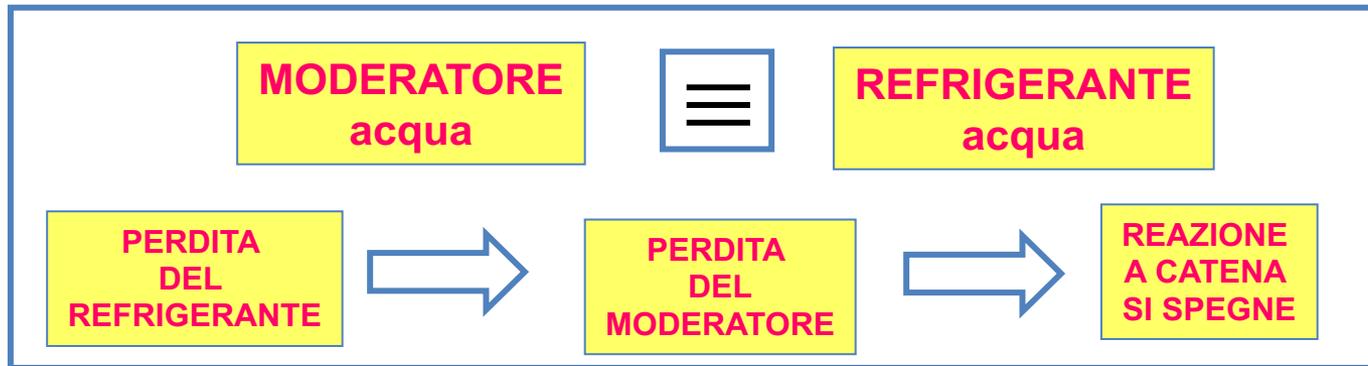
IL REFRIGERANTE (H_2O , D_2O , CO_2 ...)

LE BARRE DI CONTROLLO (B, Cd)



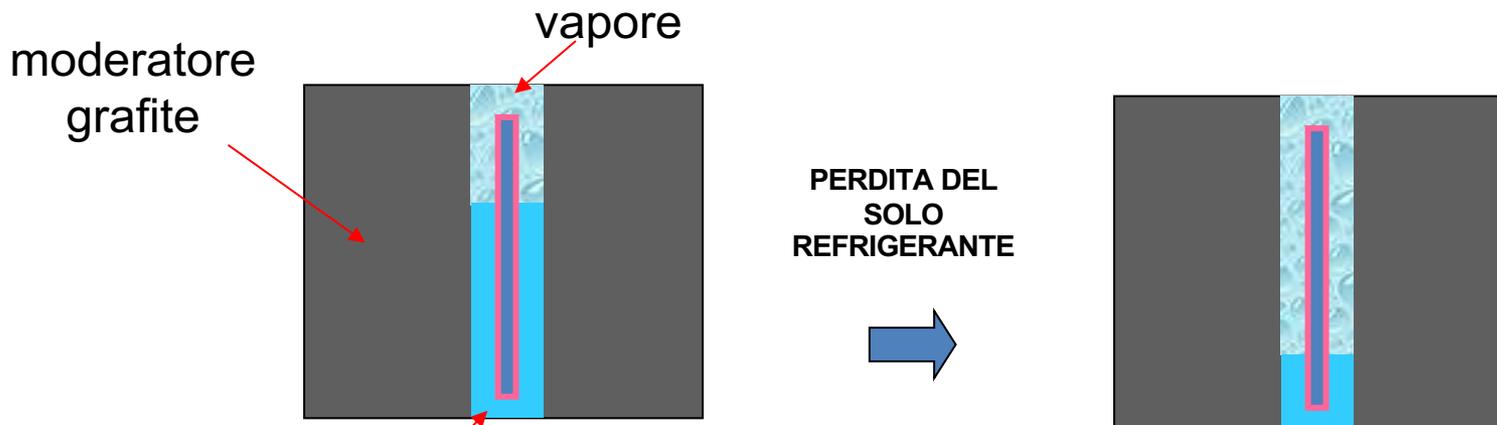
La sicurezza intrinseca coefficiente di vuoto negativo

Senza il rallentamento dei neutroni
la reazione a catena si spegne



coefficiente di vuoto **NEGATIVO**
OK per la sicurezza

La sicurezza intrinseca coefficiente di vuoto positivo



refrigerante
acqua

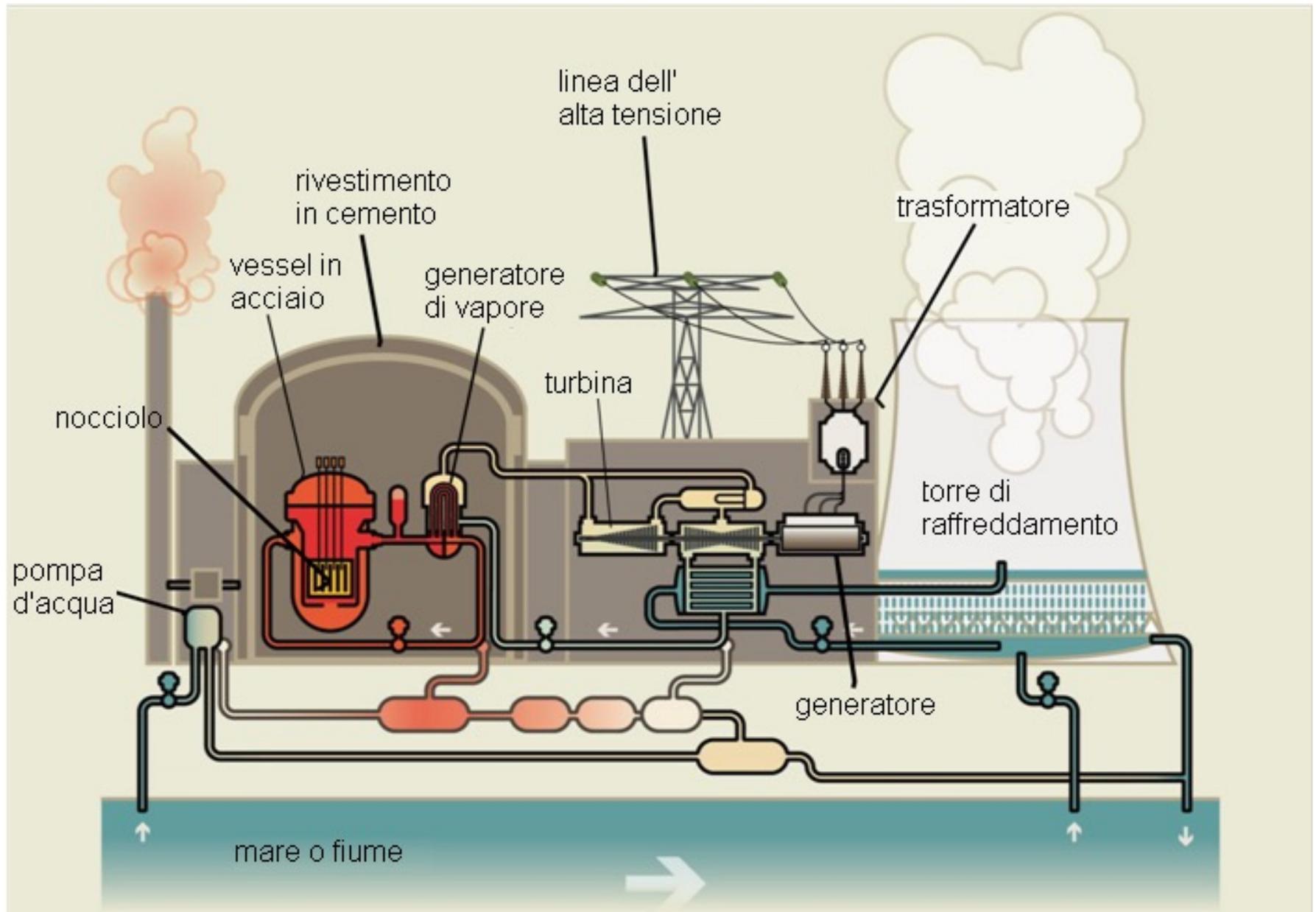
coefficiente di vuoto **POSITIVO**
molto pericoloso

Coefficiente di vuoto positivo - Chernobyl



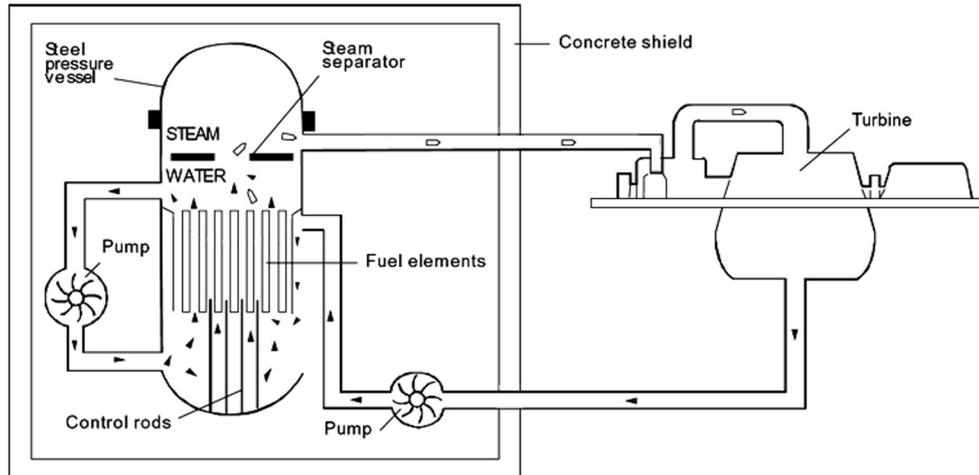
coefficiente di vuoto
POSITIVO
molto pericoloso
Chernobyl

Schema di un impianto nucleare – energia elettrica



Tipi di reattore BWR

Boiling Water Reactor



BWR

A CICLO DIRETTO

progettato per
funzionare in
modo
da avere circa il
15% di acqua
sotto forma
di vapore
immesso
direttamente in
turbina

Moderatore: acqua leggera

Refrigerante: acqua leggera

Combustibile: uranio arricchito al 3-5%

90 – 100 barrette

in 750 el. di comb. circa 140 tonn. di uranio

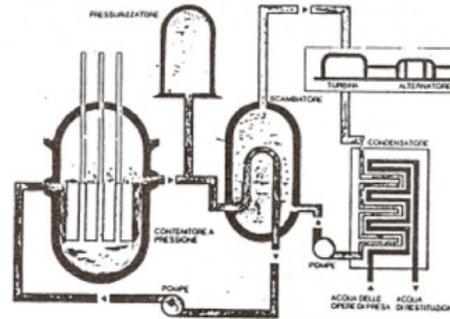
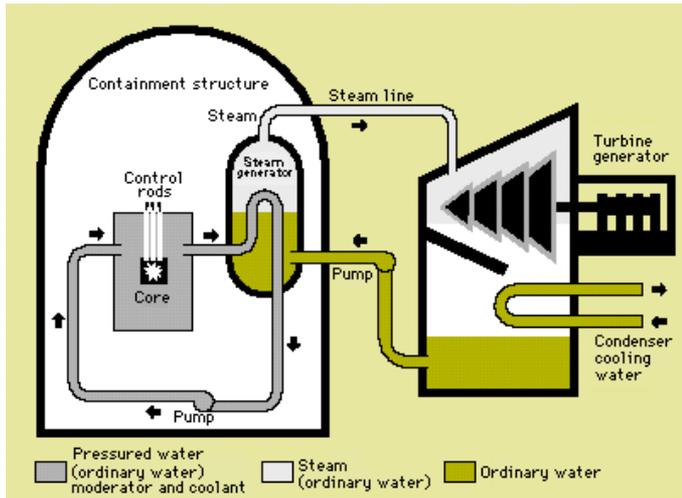
Circuito di raffreddamento primario a 75 atm

Acqua a 285°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Tipi di reattore PWR

Pressurised Water Reactor



A CICLO
INDIRETTO

Il fluido termovettore
asporta il calore dal
nocciolo e lo cede,
attraverso uno
scambiatore/generatore
di vapore,

ad un secondo
fluido termovettore
che viene immesso
in turbina

Il più diffuso
(circa 230 + alcune
centinaia usati nella
propulsione marina)

Moderatore: acqua leggera

Refrigerante: acqua leggera

Combustibile: uranio arricchito al 3-5%

in 150-200 el. di comb. (200-300 barrette)

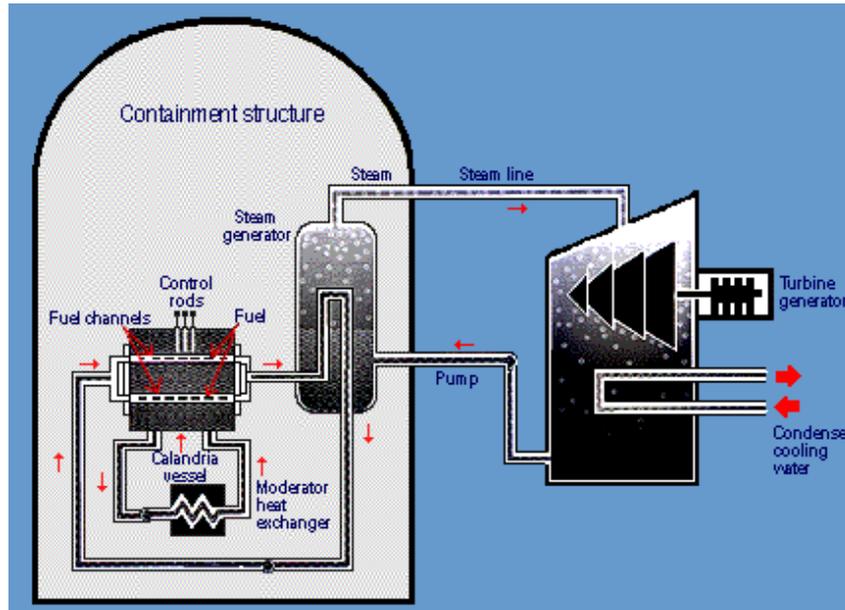
circa 80-100 tonn. di uranio

Circuito di raffreddamento primario chiuso pressurizzato a **150 atm**

Acqua a 325°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Tipi di reattore PHWR CANDU



A CICLO INDIRETTO CANDU Canadian Deuterium Uranium

Progettato negli anni
'50 in Canada

Reattore ad uranio
naturale con
moderatore ad acqua
pesante

Moderatore: acqua pesante
Refrigerante: acqua pesante

Combustibile: uranio naturale allo 0.7%

37 barrette da 50 cm per ogni elemento di
comb.

Circuito di raffreddamento primario pressurizzato con
acqua a 290°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Diffusione limitata
non sviluppati in USA e
URSS perché possono
essere usati per
produrre plutonio

Tipi di reattore – reattori a grafite

I reattori a grafite discendono direttamente dalla “pila di Fermi”

MAGNOX

AGR

HTGR

RBMK

I primi sfruttati per la produzione di energia elettrica perché potevano utilizzare uranio naturale (no arricchimento)

Favoriti anche da interesse bellico per la produzione di Pu

Sviluppati negli anni '60 nel Regno Unito, in Germania e negli USA

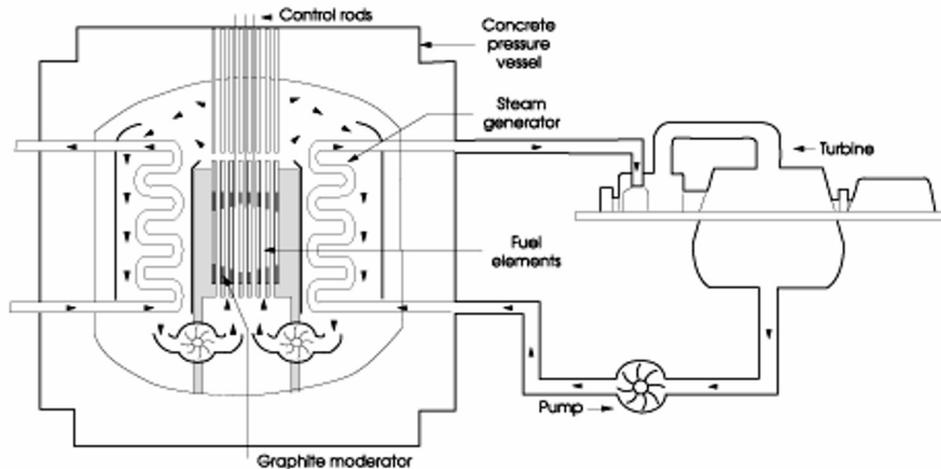
Non hanno avuto grande diffusione

Rinato interesse per gli HTGR (High

Temperature **Gas** Reactor) in GEN IV potrebbero essere usati per la produzione di idrogeno

Tipi di reattore AGR

Advanced Gas-cooled Reactor



AGR

Un buon esempio

A CICLO
INDIRETTO

Seconda
generazione
dei reattori a
gas

Moderatore: grafite

Refrigerante: **CO₂ gassosa: non assorbe neutroni**

Combustibile: uranio arricchito al 2.5-3.5%
in tubi di acciaio

Circuito di raffreddamento primario chiuso e CO₂ a
650°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

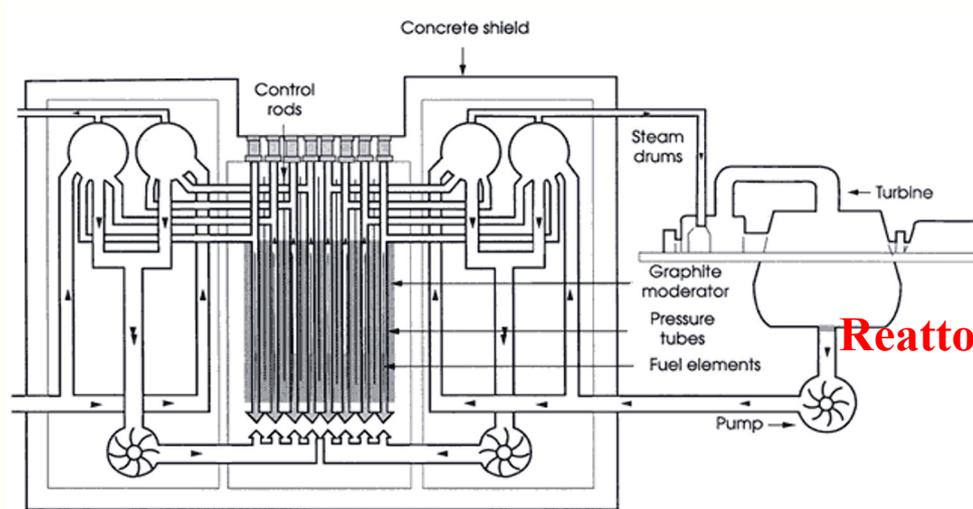
Progettati in
Inghilterra

come

evoluzione dei
magnox

Tipi di reattore RBMK

Reactor **B**olshoi **M**oschnosti **K**analnyi



RBMK

Un cattivo esempio

**Reattore ad acqua bollente
di Chernobyl**

Moderatore: grafite

Refrigerante: **acqua leggera bollente (assorbe neutroni)**

Combustibile: uranio arricchito al 2%, 18 barrette per elemento

in tubi in lega di zirconio lunghi 7 m; 192

tonn. di uranio

in 1680 canali in pressione

Coefficienti di temperatura: negativo

Coefficienti di vuoto: positivo

Ignalina

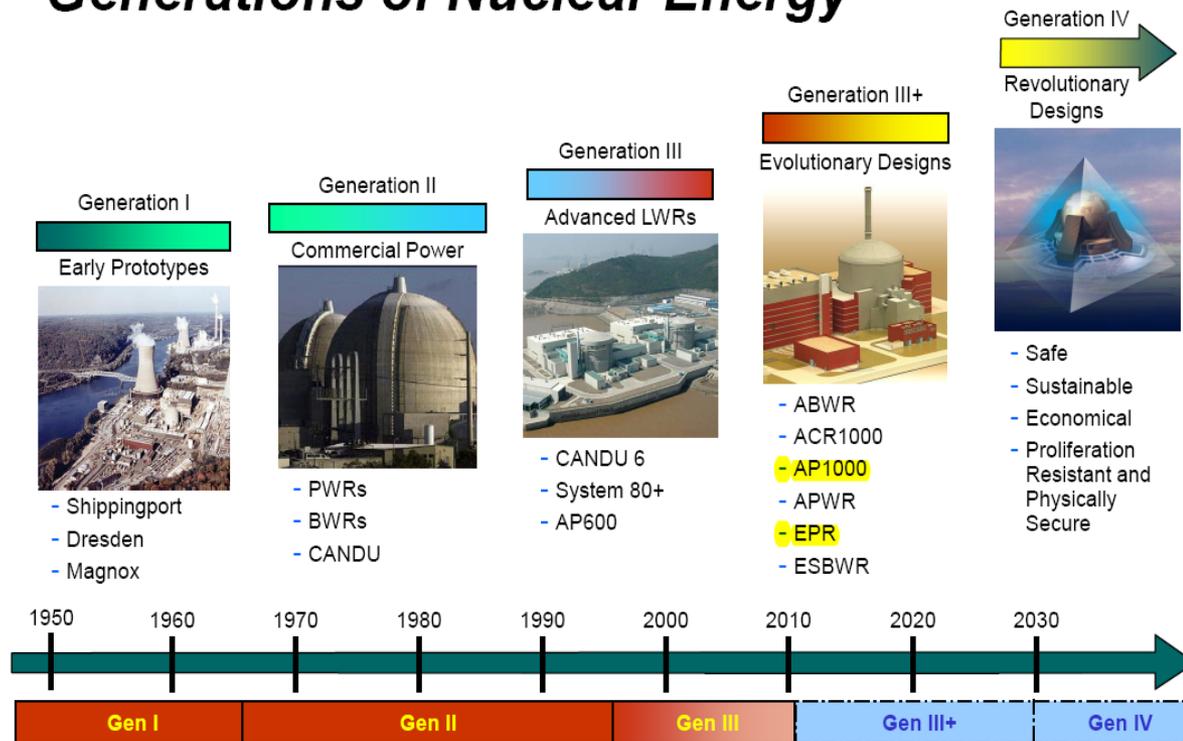
Kursk

Leningrad

Smolensk

Tipi di reattore – le generazioni

Generations of Nuclear Energy



LA GENERAZIONE I NEGLI ANNI '50-'60 CON I PRIMI PROTOTIPI

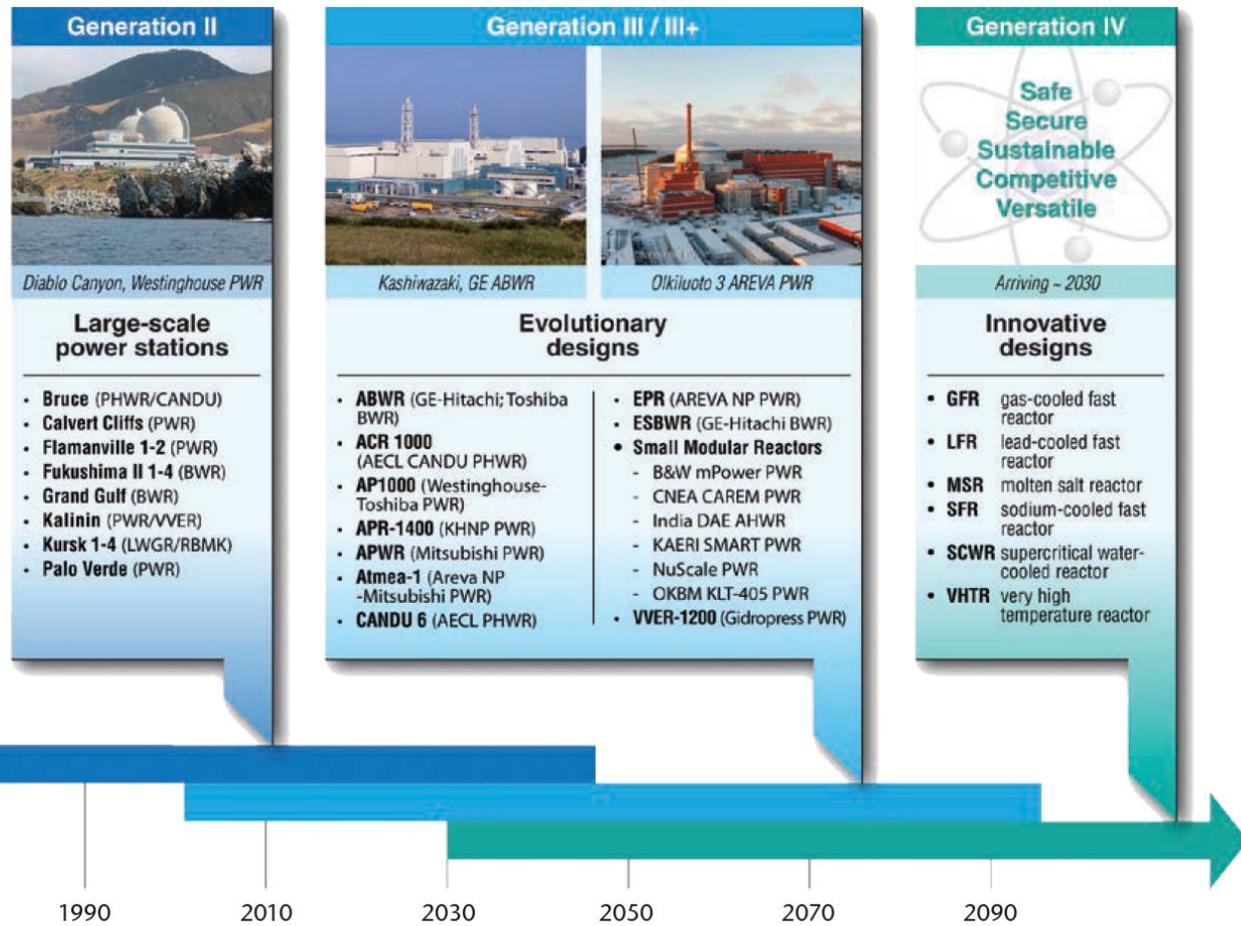
LA GENERAZIONE II NEGLI ANNI '60 CON I PRIMI REATTORI COMMERCIALI IN FUNZIONE OGGI

LA GENERAZIONE III SVILUPPATA A PARTIRE DAGLI ANNI '90 reattori di tipo evolutivo disponibili oggi

LA GENERAZIONE IV IN VIA DI SVILUPPO disponibili fra 20-30 anni

Tipi di reattore – le generazioni

Figure 7: Evolution of fission reactor technology



Technology Roadmap
Nuclear Energy

2015 edition



Source: Generation IV International Forum, www.gen-4.org.

Il database della IAEA

PRIS



The Database on Nuclear Power Reactors

The Power Reactor Information System (PRIS), developed and maintained by the IAEA for over five decades, is a comprehensive database focusing on nuclear power plants worldwide. PRIS contains information on power reactors in operation, under construction, or those being... [READ MORE »](#)

Registered User ENTRY

How to Register

SHORTCUTS

Select Country

Select Reactor

 [2021: PRIS Data Press Release](#)

 [2021: Nuclear Power Reactors in the...](#)

 [2021: Operating Experience with NPP...](#)

CURRENT STATUS

441 NUCLEAR POWER REACTORS IN OPERATION

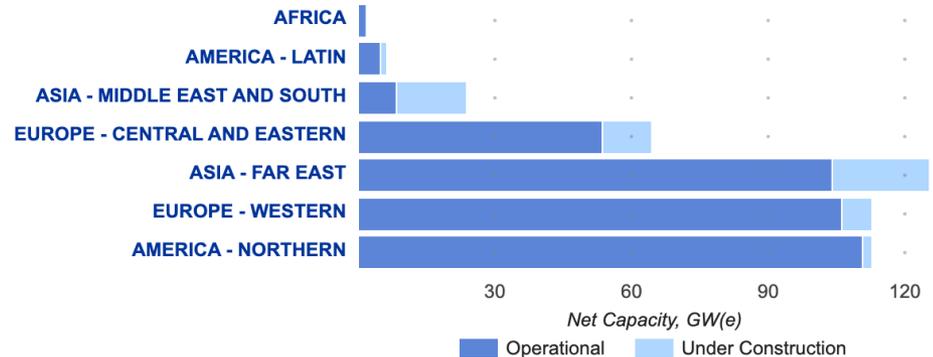
393 316 MWe TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

51 NUCLEAR POWER REACTORS UNDER CONSTRUCTION

53 644 MWe TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

19 266 REACTOR-YEARS OF OPERATION

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



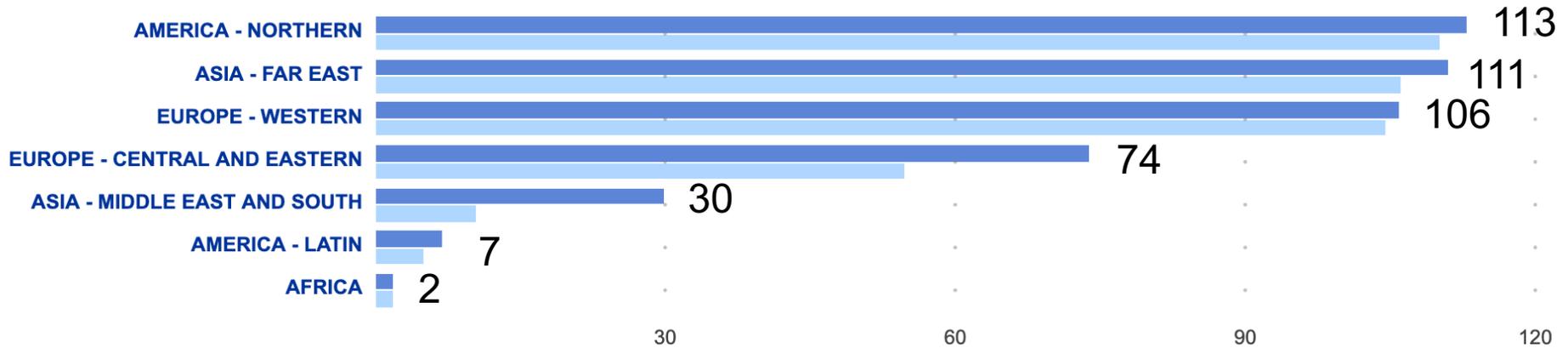
HIGHLIGHTS

Reattori in operazione per tipo

Operational & Long-Term Shutdown Reactors

By Country By Type By Region

OPERATIONAL REACTORS

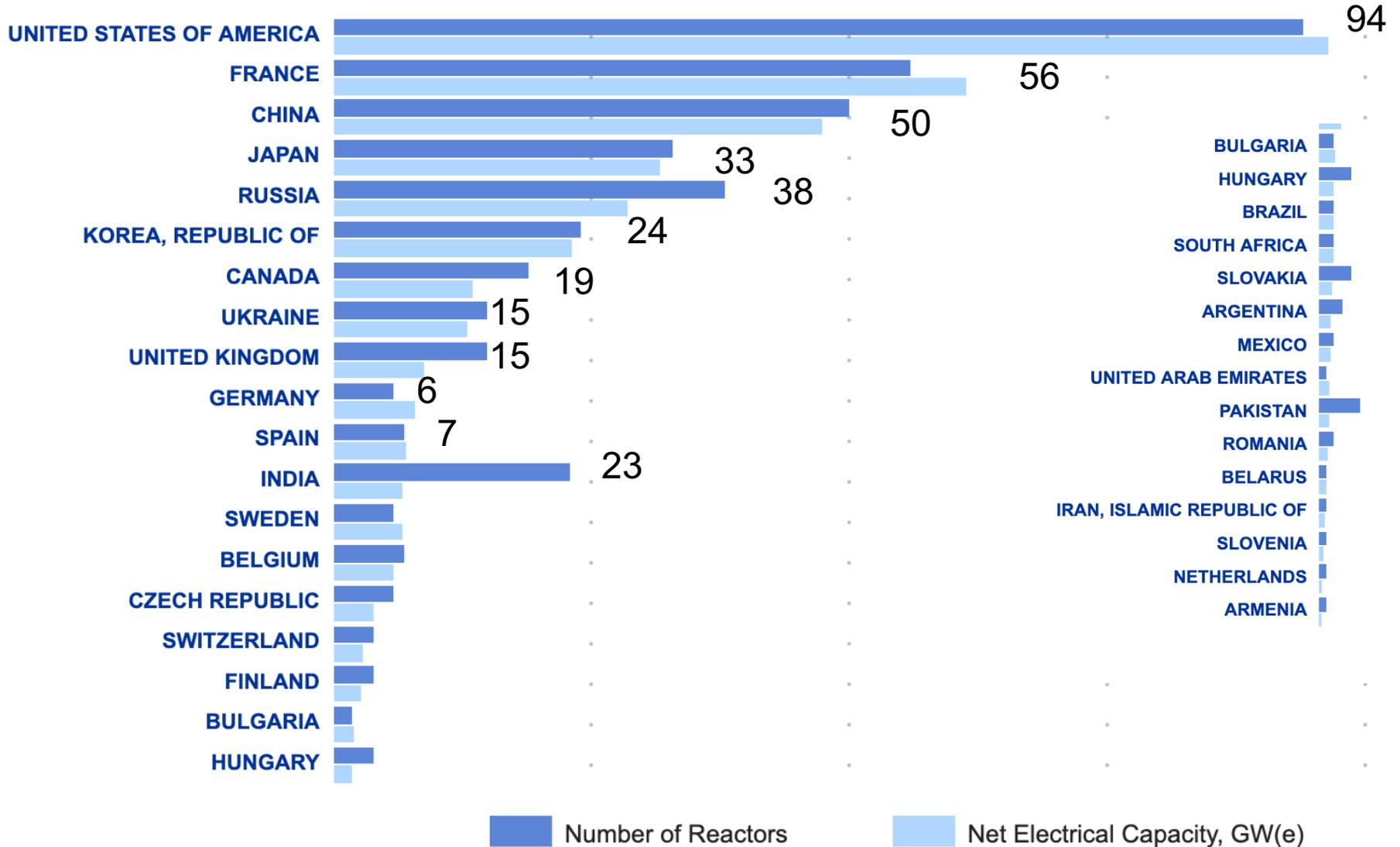


Number of Reactors and Net Electrical Capacity, GW(e)

Number of Reactors Net Electrical Capacity, GW(e)

Reattori in operazione per tipo

OPERATIONAL REACTORS



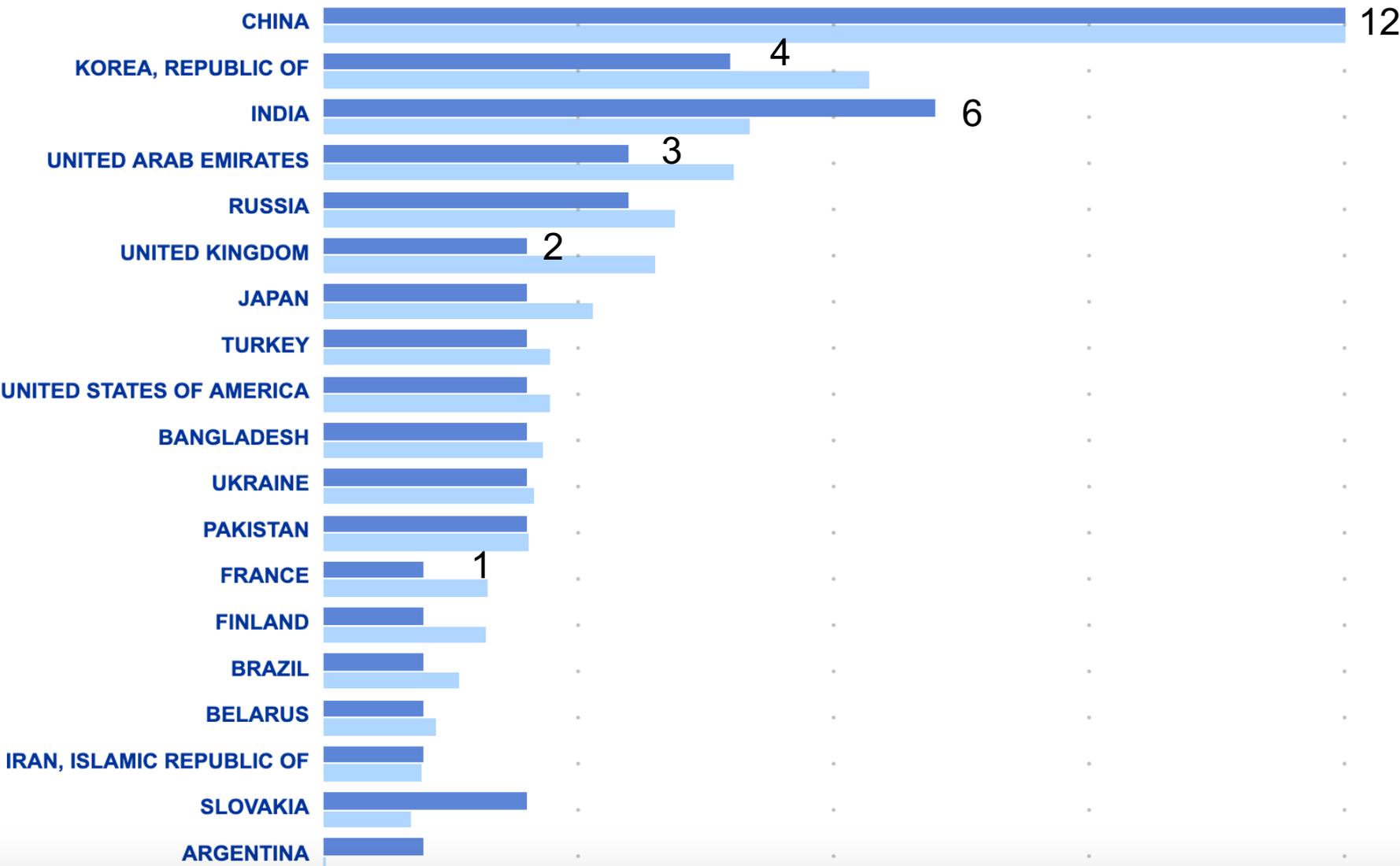
Under Construction Reactors

By Country

By Type

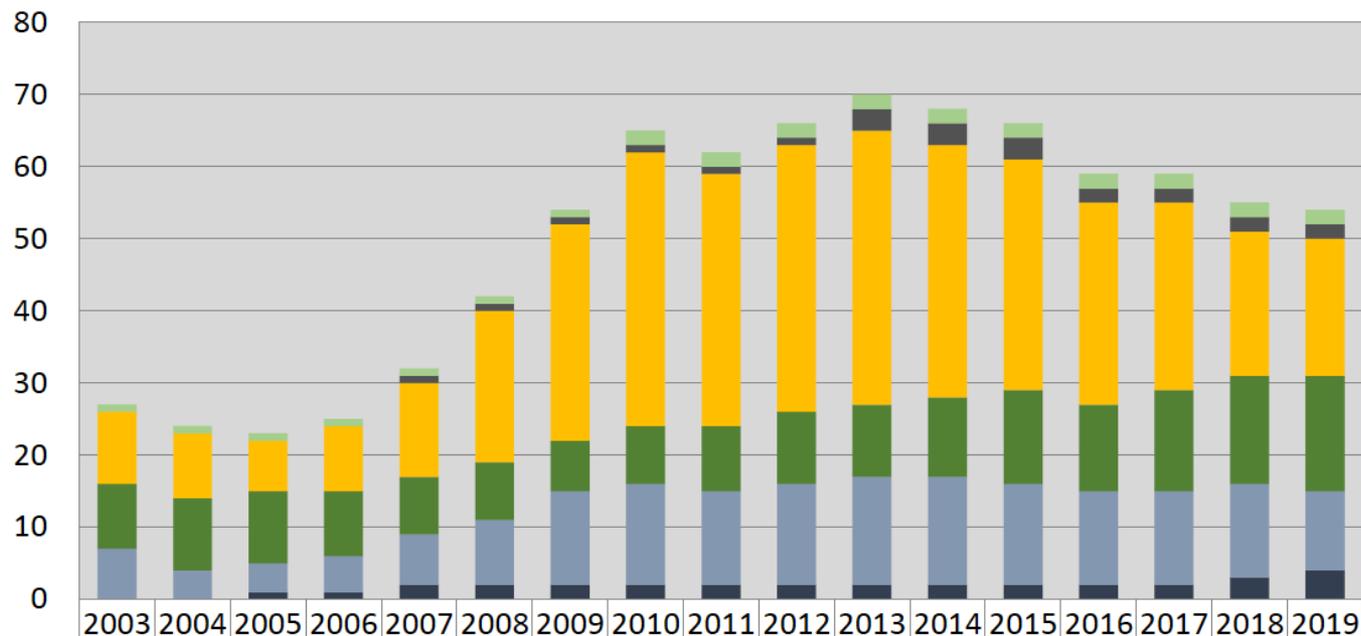
By Region

UNDER CONSTRUCTION REACTORS



Reattori in costruzione nel mondo

Number of reactors under construction by region

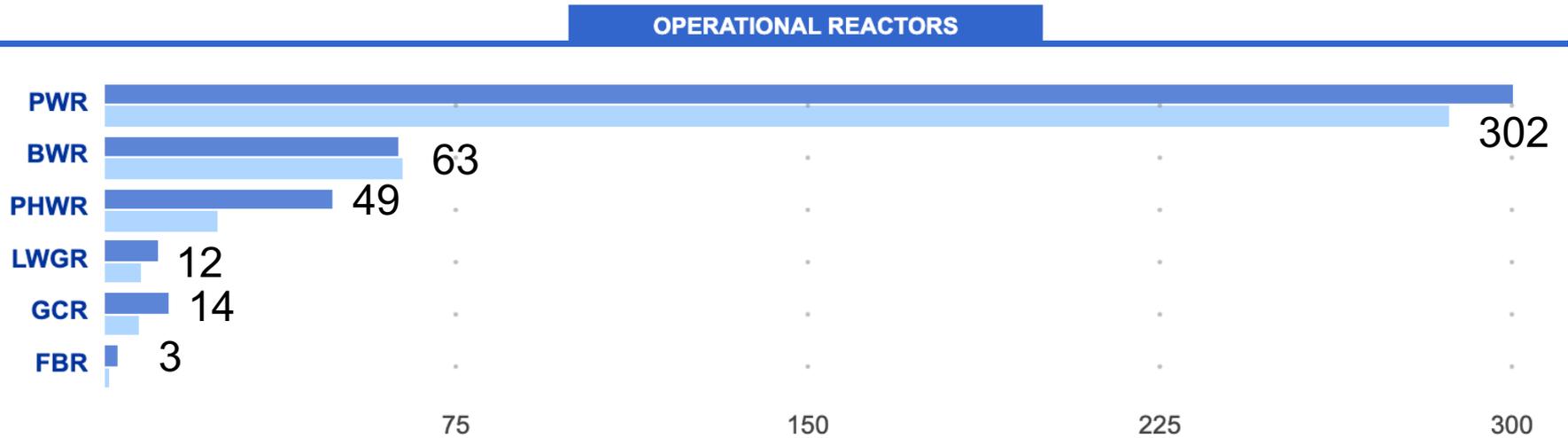


	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
America - Latin	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
America - Northern	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2
Asia - Far East	10	9	7	9	13	21	30	38	35	37	38	35	32	28	26	20	19
Asia - Middle East and South	9	10	10	9	8	8	7	8	9	10	10	11	13	12	14	15	16
Europe - Central and Eastern	7	4	4	5	7	9	13	14	13	14	15	15	14	13	13	13	11
Europe - Western	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4

FIG. A-3. Number of reactors under construction by region.

(Source: IAEA Power Reactor Information System www.iaea.org/pris)

Reattori in operazione per tipo



Number of Reactors and Net Electrical Capacity, GW(e)

■ Number of Reactors ■ Net Electrical Capacity, GW(e)

Reattori generazione III caratteristiche

MAGGIORI REQUISITI DI SICUREZZA

- Gli eventi con **danneggiamento e fusione del combustibile** devono essere presi in considerazione **nel progetto** in modo integrato;
- Anche nelle **sequenze incidentali “severe”**, sebbene con probabilità estremamente basse, **non ci deve essere necessità di evacuazione della popolazione circostante** l’impianto; e l’eventuale contaminazione deve essere estremamente limitata nello spazio e nel tempo;
- **L’operatore deve essere essenzialmente un supervisore** e l’impianto deve rimanere in sicurezza anche in assenza di un suo intervento per un notevole lasso di tempo;
- **Le dosi ai lavoratori** dell’impianto devono essere **più basse** di quelle dei migliori impianti attuali;
- **I sistemi di sicurezza** devono essere **ridondanti, diversificati, separati** nello spazio ed indipendenti

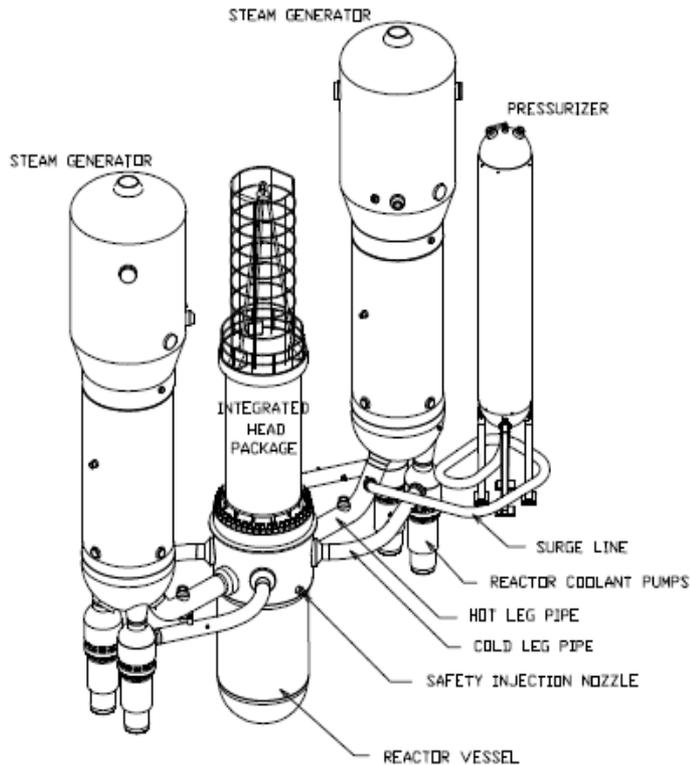
Reattori generazione III caratteristiche

MIGLIORI PRESTAZIONI

- Standardizzazione del progetto per accelerare tempi di licensing e realizzazione:
 - **tempi di costruzione** compresi tra **36 e 60 mesi** (tra primo getto ed esercizio commerciale);
 - tutti i **componenti** (eccetto vessel) **devono essere facilmente sostituibili**;
 - **vita operativa più lunga** (60 anni di vita di progetto);
- Burn-up del combustibile maggiore (**60 GWd/t**). Ciclo di refueling esteso. Fermate per ricarica brevi (meno di 14 giorni);
- Reattore in grado di operare in un sistema elettrico ad alta percentuale del nucleare (reattore con **caratteristiche di flessibilità per gestire il carico**);
 - **Fattore di disponibilità medio su 20 anni superiore al 90%**;
- Il nocciolo deve poter accettare almeno il 50% di MOX (**combustibile ad ossidi misti U/Pu**)

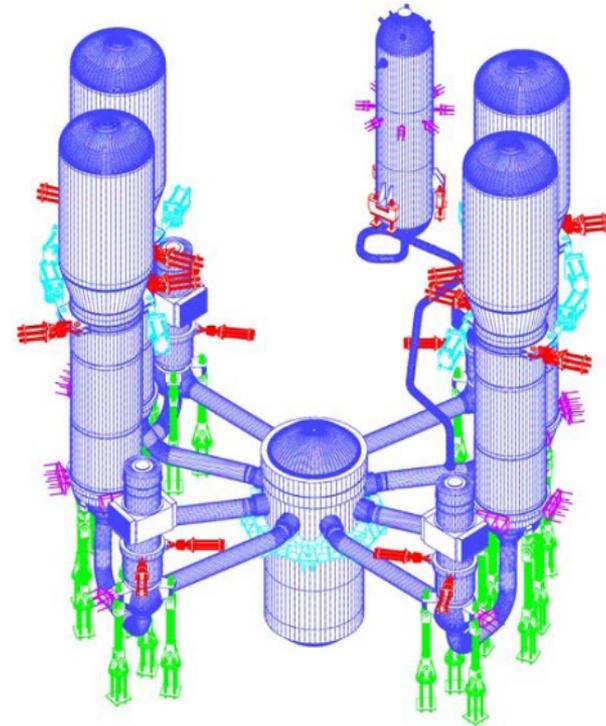
Reattori generazione III ridondanza per perdita di refrigerante

AP1000



Potenza elettrica installata (MWe)	1117
Numero di loops	2

EPR



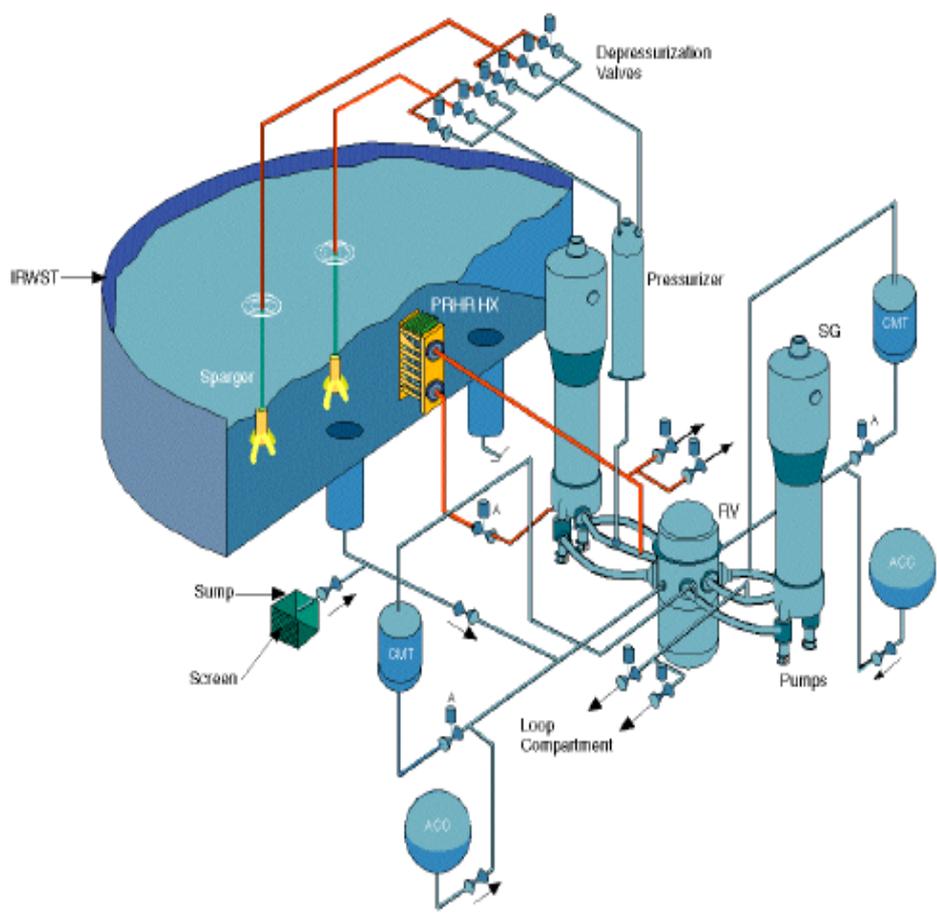
Potenza elettrica installata (MWe)	1600
Potenza termica nominale (MWth)	4300

Il reattore AP1000 americano

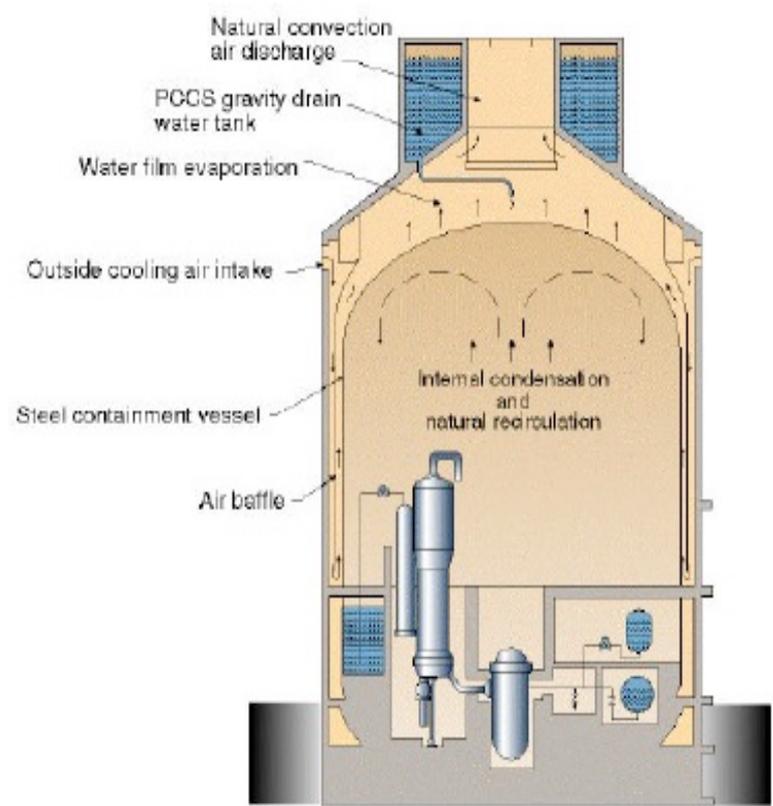
PVR → AP600 → AP1000

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO PASSIVO

PER IL NOCCIOLO



PER IL CONTENIMENTO



Il reattore EPR europeo – il contenitore esterno



- Doppio contenimento.
- “Liner” interno in acciaio a tenuta (6 mm).
- Cilindro interno in calcestruzzo armato precompresso
- Cilindro esterno in calcestruzzo rinforzato.

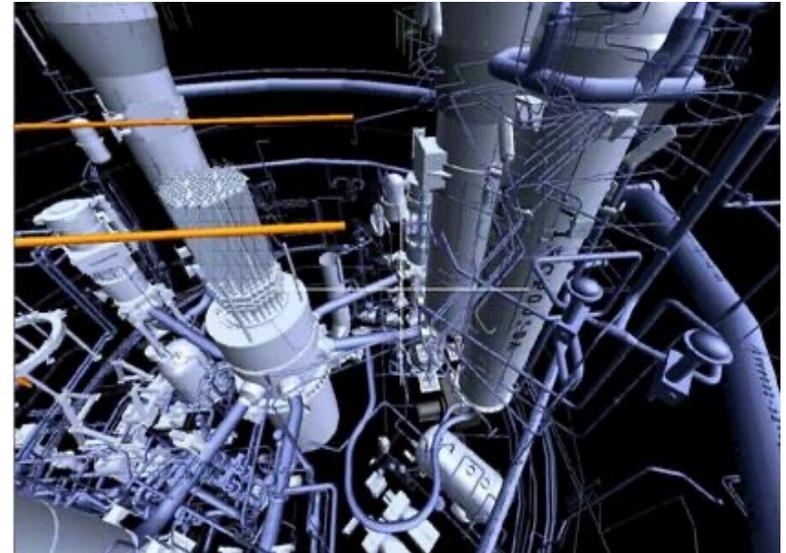
Il reattore EPR europeo raccolta e refrigerazione del nocciolo fuso



In caso di fusione del nocciolo quest'ultimo è incanalato e raccolto in una apposita zona costituita da una grande vasca con intercapedine raffreddata.

Il reattore CPR1000 cinese

Potenza elettrica installata (MWe)	1060
Numero di loops	3



Il primo reattore "100% made in China" connesso alla rete

📅 30 Novembre 2020 👤 AIN 💬 0 Commenti 📍 Cina, connessione, gen III, Hualong One, nuovo nucleare

L'unità 5 della centrale di *Fuqing* è stata connessa alla rete [lo scorso 27 novembre](#). L'evento marca una pietra miliare nel programma nucleare cinese, proiettando il Dragone nell'Olimpo delle grandi potenze del nucleare civile.

installati anche 2 EPR e 2 AP100

Il reattore CPR1000 cinese

TAISHAN-1

Operational

REACTOR DETAILS

Reactor Type PWR	Model EPR-1750	Owner Taishan Nuclear Power Joint Venture Company Limited	Operator Taishan Nuclear Power Joint Venture Company Limited
Reference Unit Power (Net Capacity) 1660 MW_e	Design Net Capacity 1660 MW_e	Gross Capacity 1750 MW_e	Thermal Capacity 4590 MW_t
Construction Start Date 18 Nov, 2009	First Criticality Date 06 Jun, 2018		
First Grid Connection 29 Jun, 2018	Commercial Operation Date 13 Dec, 2018		

Il reattore EPR europeo – Flamanville e Olkiluoto



La nuova ministra dell'energia francese ha appena definito il più grande progetto nucleare del paese "un casino". Il reattore pressurizzato europeo (EPR) che è stato commissionato per la centrale nucleare di Flamanville, dove si unirà a due reattori ad acqua pressurizzata esistenti, ha avuto fin qui un percorso costellato di ritardi e problemi. L'ultima modifica al progetto ha espanso le tempistiche da 13 (già molti) a 17 anni (un'enormità).

L'EPR risale agli anni 2000, quando i primi due reattori furono commissionati per Francia e Finlandia rispettivamente nel 2007 e nel 2005; nessuno dei due reattori ha rispettato i tempi previsti.

costi: da 3.9 Miliardi di € a 14.6 Miliardi di €

La Francia adesso mira al 2023. Il governo francese uscente ha firmato l'ultima estensione a marzo.

Il reattore EPR europeo – Flamanville e Olkiluoto



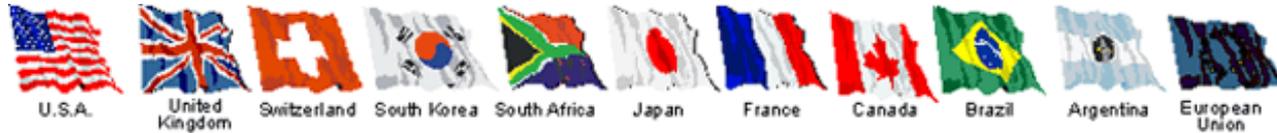
OLKILUOTO-3

Operational

REACTOR DETAILS

Reactor Type PWR	Model EPR	Owner TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ	Operator TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ
Reference Unit Power (Net Capacity) 1600 MW_e	Design Net Capacity 1600 MW_e	Gross Capacity 1720 MW_e	Thermal Capacity 4300 MW_t
Construction Start Date 12 Aug, 2005	First Criticality Date 21 Dec, 2021		
First Grid Connection 12 Mar, 2022	Commercial Operation Date N/A		

Reattori generazione IV



- Per lo sviluppo dei reattori di **quarta generazione** opera un apposito consorzio (**GIF IV**) costituito da:
- **Usa, Gran Bretagna, Svizzera, Corea del Sud, Sudafrica, Giappone, Francia, Canada, Brasile, Argentina, e dall'EURATOM** in rappresentanza della Commissione Europea.
- Questi reattori dovrebbero essere **operativi tra 20 - 30 anni e saranno probabilmente loro a subentrare a quelli di seconda generazione.**
- **Ulteriori miglioramenti in sicurezza, affidabilità e prestazioni rispetto alle precedenti generazioni.**

Reattori generazione IV

- Gli impianti di quarta generazione attualmente in fase di studio sono sei:
 - reattori veloci raffreddati a gas (GFR)
 - reattori veloci raffreddati a piombo (LFR)
 - reattori epitermici a sali fusi (MSR)
 - reattori veloci raffreddati a sodio (SFR)
 - reattori termici raffreddati ad acqua con cicli ipercritici (SCWR)
 - reattori termici raffreddati a gas altissima temperatura (VHTR).

Gas-Cooled Fast Reactor System	GFR
Lead-Cooled Fast Reactor System	LFR
Molten Salt Reactor System	MSR
Sodium-Cooled Fast Reactor System	SFR
Supercritical-Water-Cooled Reactor System	SCWR
Very-High-Temperature Reactor System	VHTR

Reattori generazione IV

Due aspetti interessanti:

- reattori modulari con basse potenze (qualche centinaio di MW) detti Small Modular Reactor (SMR) adatti per la desalinizzazione dell'acqua di mare o per essere collocati in posti remoti; possono essere costruiti e trasportati direttamente sul posto; pensati per funzionare 15-20 anni senza necessità di cambiare il combustibile



FIG. B-6. The Akademik Lomonosov FNPP. (Photo: Rosatom)

Compact PWR-type SMR 70 MW(e) + 50 gigacalorie / h

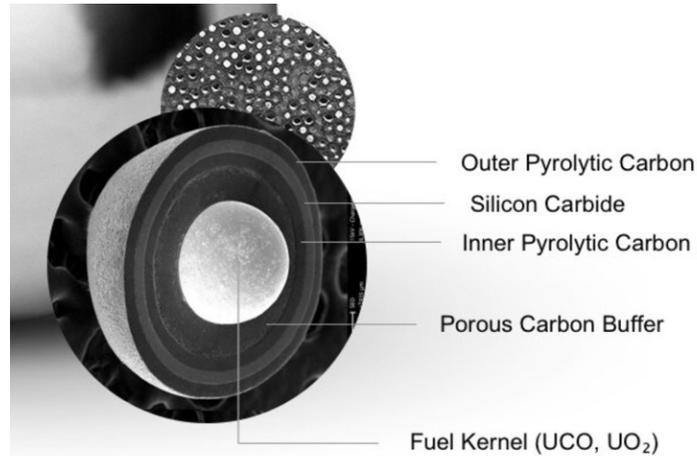
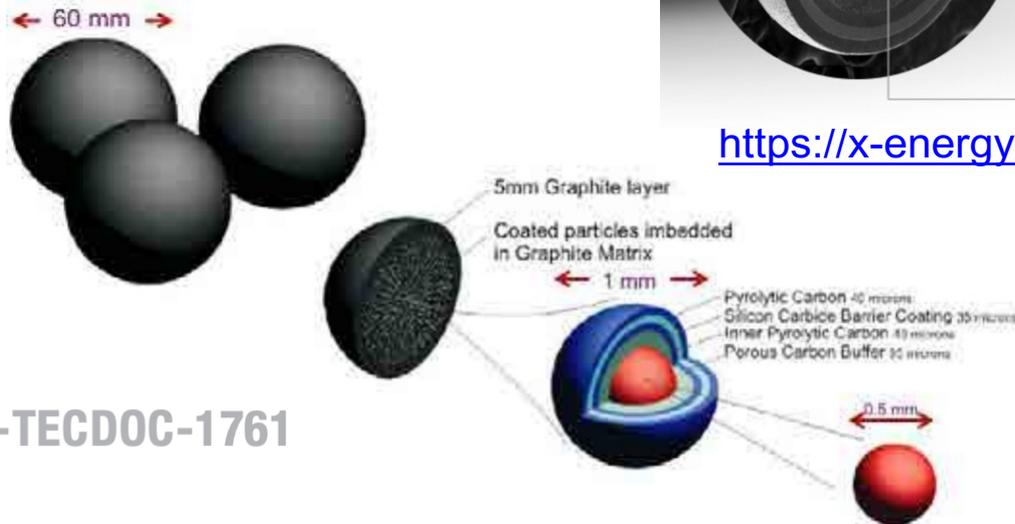
Reattori generazione IV

Possibilità di produrre idrogeno, attraverso la dissociazione termica dell'acqua, con reattori VHTR raffreddati a gas elio; funzionano a 800 °C - 1000 °C.

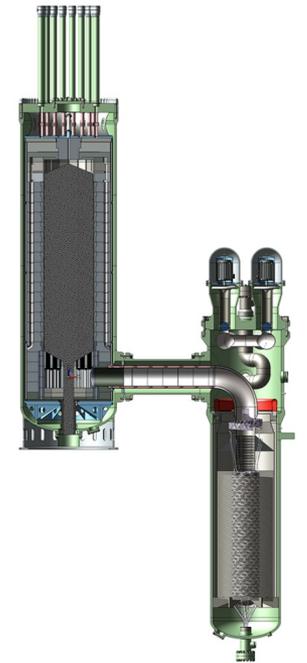
DANIEL OBERHAUS SCIENCE 06.30.2020 07:00 AM

Nuclear 'Power Balls' May Make Meltdowns a Thing of the Past

Triso particles are an alien-looking fuel with built-in safety features that will power a new generation of high-temperature reactors.



<https://x-energy.com/fuel/triso-x>



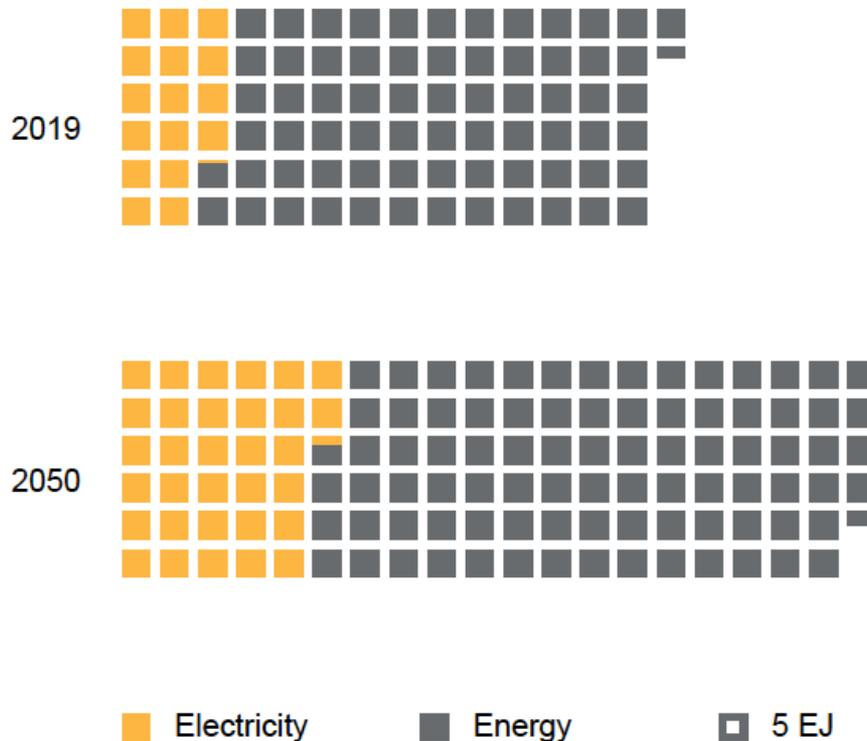
IAEA-TECDOC-1761

FIG. 2. Spherical fuel element consisting of ~50 mm diameter fuel zone and ~5 mm thick fuel free zone, the TRISO coated particle and the 0.5 mm diameter fuel kernel.

Fabbisogno energetico

Entro il 2050 si prevede
un incremento del consumo globale di energia
pari a circa il 30%
e un raddoppio del consumo di energia elettrica

FIGURE 5. WORLD FINAL CONSUMPTION OF ENERGY AND ELECTRICITY



energia totale
+ 30%
energia elettrica
+100%

Energy Overview 2019

 **18.8%**
of final energy consumed was electricity

 **25 602** TW·h
of electricity produced

ENERGY, ELECTRICITY AND
NUCLEAR POWER ESTIMATES
FOR THE PERIOD UP TO 2050
IAEA-RDS-1/40
ISBN 978-92-0-118120-6
ISSN 1011-2642
Printed by the IAEA in Austria
September 2020
Cover photo credit:
China National Nuclear Corporation / 2018

Fabbisogno energetico

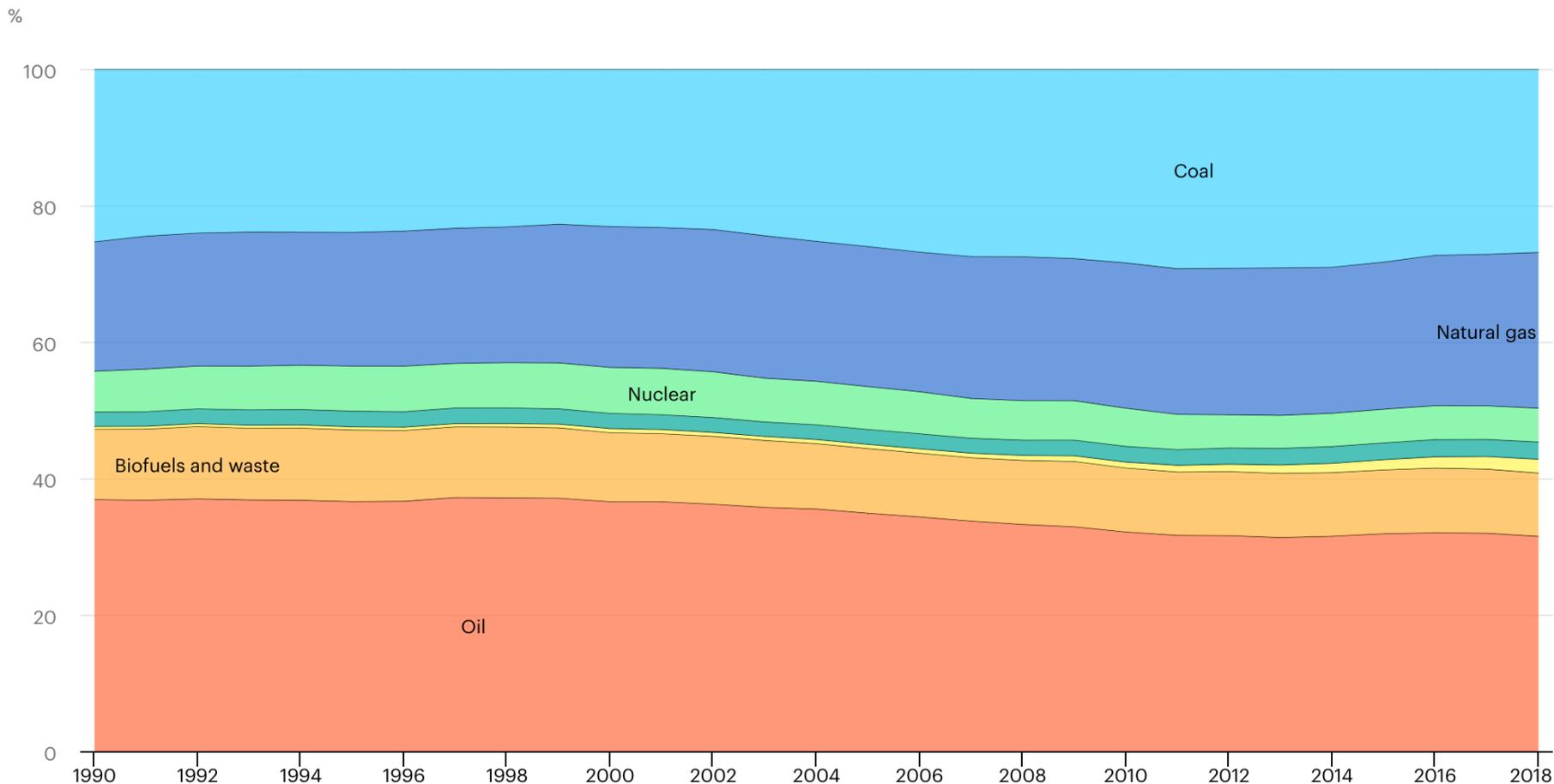
Entro il 2050 si prevede
un incremento del consumo globale di energia
pari a circa il 30%
e un raddoppio del consumo di energia elettrica

TABLE 2. WORLD FINAL CONSUMPTION OF ENERGY AND ELECTRICITY, EJ

Final Consumption	2019	2030	2040	2050
Energy	427.1	491.4	544.3	592.3
Electricity	80.4	109.0	135.8	161.4
<i>Electricity as % of Energy</i>	<i>18.8%</i>	<i>22.2%</i>	<i>24.9%</i>	<i>27.2%</i>

Mix fonti per produzione energia totale

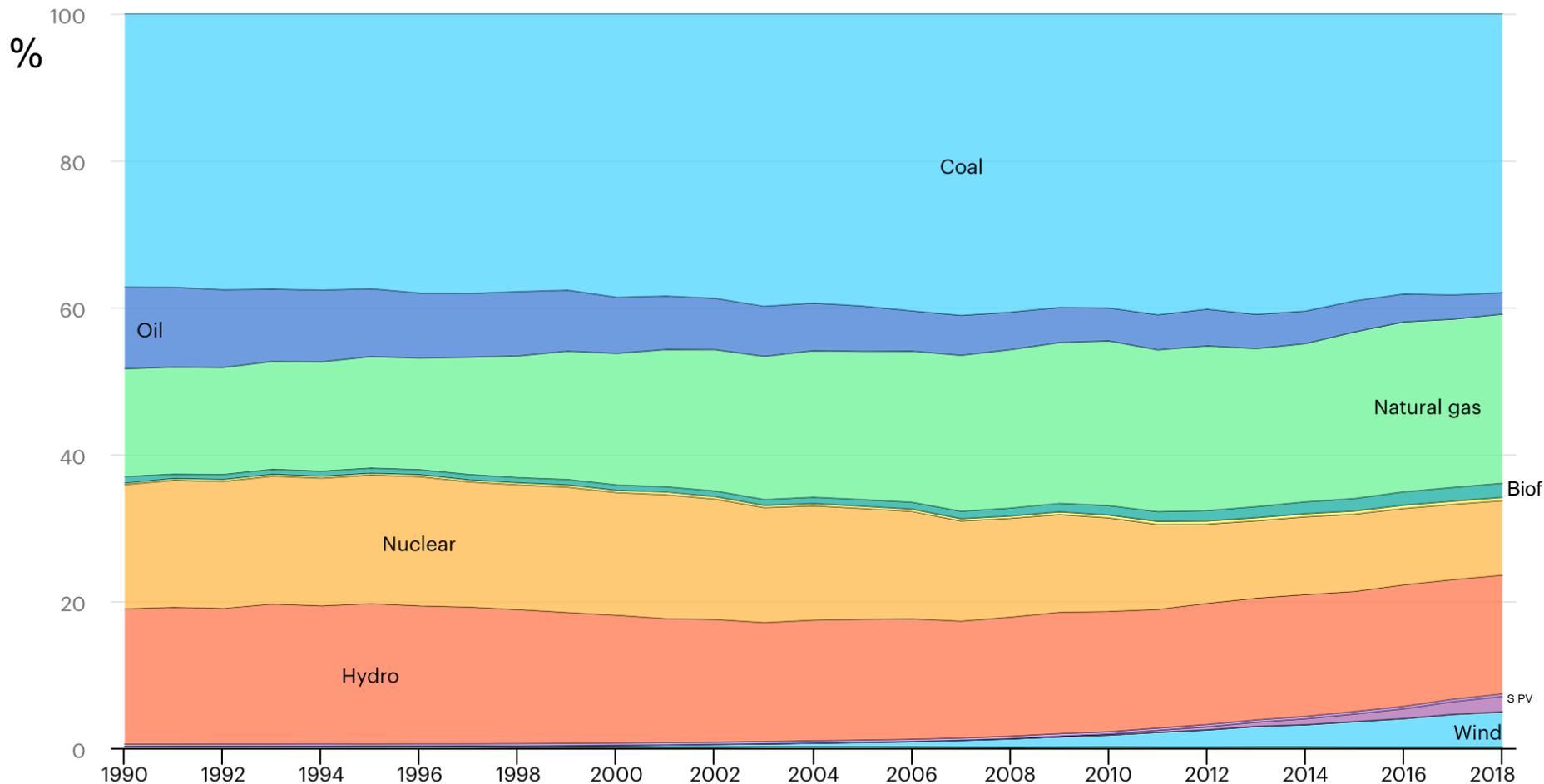
Total energy supply (TES) by source, World 1990-2018



Mix fonti per produzione energia elettrica

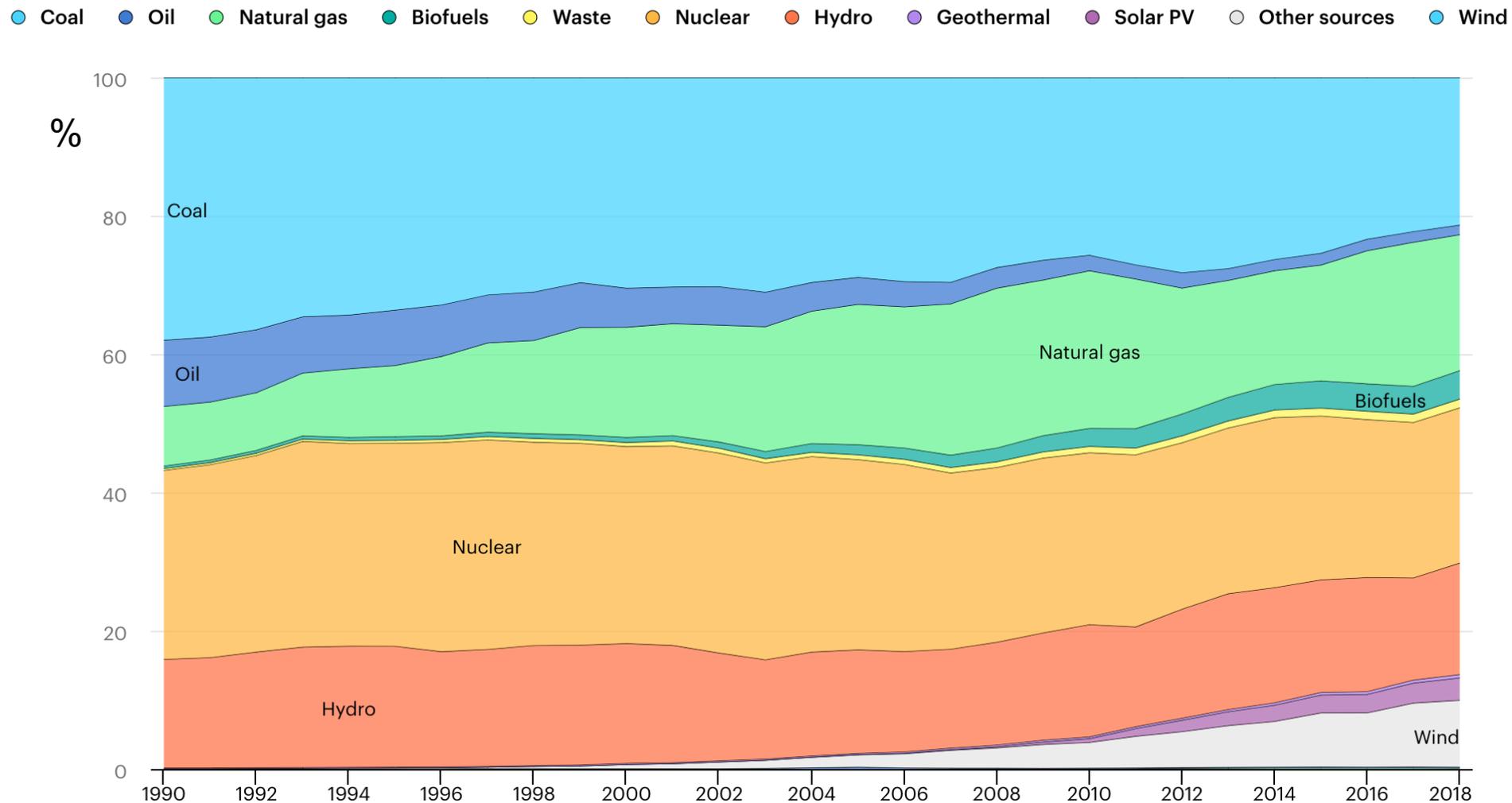
Electricity generation by source, World 1990-2018

Coal Oil Natural gas Biofuels Waste Nuclear Hydro Geothermal Solar PV Other sources Wind



Mix fonti per produzione energia elettrica

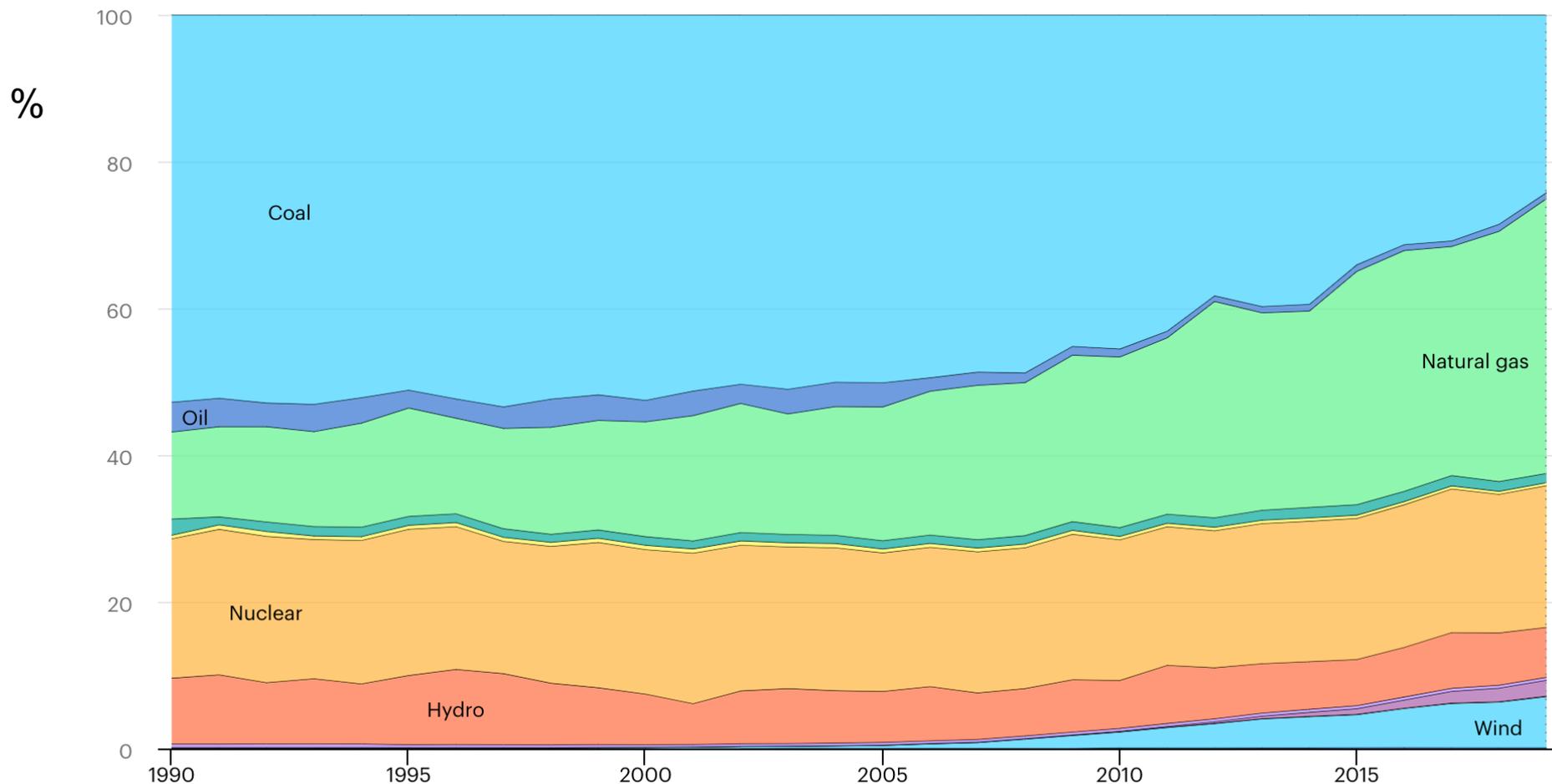
Electricity generation by source, Europe 1990-2018



Mix fonti per produzione energia elettrica

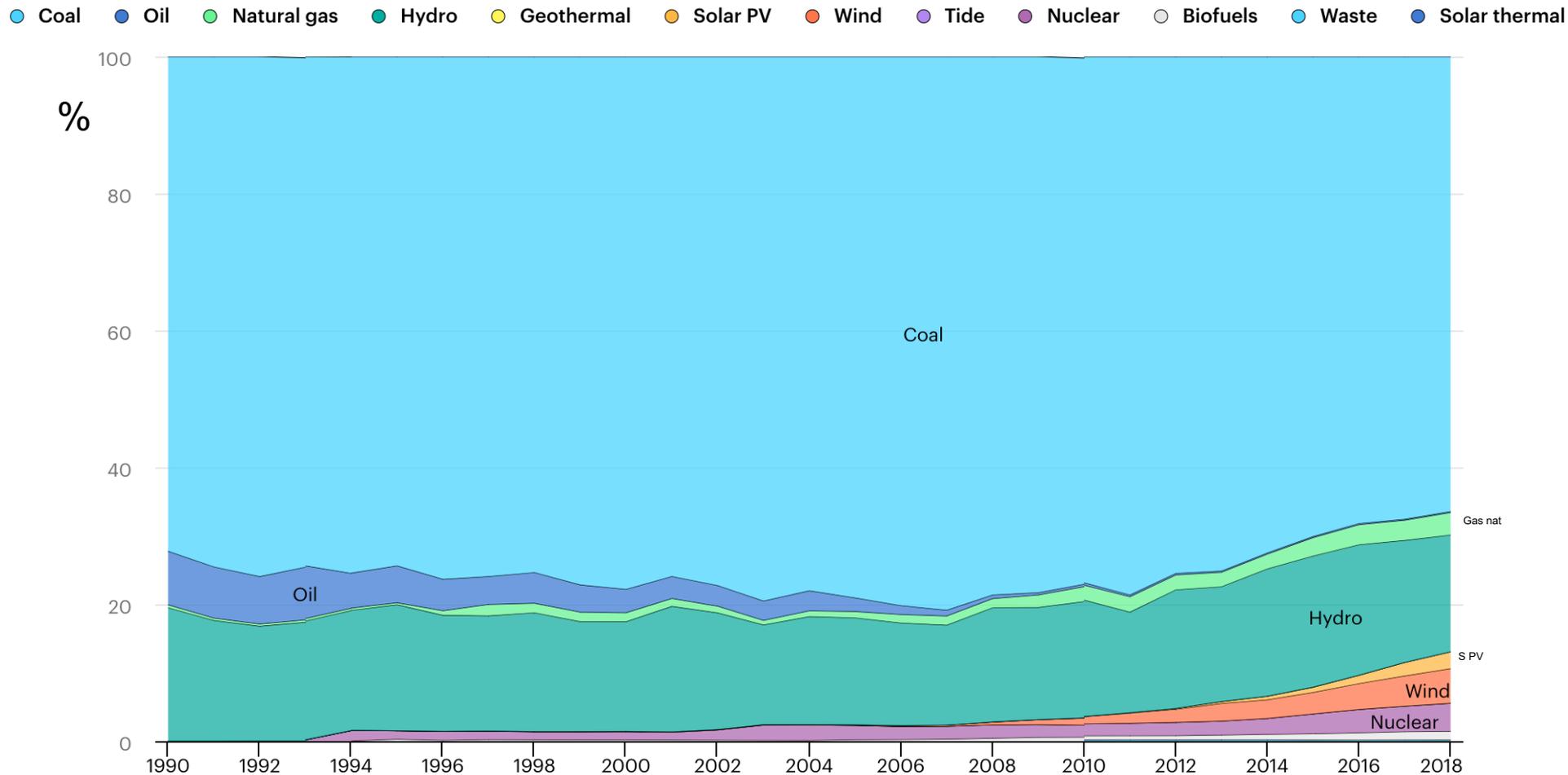
Electricity generation by source, United States 1990-2019

Coal Oil Natural gas Biofuels Waste Nuclear Hydro Geothermal Solar PV Other sources Wind



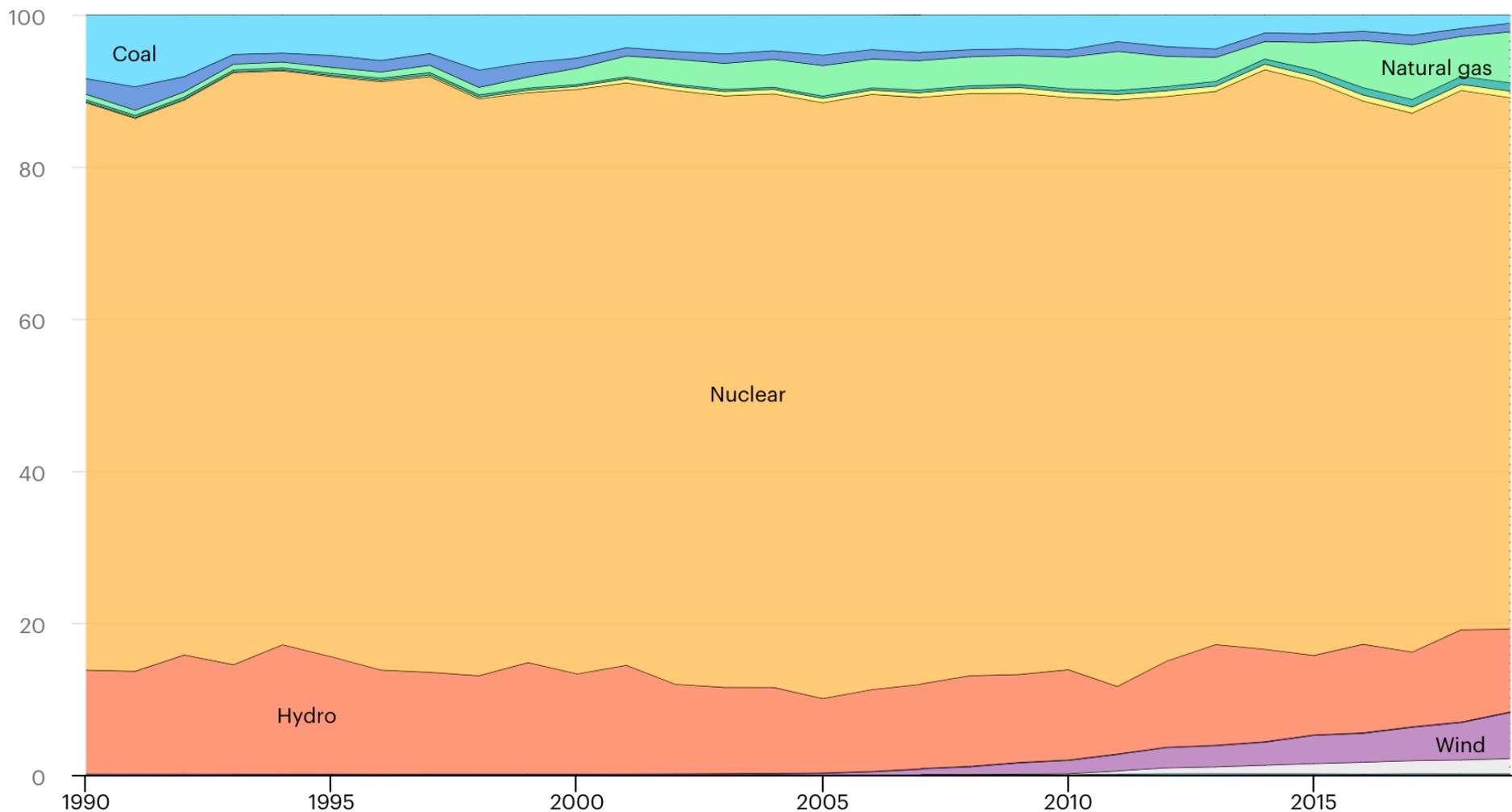
Mix fonti per produzione energia elettrica

Electricity generation by source, China (People's Republic of China and Hong Kong China) 1990-2018



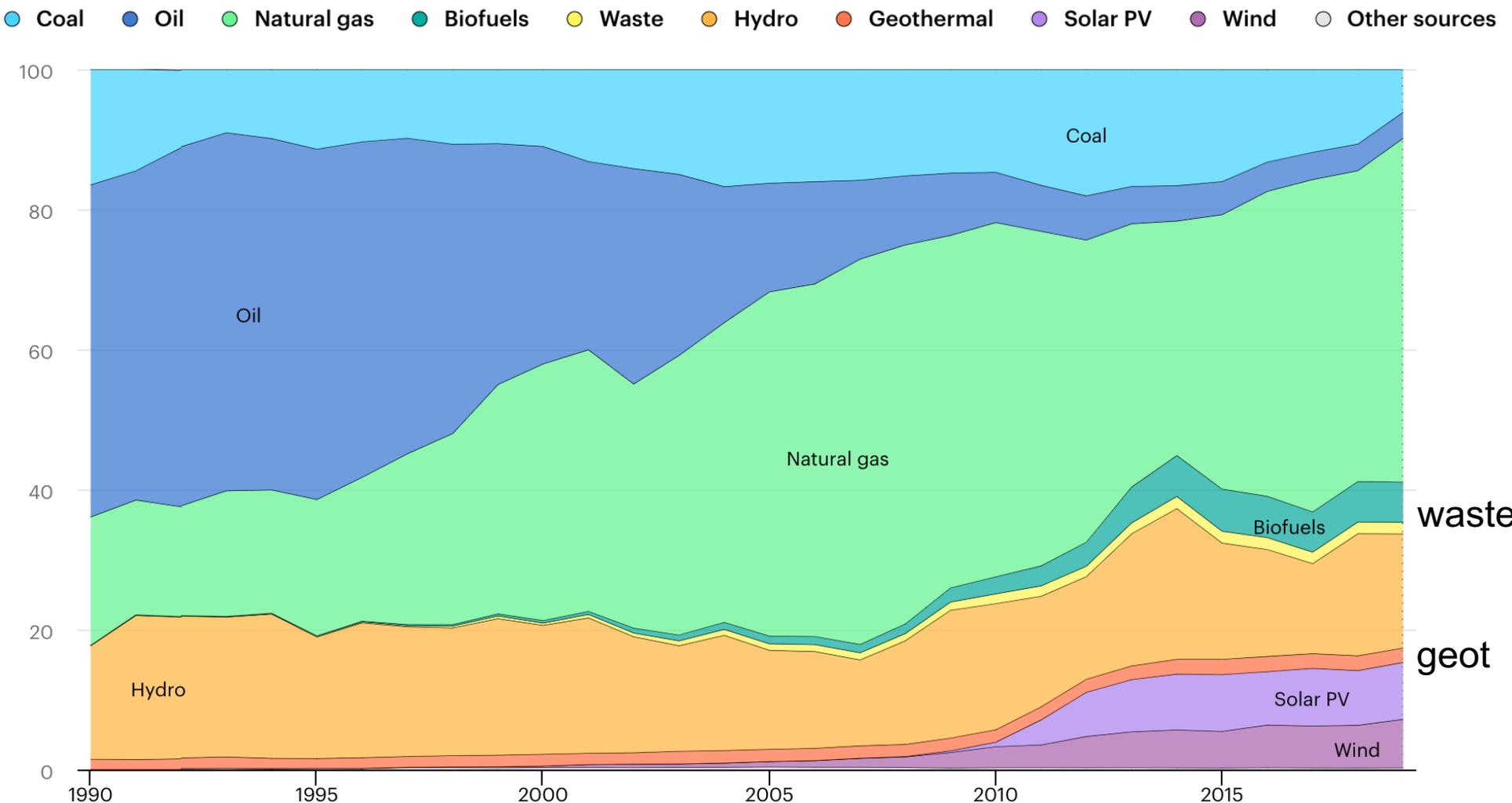
Mix fonti per produzione energia elettrica

Electricity generation by source, France 1990-2019



Mix fonti per produzione energia elettrica

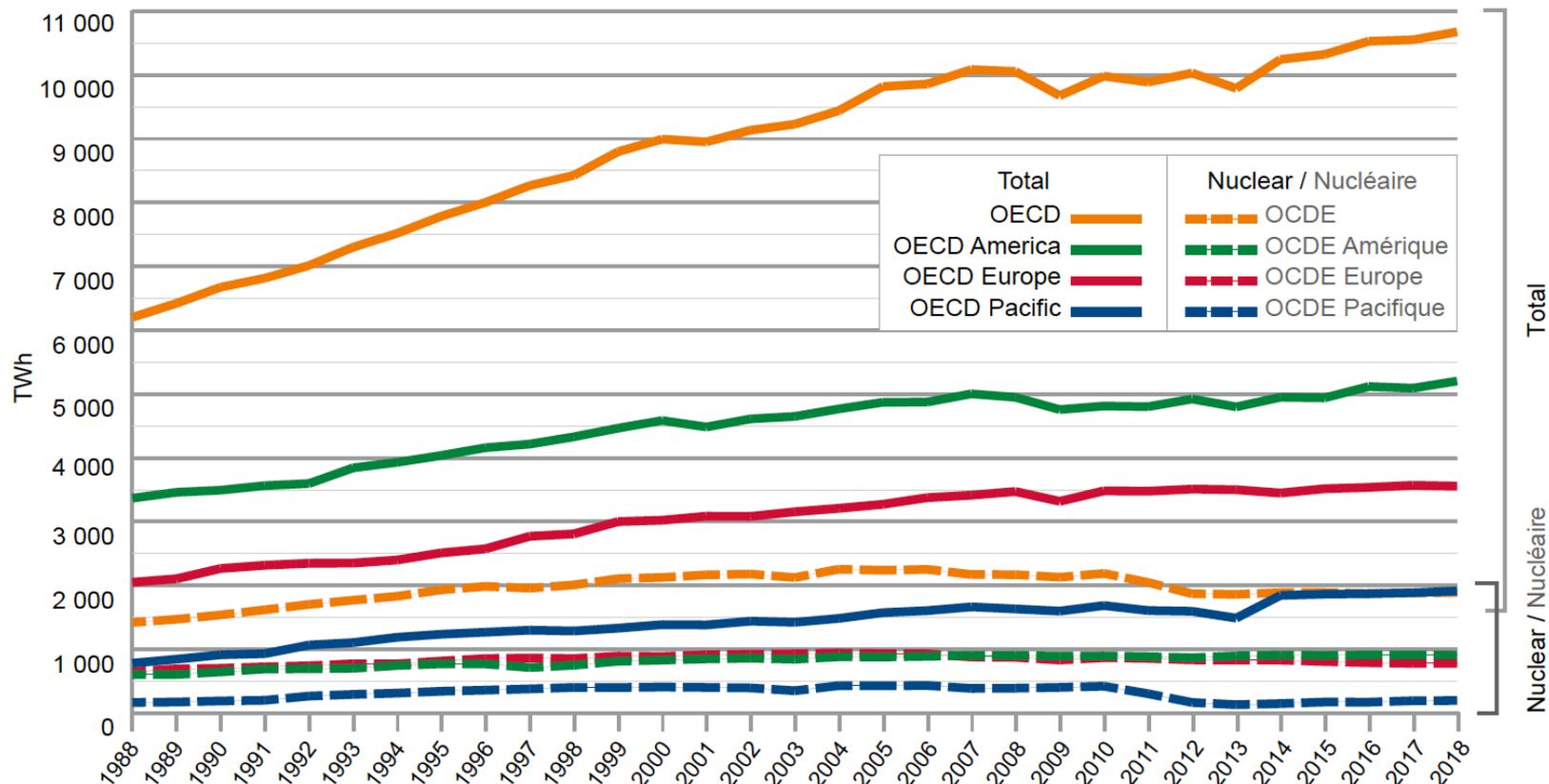
Electricity generation by source, Italy 1990-2019



ENERGIA ELETTRICA – contributo dal nucleare

Figure 1.2: Trends in total and nuclear electricity generation

Figure 1.2 : Évolution de la production d'électricité totale et d'origine nucléaire



StatLink www.oecd-nea.org/pub/7474/F1-2.xlsx

il trend nei paesi OECD

© OECD 2019
NEA No. 7474

ENERGIA ELETTRICA – contributo dal nucleare

ENERGIA ELETTRICA MONDIALE DAL NUCLEARE

FIGURE 1. WORLD NUCLEAR ELECTRICITY PRODUCTION IN 2019

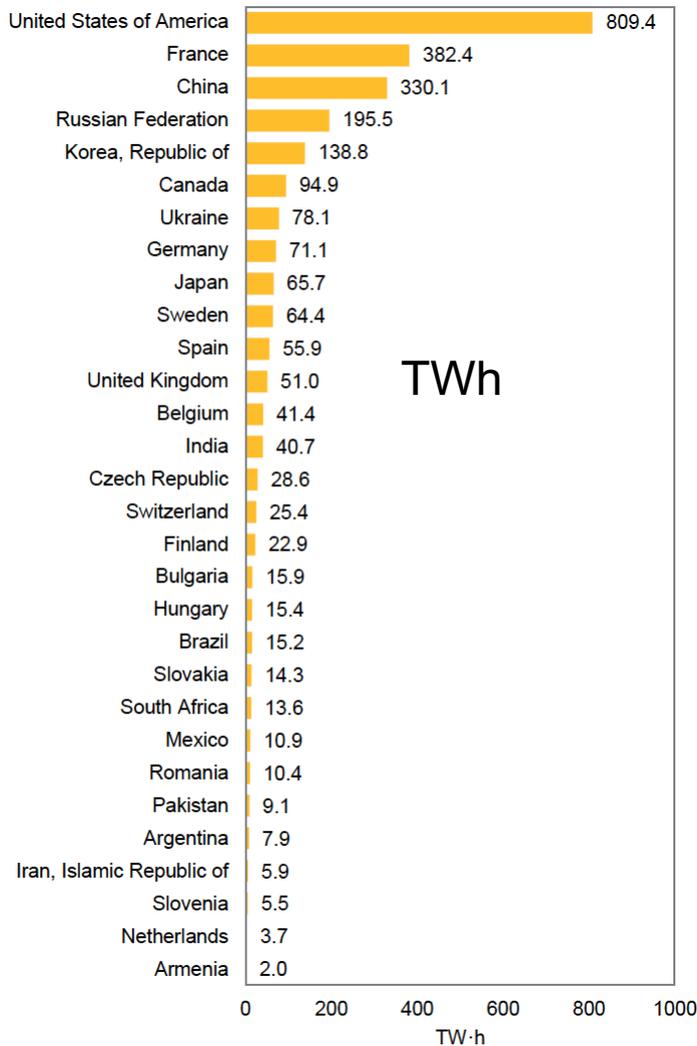
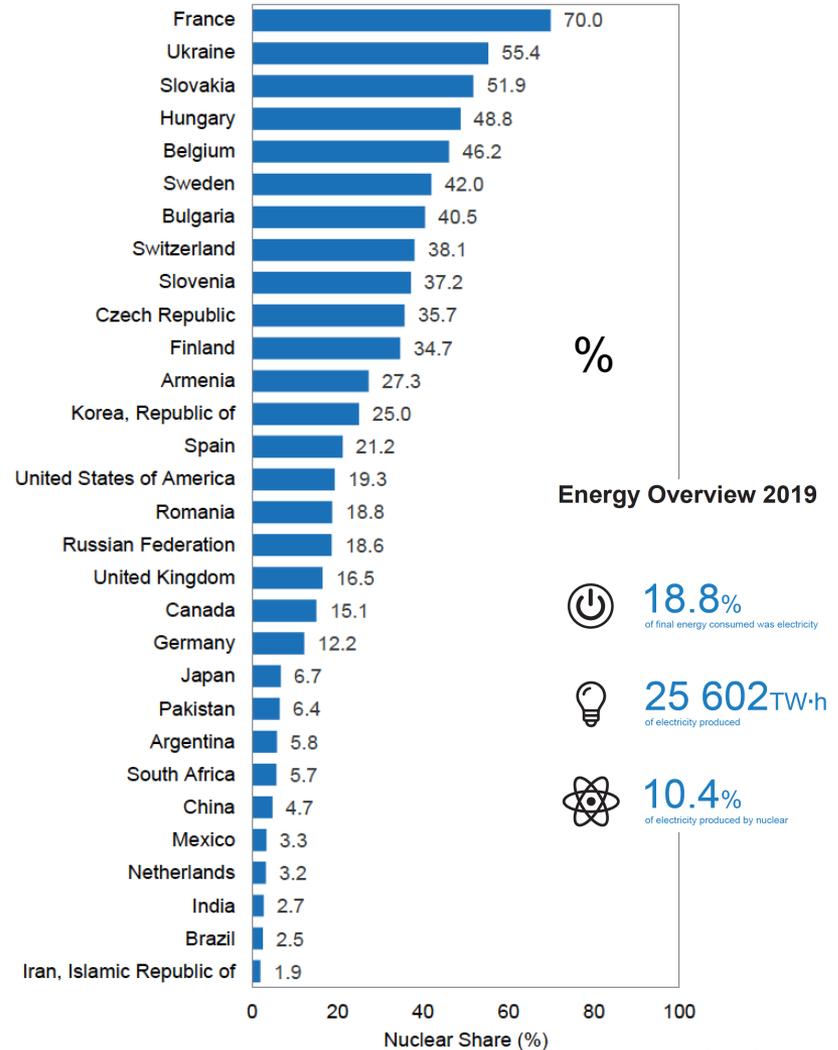


FIGURE 2. SHARE OF NUCLEAR IN TOTAL ELECTRICITY PRODUCTION IN THE WORLD IN 2019



Energy Overview 2019

18.8%
of final energy consumed was electricity

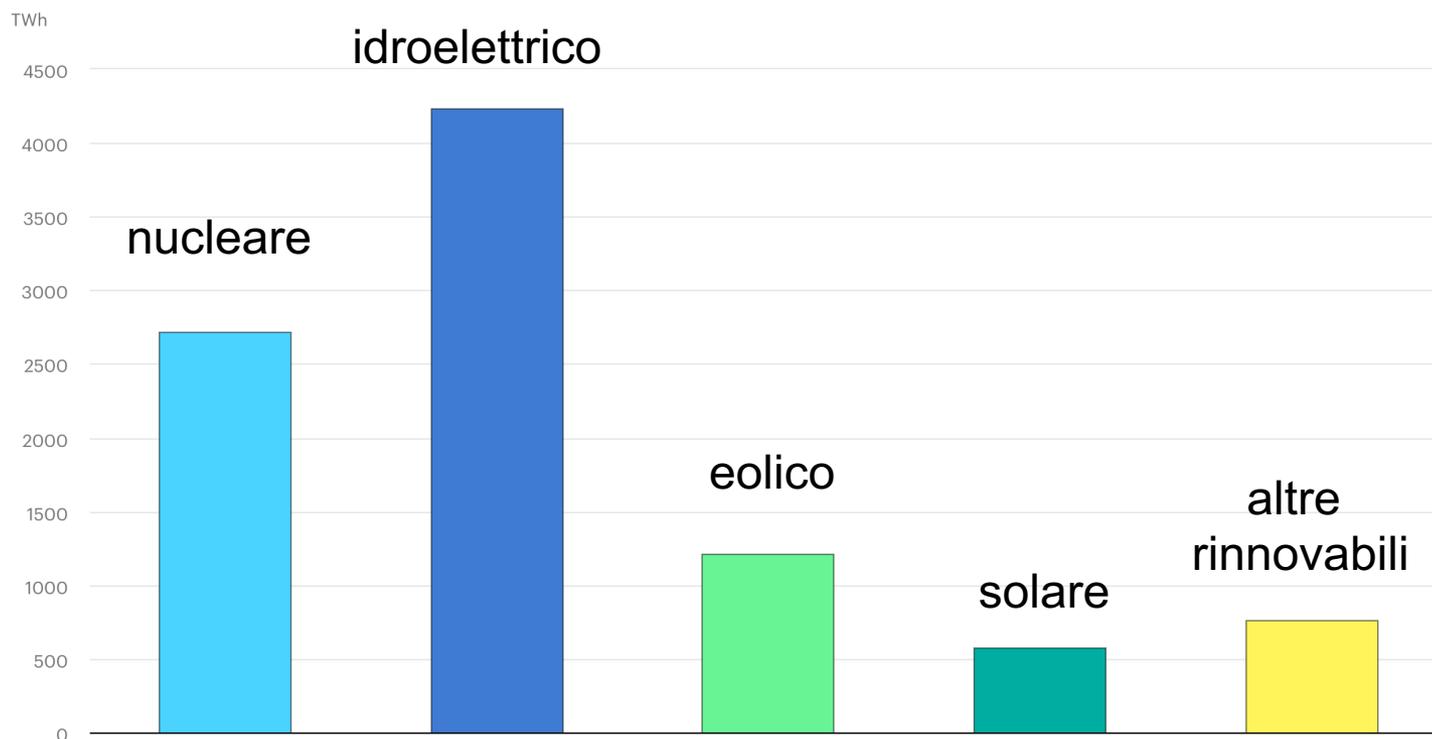
25 602 TWh
of electricity produced

10.4%
of electricity produced by nuclear

ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

Il nucleare, insieme alle energie rinnovabili, all'efficienza energetica e ad altre tecnologie innovative, può dare un contributo significativo al raggiungimento degli obiettivi di energia sostenibile.

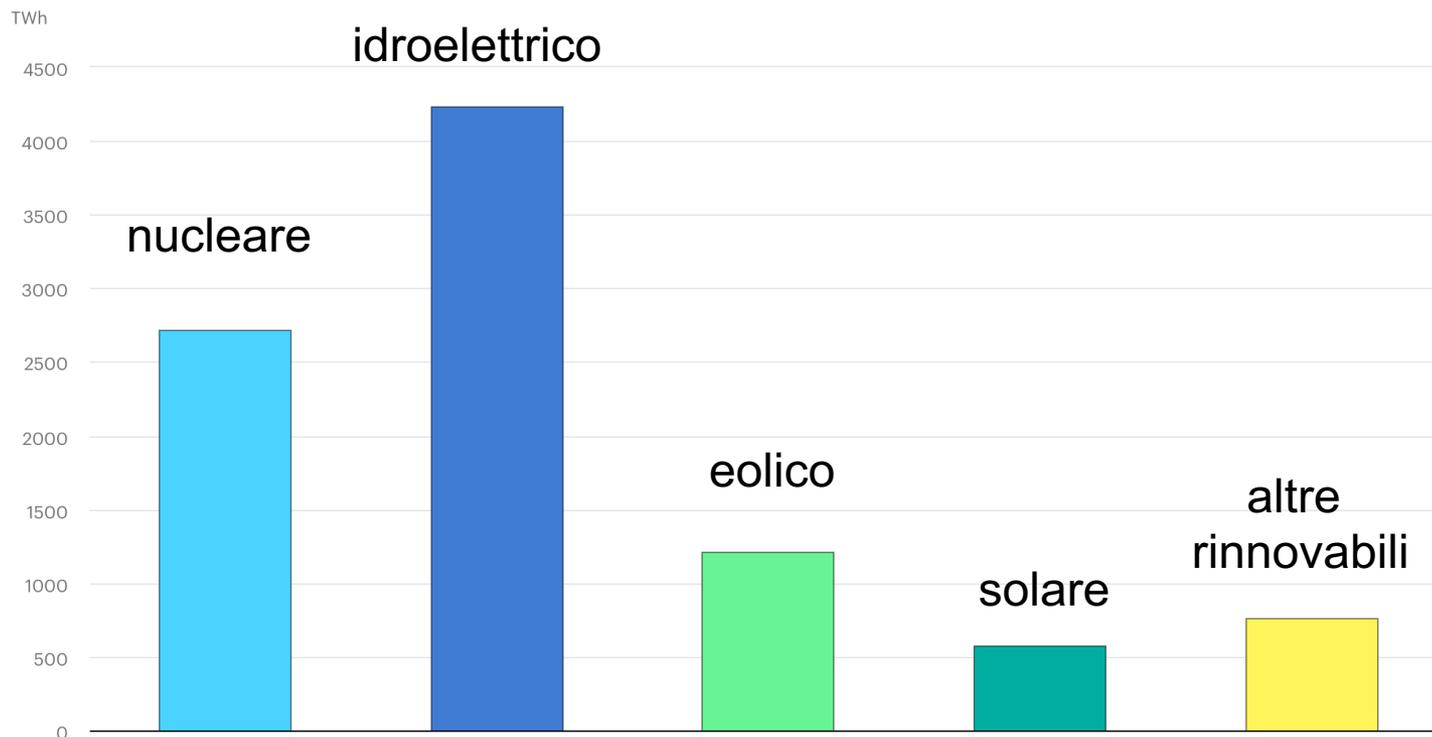
Nuclear Power in a Clean Energy System, IEA (2019)
<https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>



ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

L'energia nucleare e l'energia idroelettrica formano la spina dorsale della **produzione di elettricità a basse emissioni di carbonio**. Insieme, forniscono **tre quarti della produzione globale** a basse emissioni di carbonio.

Nuclear Power in a Clean Energy System, IEA (2019)
<https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>

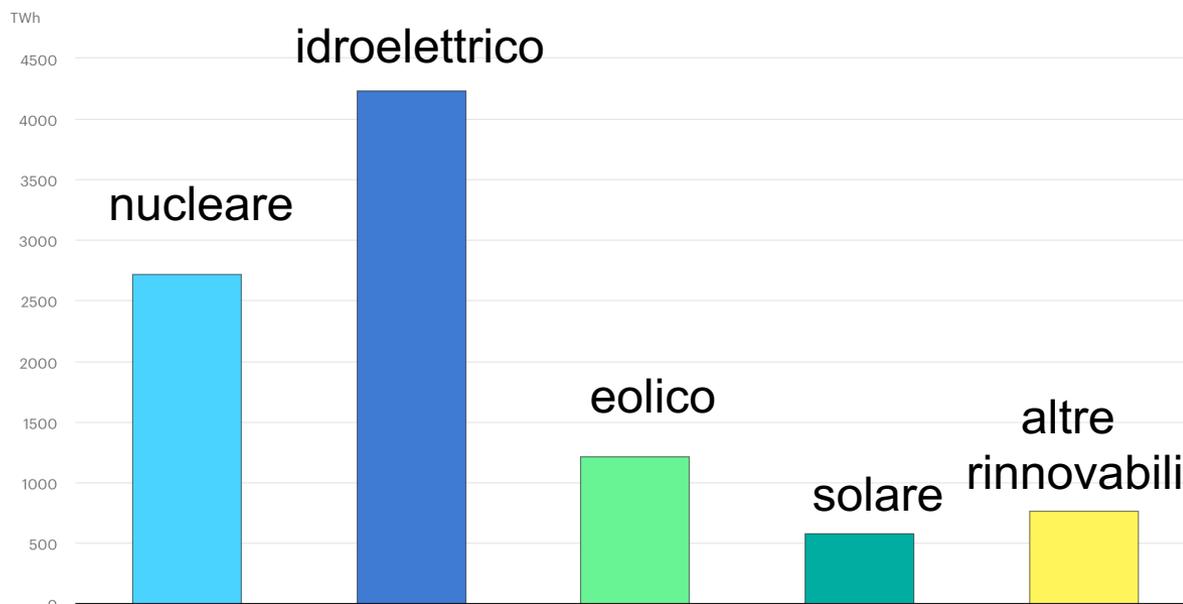


ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

L'energia nucleare è la seconda fonte più grande di elettricità a basse emissioni di carbonio oggi. Nel 2018, con 452 reattori operativi, ha fornito 2700 TWh di elettricità, il 10% della fornitura globale di elettricità.

Nelle economie avanzate, il nucleare è stato a lungo la più grande fonte di elettricità a basse emissioni di carbonio, fornendo il 18% della fornitura nel 2018.

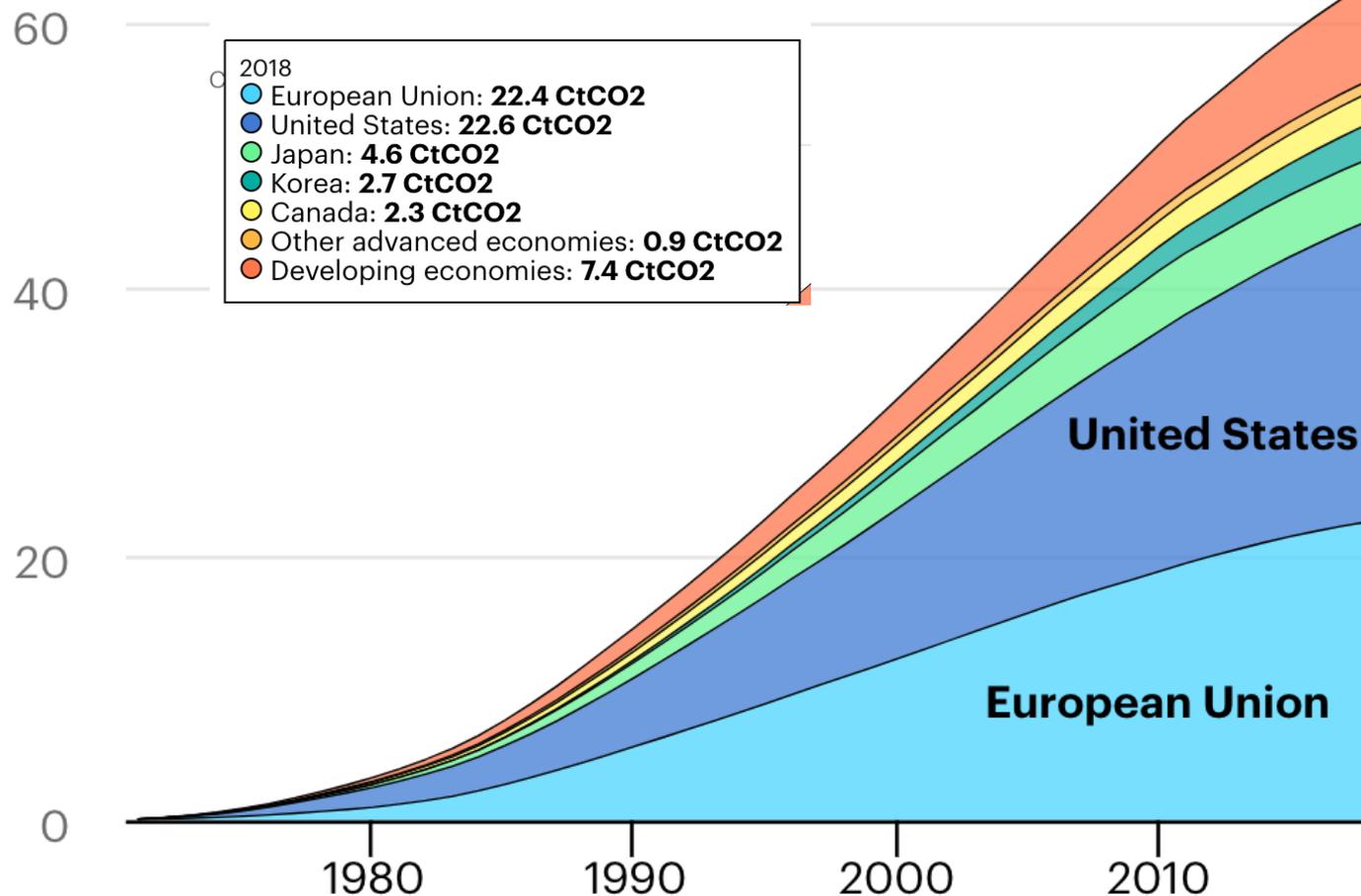
Nuclear Power in a Clean Energy System, IEA (2019)
<https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>



ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

Cumulative CO2 emissions avoided by global nuclear power in selected countries, 1971-2018

CtCO2



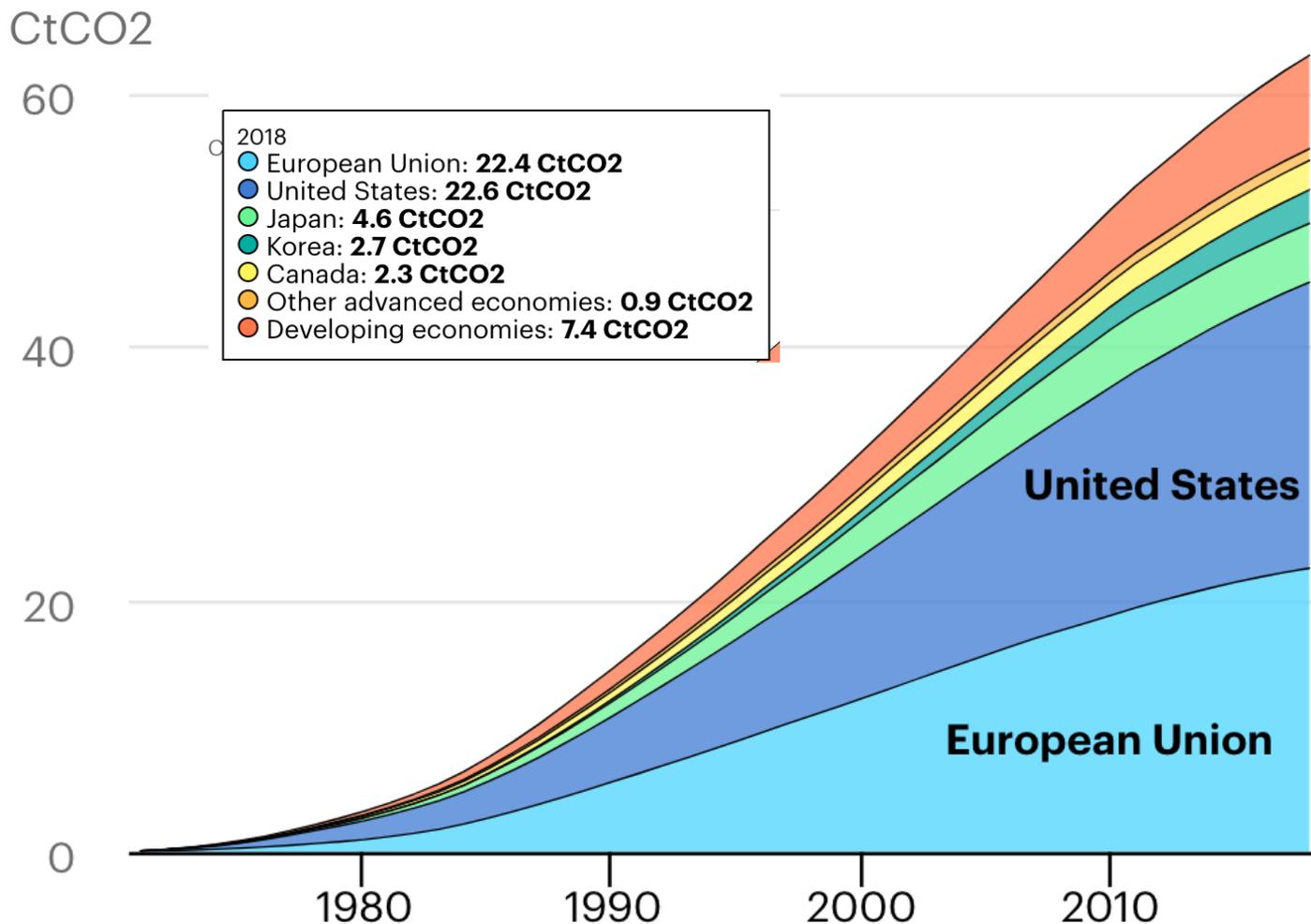
Negli ultimi 50 anni, l'uso del nucleare

ha ridotto le emissioni di CO₂ di circa 55 Gton

quasi due anni di emissioni globali legate all'energia.

ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

Cumulative CO2 emissions avoided by global nuclear power in selected countries, 1971-2018



Tuttavia, nonostante il contributo del nucleare e la rapida crescita delle rinnovabili, le emissioni di CO2 legate all'energia hanno raggiunto un livello record nel 2018, poiché la crescita della domanda di elettricità ha superato gli aumenti dell'energia a basse emissioni di carbonio.

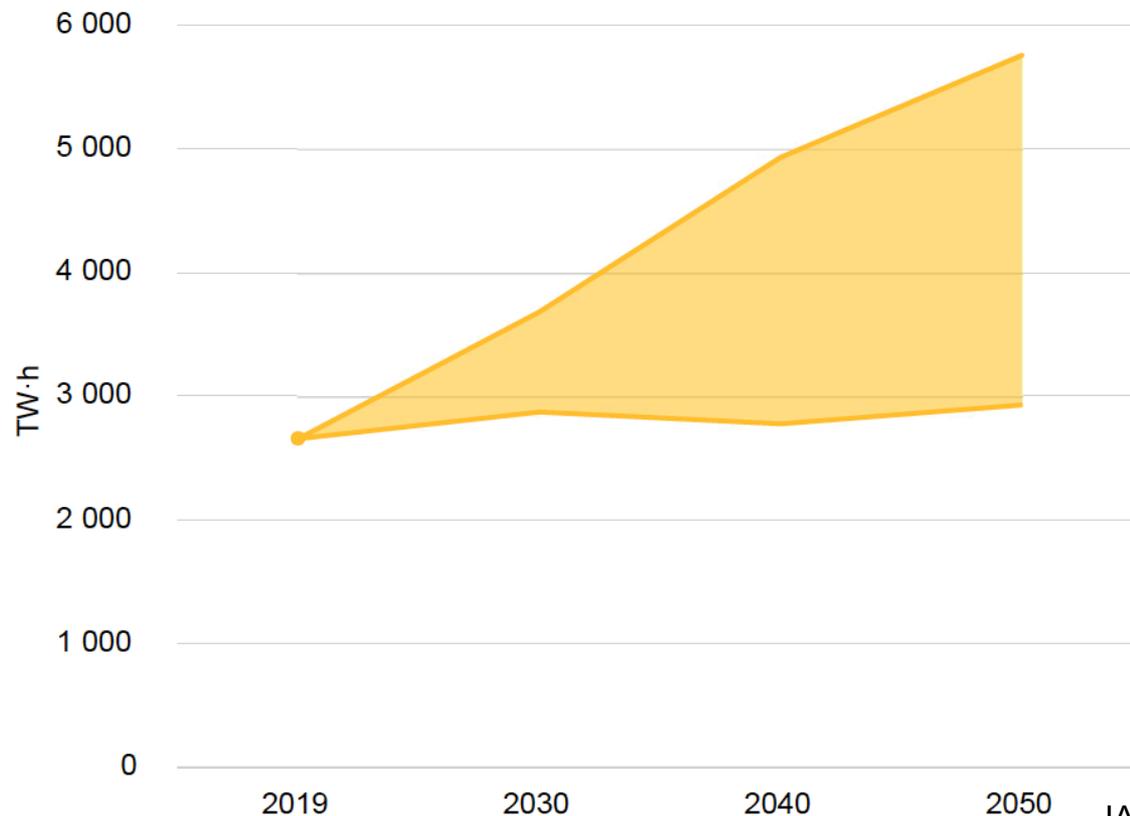
ENERGIA ELETTRICA – nucleare - previsioni

Proiezioni di produzione elettrica e nucleare

La produzione totale di elettricità dovrebbe aumentare di circa il 35% entro il 2030 e più che raddoppiare entro il 2050 rispetto al livello di produzione del 2019 livello.

Per quanto riguarda la produzione da fonte nucleare

FIGURE 8. WORLD NUCLEAR ELECTRICITY PRODUCTION



ENERGIA ELETTRICA – nucleare - previsioni

Proiezioni di produzione elettrica e nucleare

Nel caso più elevato, la produzione di elettricità nucleare dovrebbe aumentare quasi il 40% dai livelli del 2019 entro il 2030 e alla fine più che raddoppiare entro il 2050. La quota del nucleare nella produzione totale di elettricità dovrebbe aumentare di circa 1 punto percentuale.

Nel caso più basso, la produzione di elettricità nucleare dovrebbe aumentare di circa l'8% dai livelli del 2019 entro il 2030, salendo al 10% entro il 2050. La quota del nucleare nella produzione totale di elettricità dovrebbe diminuire di quasi il 50%.

TABLE 4. WORLD TOTAL AND NUCLEAR ELECTRICAL PRODUCTION, TW·h

Electricity Production	2019	2030		2040		2050	
		Low	High	Low	High	Low	High
Total	25 602	34 922	34 922	43 372	43 372	51 633	51 633
Nuclear	2 657	2 872	3 682	2 774	4 933	2 929	5 762
<i>Nuclear as % of Electricity Production</i>	10.4%	8.2%	10.5%	6.4%	11.4%	5.7%	11.2%

ENERGIA ELETTRICA – nucleare - previsioni

come cambia tenendo conto della chiusura dei vecchi reattori e della costruzione dei nuovi

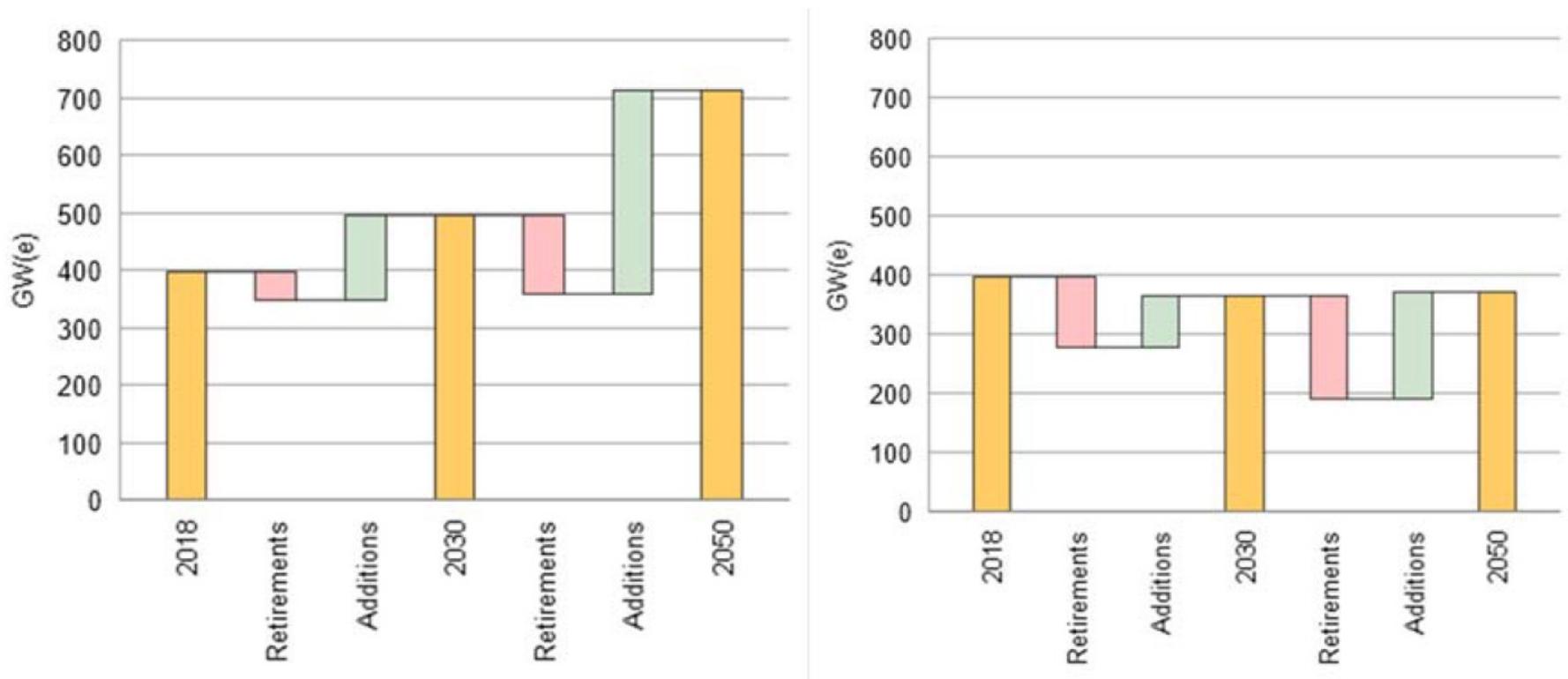


FIG. A-7. High (left) and low (right) projections for world nuclear capacity.

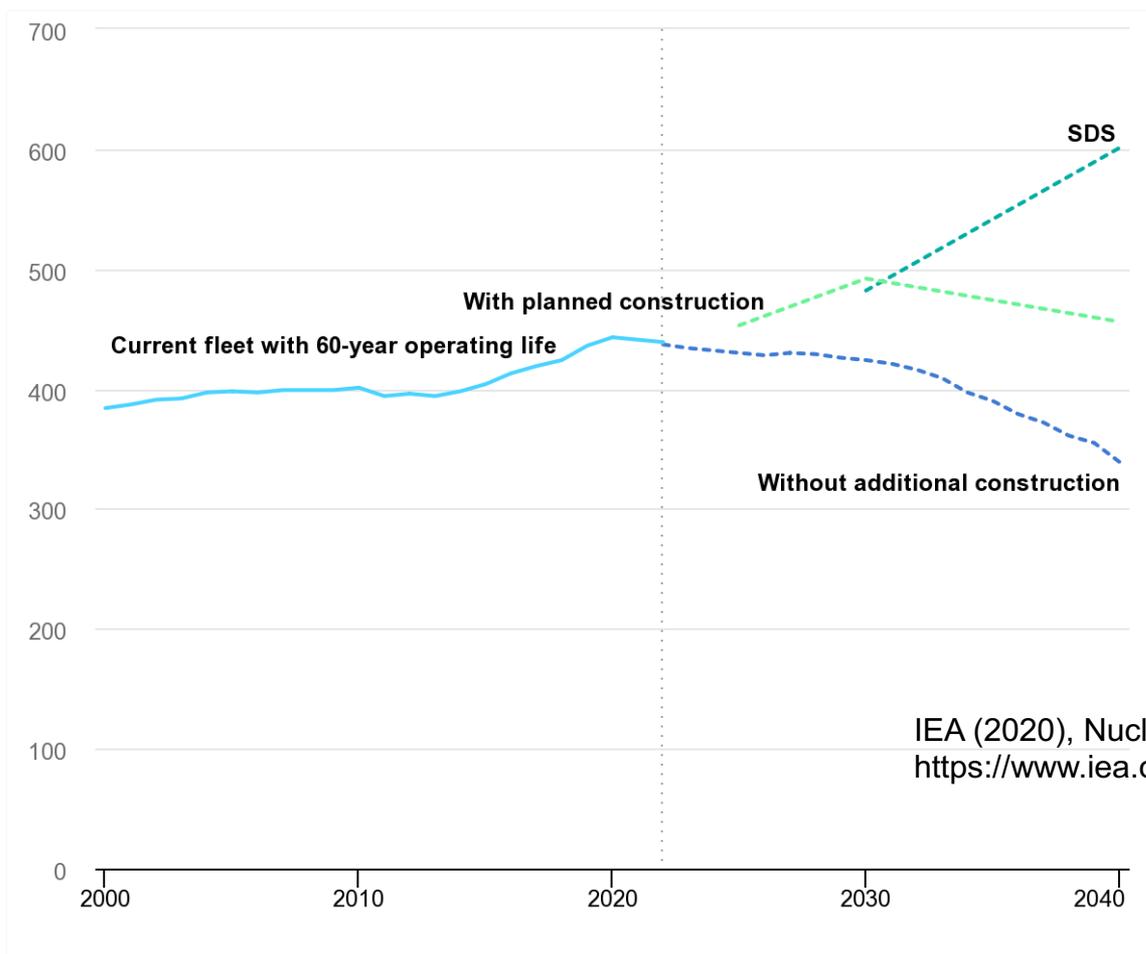
(Source: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA Reference Data Series No. 1,2018)

ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

Le previsioni di sviluppo del nucleare

- senza costruzione di nuovi reattori
- con la costruzione di quelli programmati
- quello necessario per rispondere alle richieste dell' SDS tenuto conto dell' aumentata richiesta di energia a cui le rinnovabili no riuscirebbero a rispondere da sole

GW



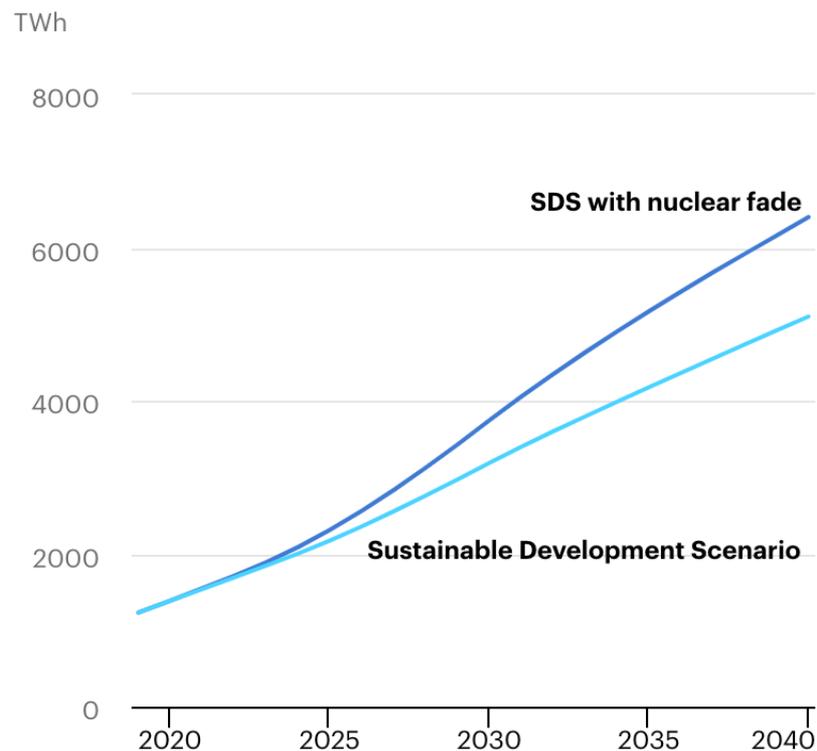
IEA (2020), Nuclear Power, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/nuclear-power>

ENERGIA nucleare e SOSTENIBILITÀ ambientale

Senza ulteriore nucleare, la transizione dell'energia pulita diventa più difficile e più costosa - richiedendo 1,6 trilioni di dollari di investimenti aggiuntivi nelle economie avanzate nei prossimi due decenni.

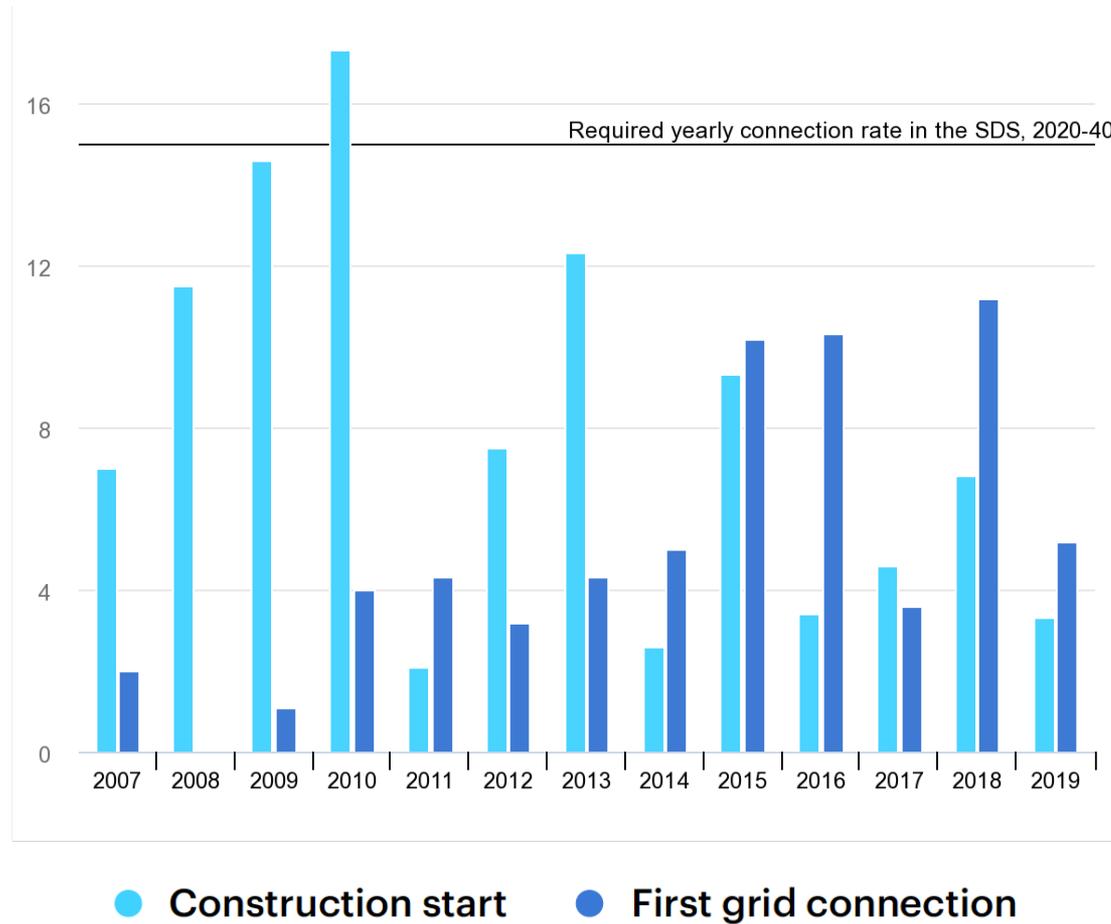
Criticamente, un grande deficit di energia pulita emergerebbe entro il 2040, chiamando l'eolico e il solare fotovoltaico ad accelerare ulteriormente la diffusione per colmare il divario.

Wind and solar PV generation by scenario 2019-2040



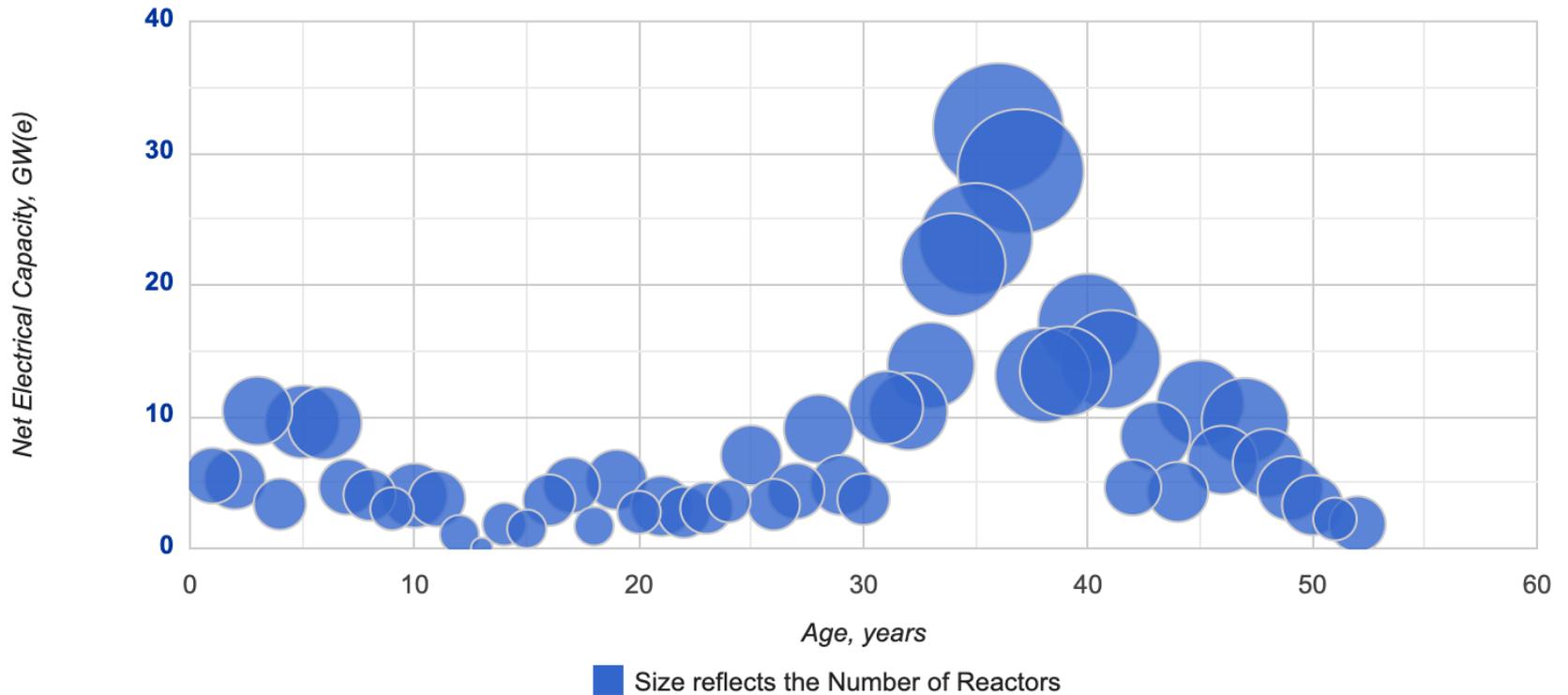
IEA. All Ri

Mix fonti per produzione energia elettrica



L'età dei reattori

OPERATIONAL REACTORS BY AGE



L'età dei reattori

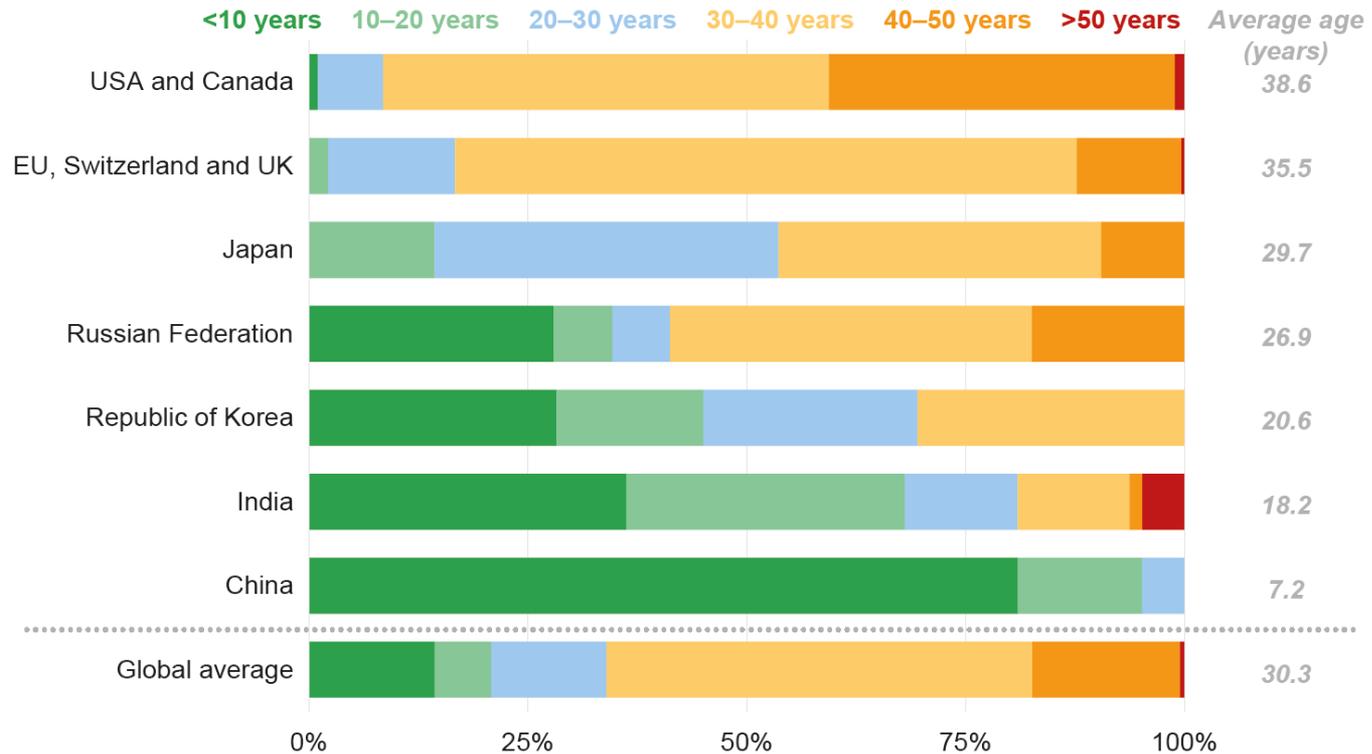


FIG. 30. Age profile of the nuclear fleet in operation in selected countries (weighted by capacity) as of 2020. Source: Ref. [64].

CONCLUSIONI

1. Dal nucleo si può estrarre energia per produrre energia elettrica
2. Due metodi:
 - a. fusione – intensa attività sperimentale; contributo reale fra qualche decennio (30-40 anni)
 - b. fissione – già sfruttata e intensa attività sperimentale per aumentare sicurezza ed affidabilità
3. L'energia nucleare è a bassa emissione di gas serra pertanto
 - a. gioca già un ruolo importante nella transizione energetica agevolandola e accelerandola
 - b. nucleare e rinnovabili non sono in concorrenza ma perseguono lo stesso obiettivo; l'energia prodotta per via nucleare può costituire una base continua per far fronte alla discontinuità di solare ed eolico;
 - c. può essere usato per produrre Idrogeno.

L'energia nucleare è un'opportunità da sfruttare

CONCLUSIONI

grazie

saverio.altieri@unipv.it

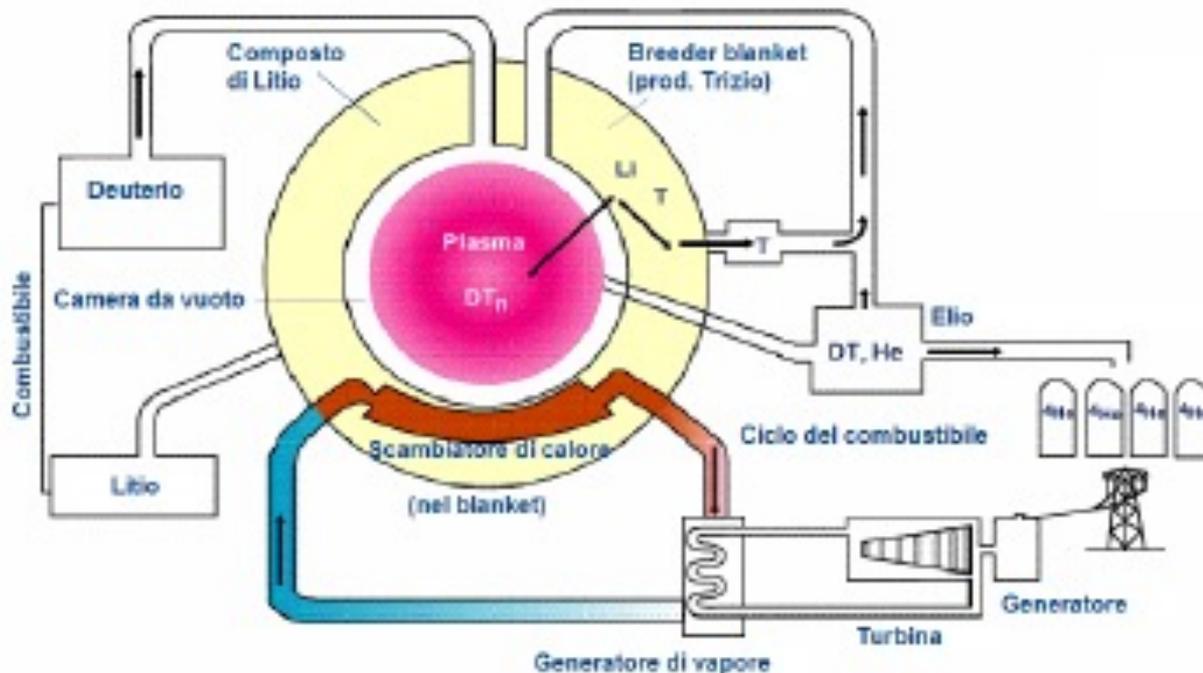
ENERGIA dal nucleo - fusione

Deuterio : 1 g in 39 litri di acqua

Litio : molto abbondante nelle rocce, oceani, acque minerali



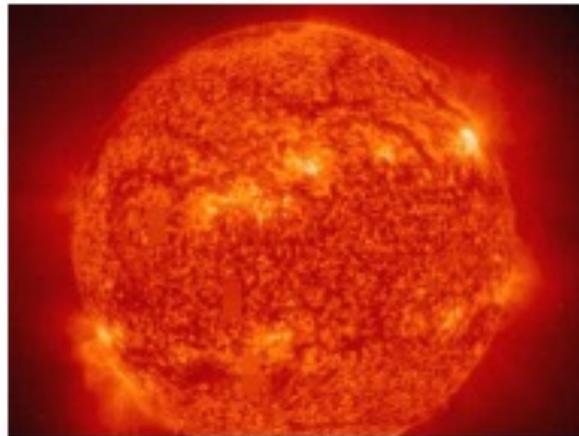
Trizio: prodotto in ciclo chiuso nel reattore



ENERGIA dal nucleo - fusione

Per ottenere la fusione occorre

- riscaldare il gas di deuterio-trizio a 150-200 milioni di ° C
- mantenerlo in un'opportuna configurazione di equilibrio
- evitarne il contatto con le pareti della camera di reazione



già a 100 mila gradi, atomi e molecole si dissociano in nuclei positivi ed elettroni dando luogo a un nuovo stato della materia chiamato plasma.

Fusione: confinamento

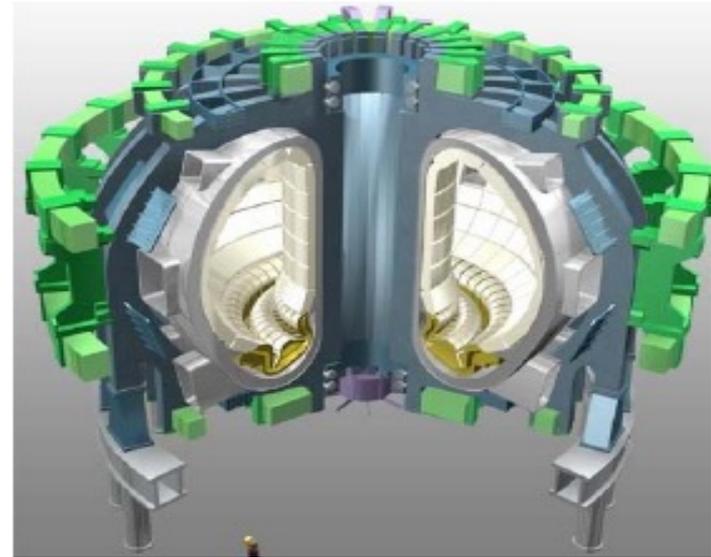
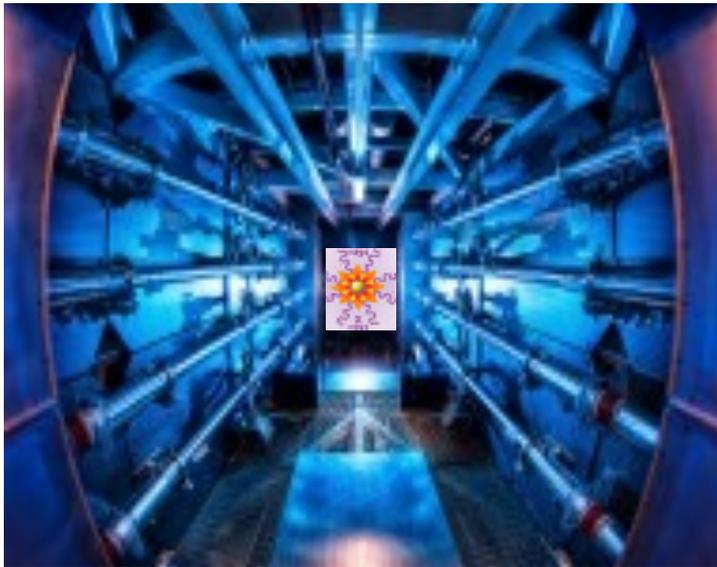
non ci sono materiali che possano reggere temperature di milioni di gradi

confinamento del plasma



inerziale

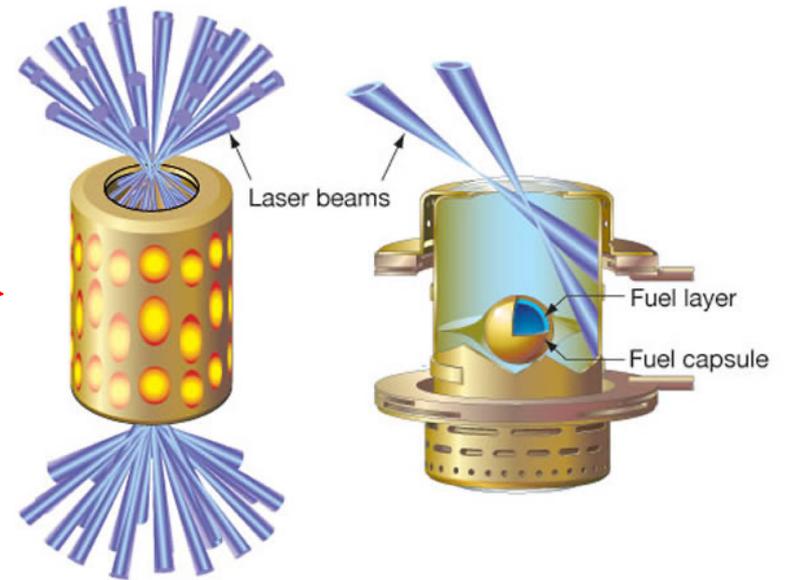
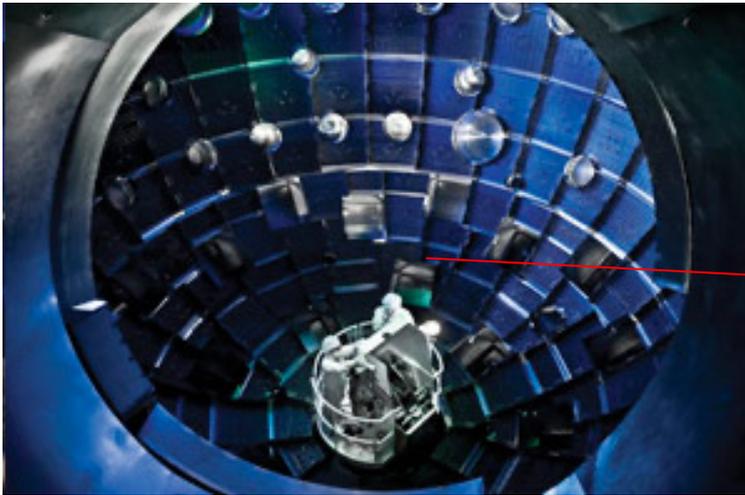
magnetico



Il plasma è confinato in una camera a forma di ciambella mediante intensi campi magnetici prodotti da bobine magnetiche avvolte intorno alla camera stessa

Confinamento inerziale

The National Ignition Facility (NIF) at Lawrence Livermore National Laboratory in California



192 fasci laser

29 settembre

1800 kJ: energia cinetica di un camion di 2 tonnellate a 160 km/h



14 kJ: energia cinetica di una palla da tennis a 80 km/h

Guadagno di potenza = $14/1800 = 0.008$

Confinamento magnetico

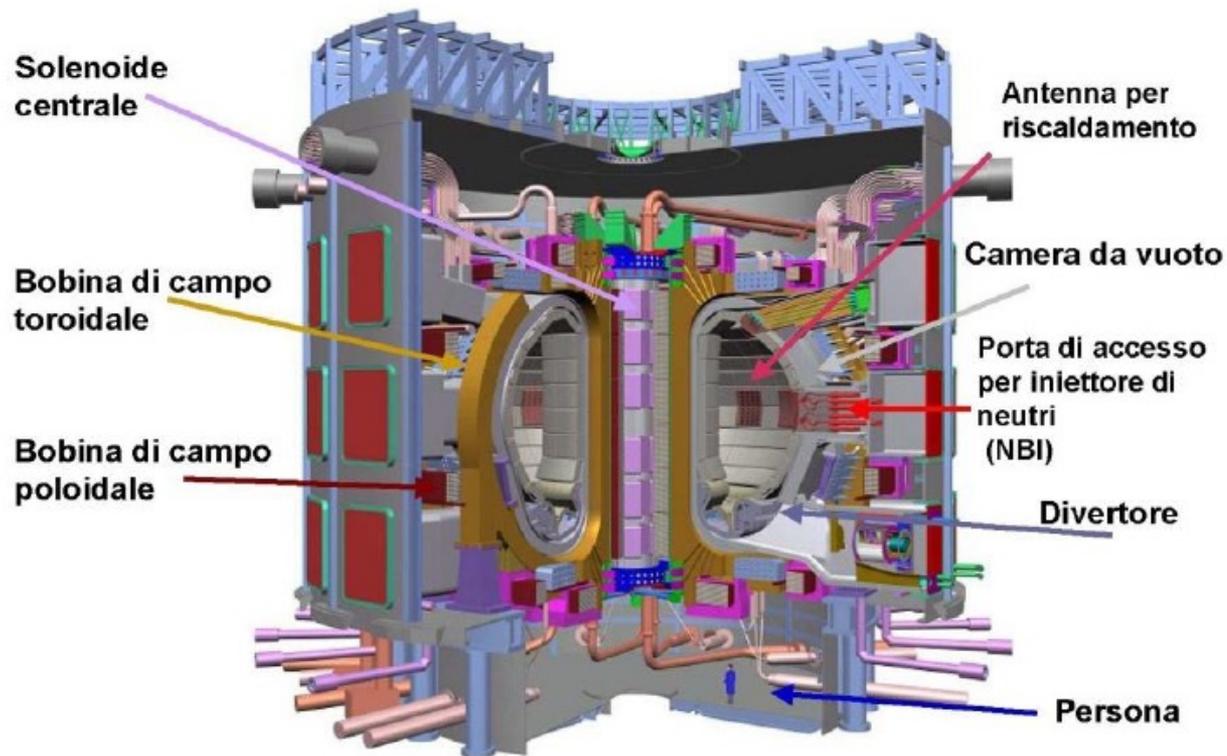
JET (*Joint European Torus*)

International Thermonuclear Experimental Reactor

Progetto ITER

JET	0.65 (1997)
ITER	5 - 10
Reattore	40 - 60

UE, Cina, Giappone, Corea, Russia, USA



Fusione: prospettive

Il reattore sperimentale ITER dovrà dimostrare entro i prossimi 15 anni la possibilità di ottenere un plasma che brucia producendo un buon guadagno di energia (10)

Si aprirà così la strada verso la costruzione di DEMO, il primo reattore dimostrativo, in 30-40 anni

Il coinvolgimento dell'Industria, così come la formazione e il training delle giovani generazioni saranno condizione necessaria per il raggiungimento dell'obiettivo finale: l'energia da fusione.

<https://www.youtube.com/watch?v=XNcGpQCX8a0>

<https://youtu.be/vPS-epGPJmg>

COMPOSIZIONE DEL COSTO DI PRODUZIONE DEL KWH



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

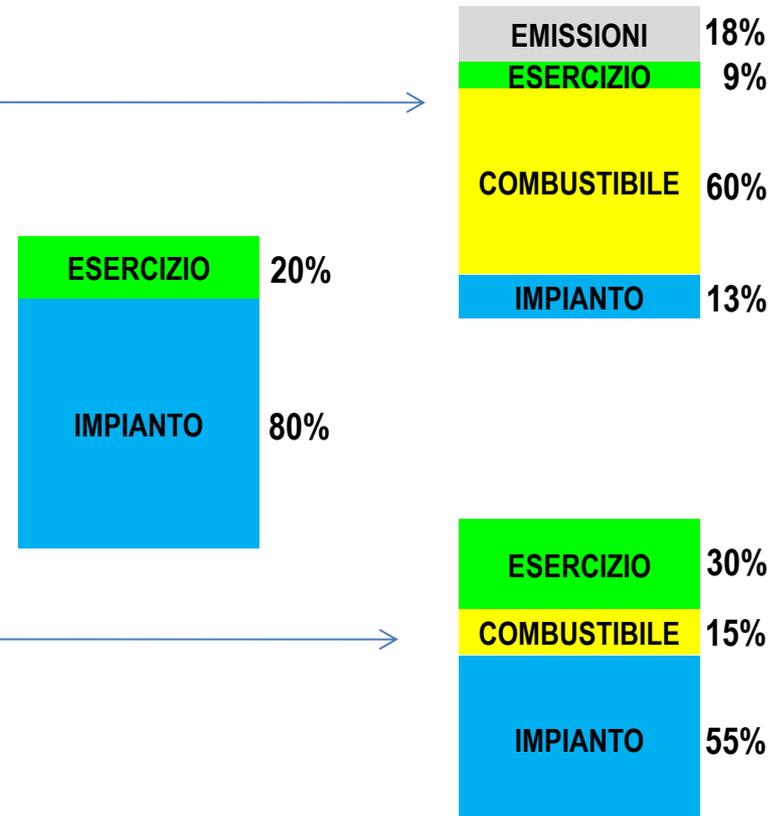
COMPOSIZIONE DEL COSTO DI PRODUZIONE DEL KWH

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

- fonti fossili (petrolio, gas, carbone):**
 - basso costo di impianto
 - alto costo del combustibile
 - costo dovuto alle emissioni di CO₂

- fonti idroelettrica, eolica e solare:**
 - alto costo di impianto
 - costo nullo del combustibile
 - costo nullo delle emissioni di CO₂

- fonte nucleare:**
 - alto costo di impianto
 - basso costo del combustibile
 - costo nullo delle emissioni di CO₂



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

L'ENERGIA NUCLEARE: ASPETTI TECNICI, ECONOMICI E AMBIENTALI

Caratteristiche economiche dell'energia nucleare

