

Sustainability 2022
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale
Sapienza, Università di Roma
24 Novembre 2022 – Aula del Chiostro

La sostenibilità dell'energia nucleare

Gianfranco Caruso
Docente di Impianti Nucleari
Sapienza, Università di Roma



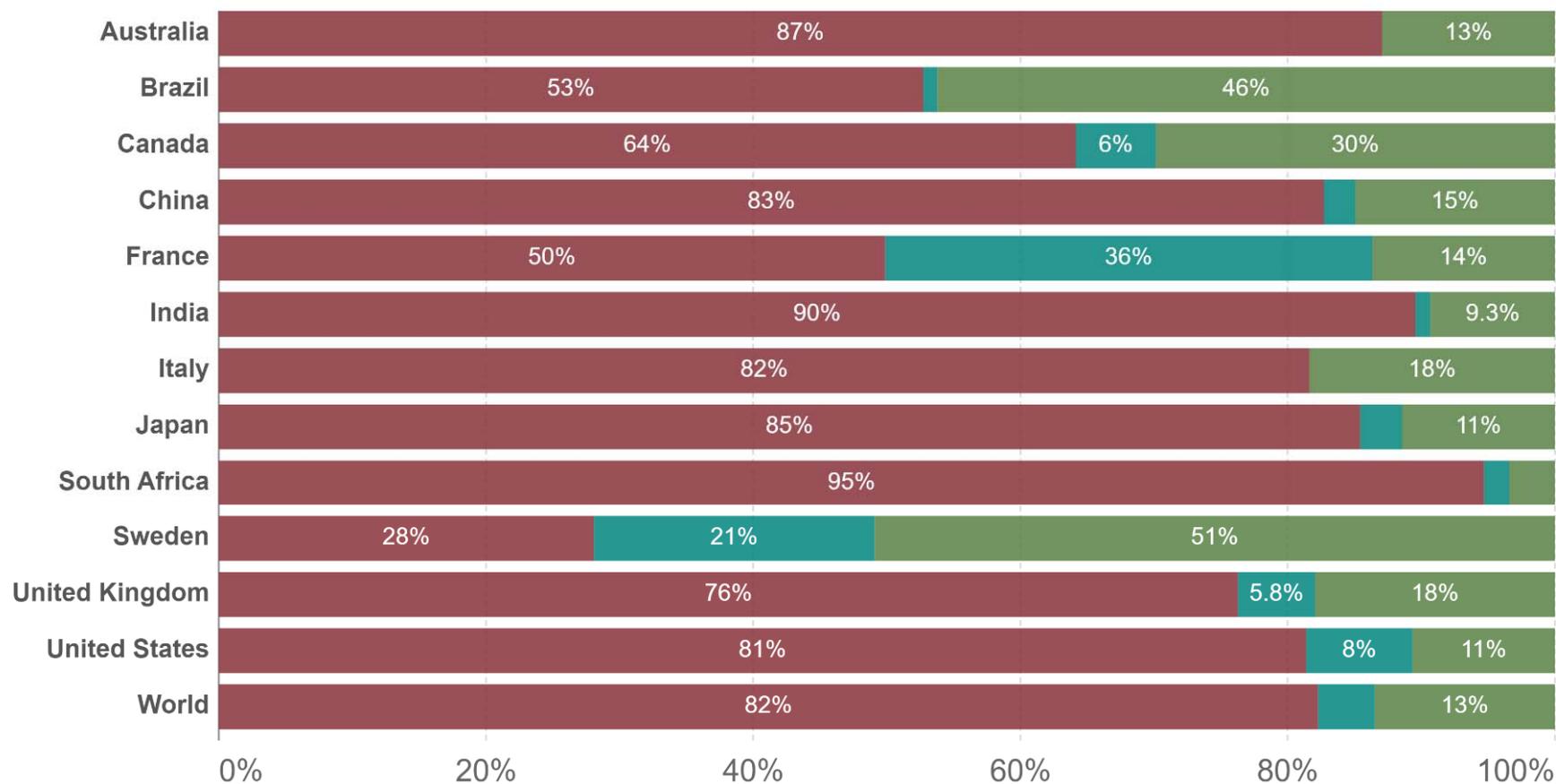
Consumo energia primaria per fonte

Per capita energy from fossil fuels, nuclear and renewables, 2021

Our World
in Data

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

■ Fossil fuels ■ Nuclear per capita ■ Renewables per capita



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy-mix • CC BY



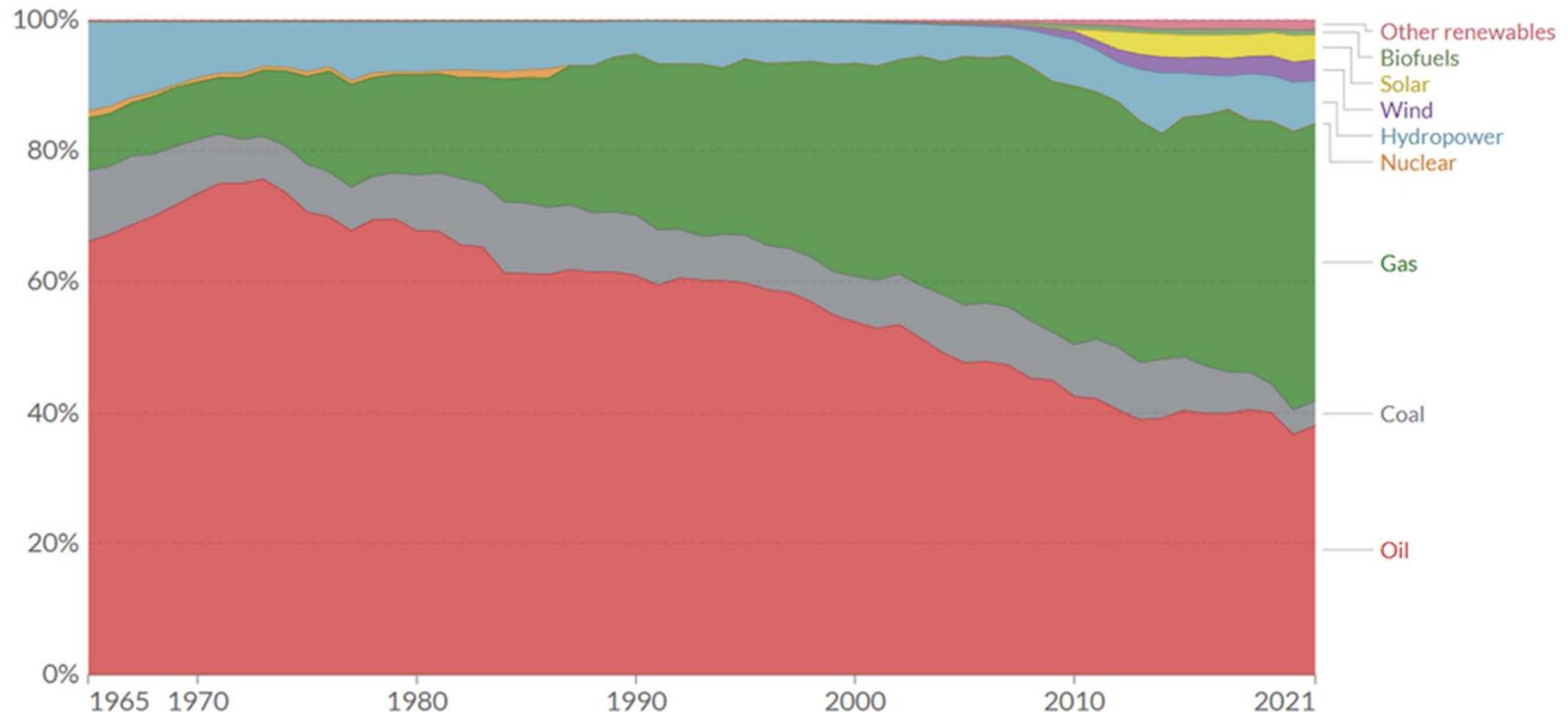
Consumo di energia primaria per fonte - Italia

Energy consumption by source, Italy

Our World
in Data

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.

[Change region](#) Relative



Source: BP Statistical Review of World Energy
Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

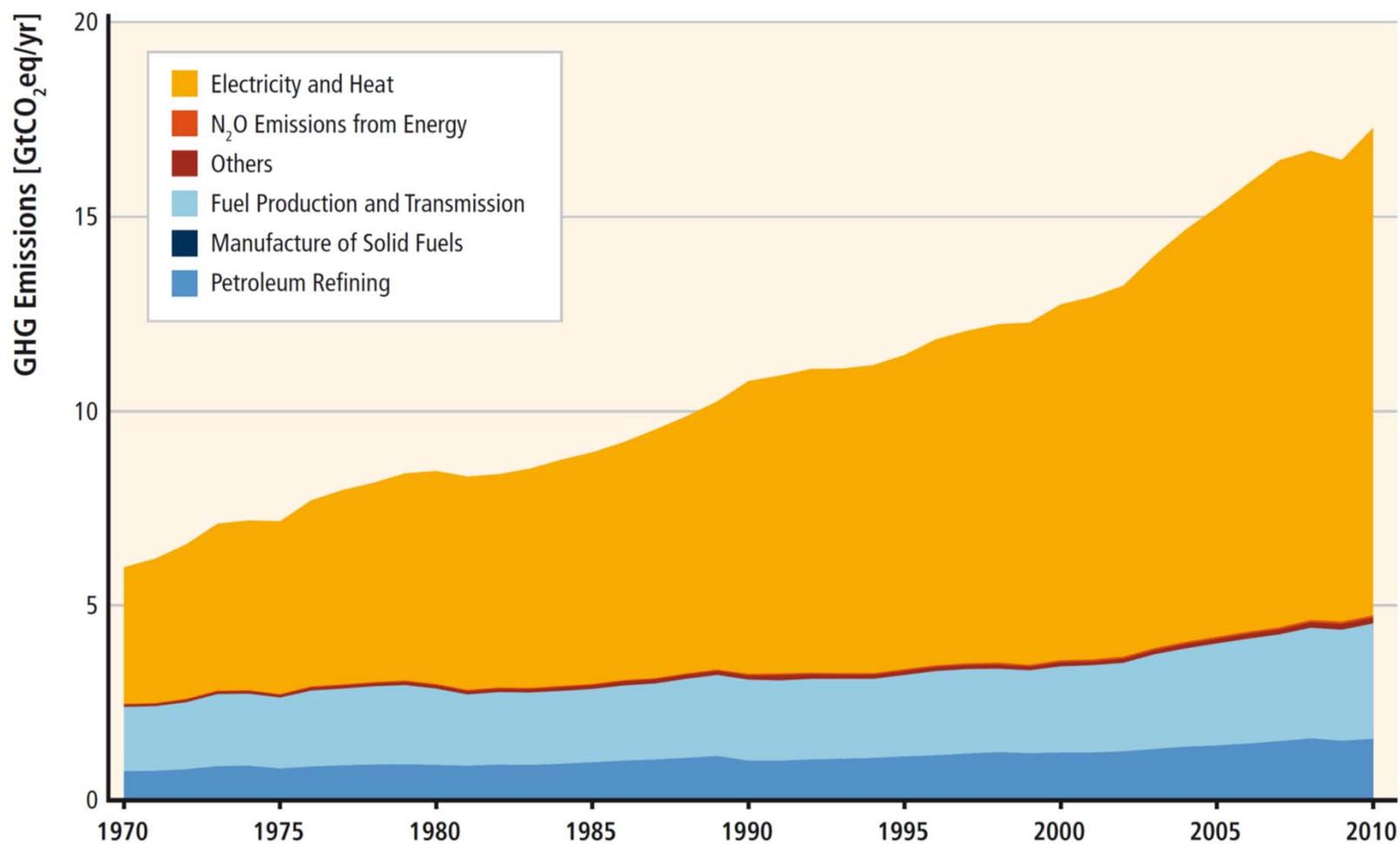
OurWorldInData.org/energy • CC BY

▶ 1965 2021

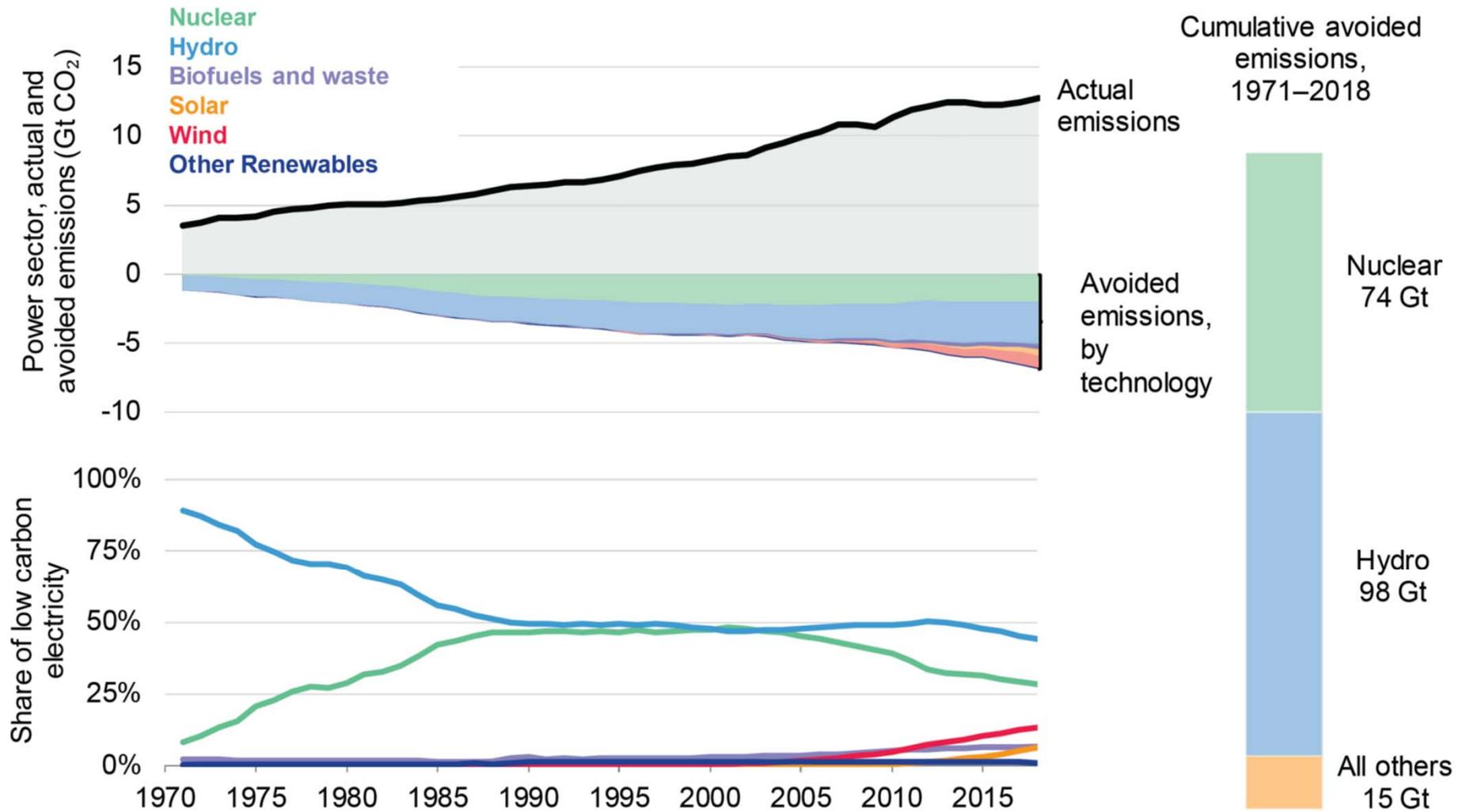


Trend emissioni CO₂

Source: IEA, 2012



Global CO₂ avoided emissions from the electricity generation



Source: IAEA CLIMATE CHANGE AND NUCLEAR POWER 2020



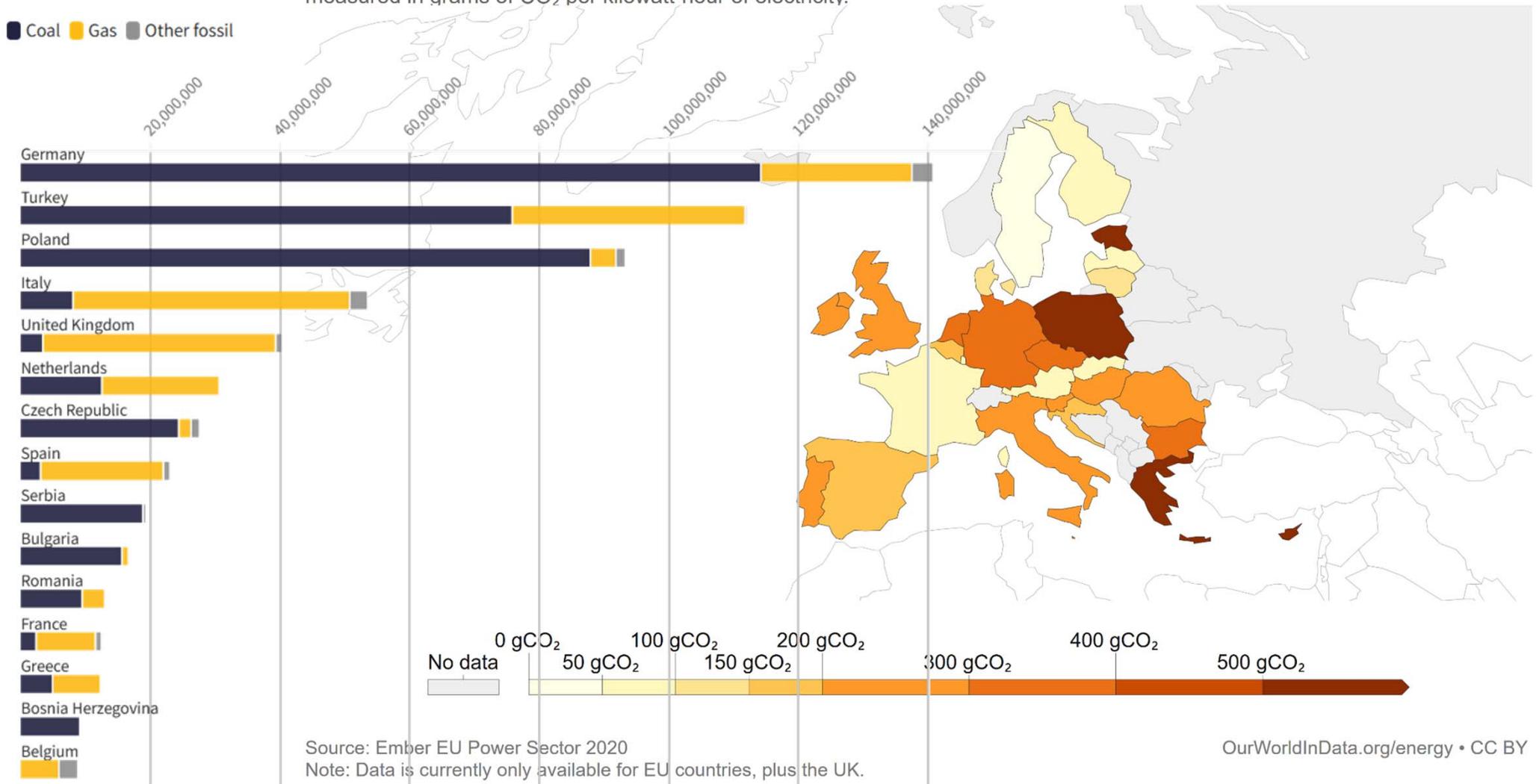
Emissioni nel 2021 causate da produzione di elettricità

Carbon intensity of electricity per kWh, 2020

Carbon intensity measures the amount of greenhouse gases emitted per unit of electricity produced. Here it is measured in grams of CO₂ per kilowatt-hour of electricity.

Our World
in Data

■ Coal ■ Gas ■ Other fossil



Source: Ember EU Power Sector 2020
Note: Data is currently only available for EU countries, plus the UK.

OurWorldInData.org/energy • CC BY



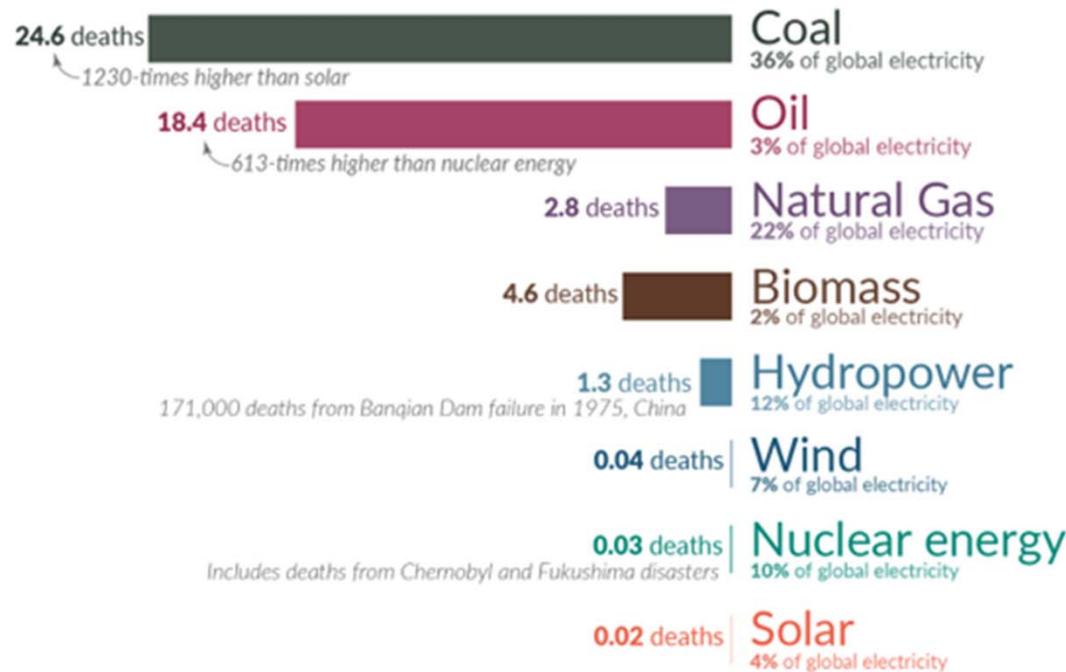
Numero di decessi per TWh

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

Our World
in Data

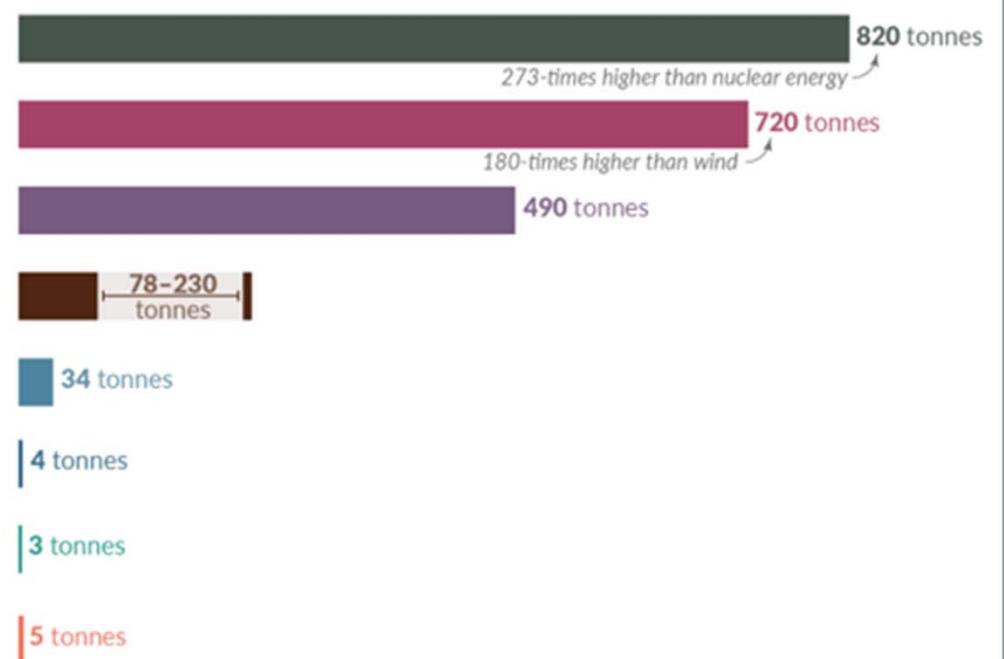
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of electricity production.
1 terawatt-hour is the annual electricity consumption of 150,000 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 150 people in the EU.



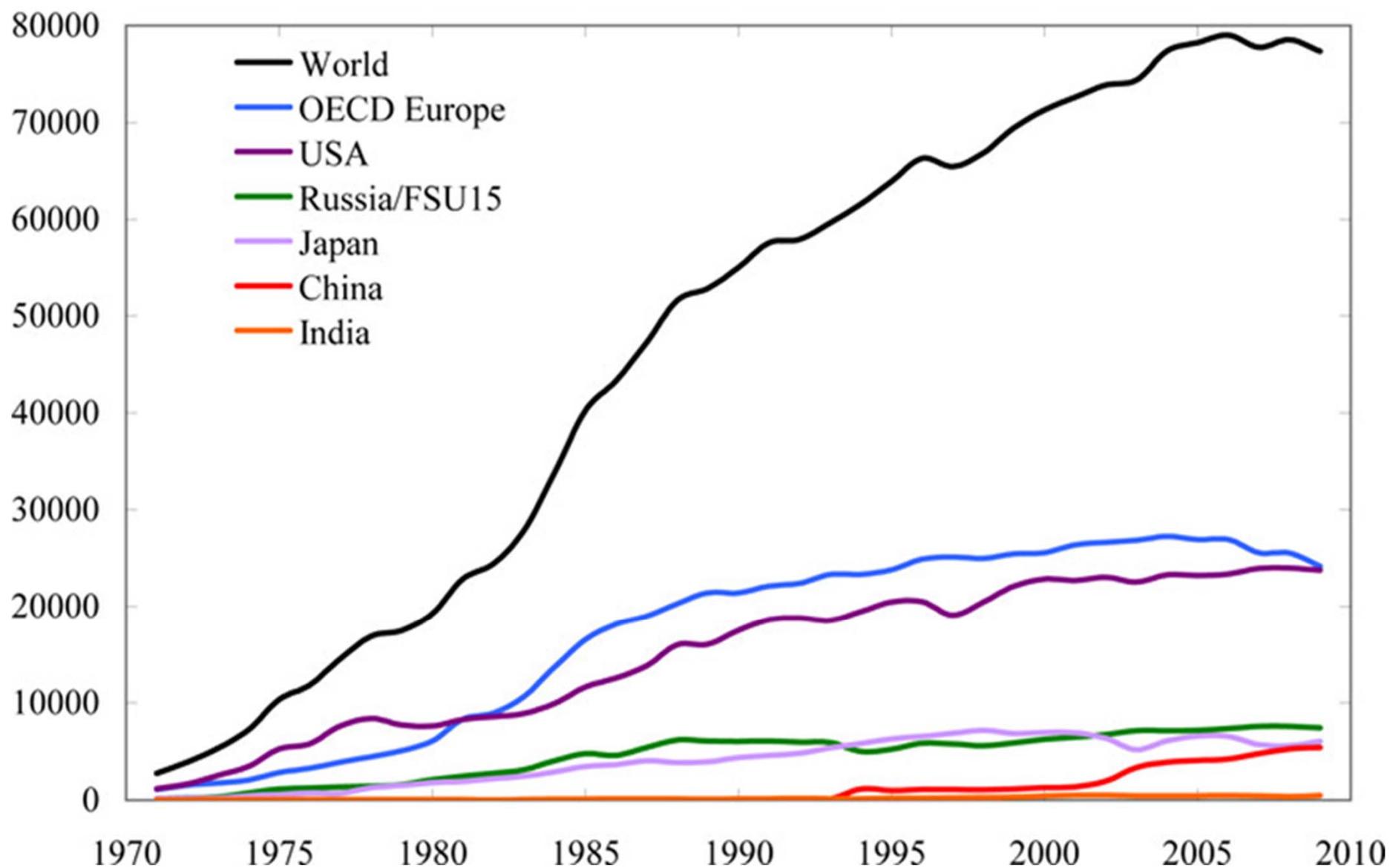
Death rates from fossil fuels and biomass are based on state-of-the-art plants with pollution controls in Europe, and are based on older models of the impacts of air pollution on health. This means these death rates are likely to be very conservative. For further discussion, see our article: OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy. Electricity shares are given for 2021. Data sources: Markandya & Wilkinson (2007); UNSCEAR (2008; 2018); Sovacool et al. (2016); IPCC AR5 (2014); Pehl et al. (2017); Ember Energy (2021).

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

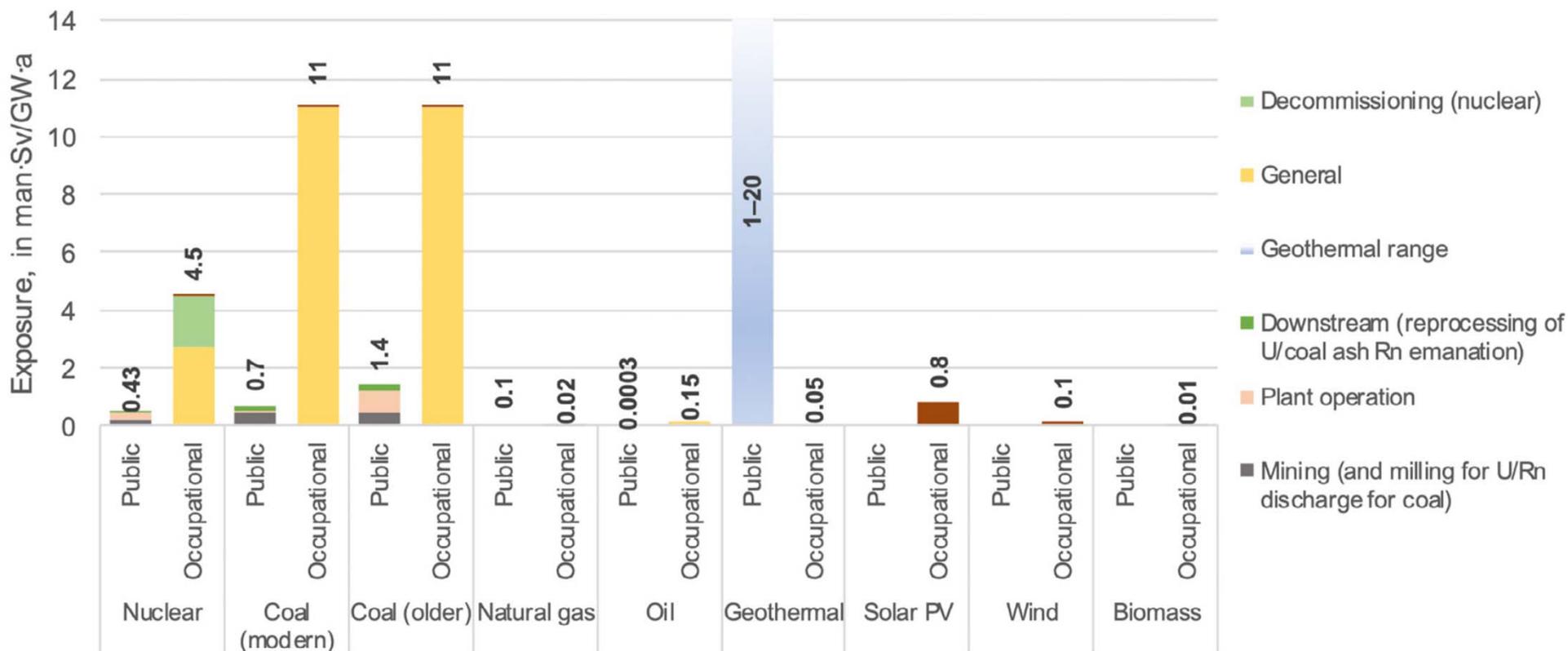
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.



Mean number of deaths prevented annually by nuclear power 1971-2009



Public and occupational exposures from electricity generation, normalized to electricity generated, [man-Sievert /GW-year]

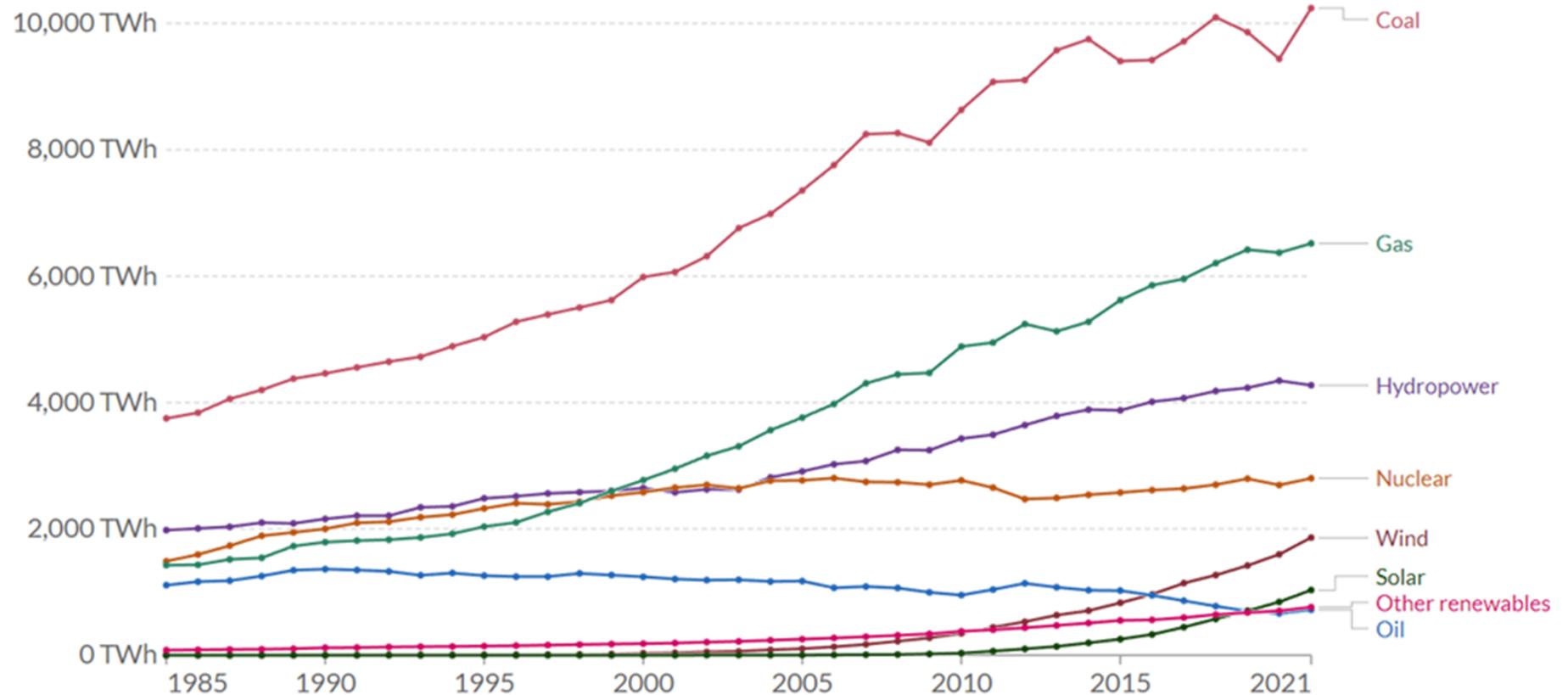


Wsygi \$/mih\$ exsrw\$gnrxng\$ \$sq q mxi\$sr\$di\$jjgw\$ \$j\$E\$xsq m\$/\$ehexsr\$6a2



Produzione elettrica per fonte - Mondo

Electricity production by source, World



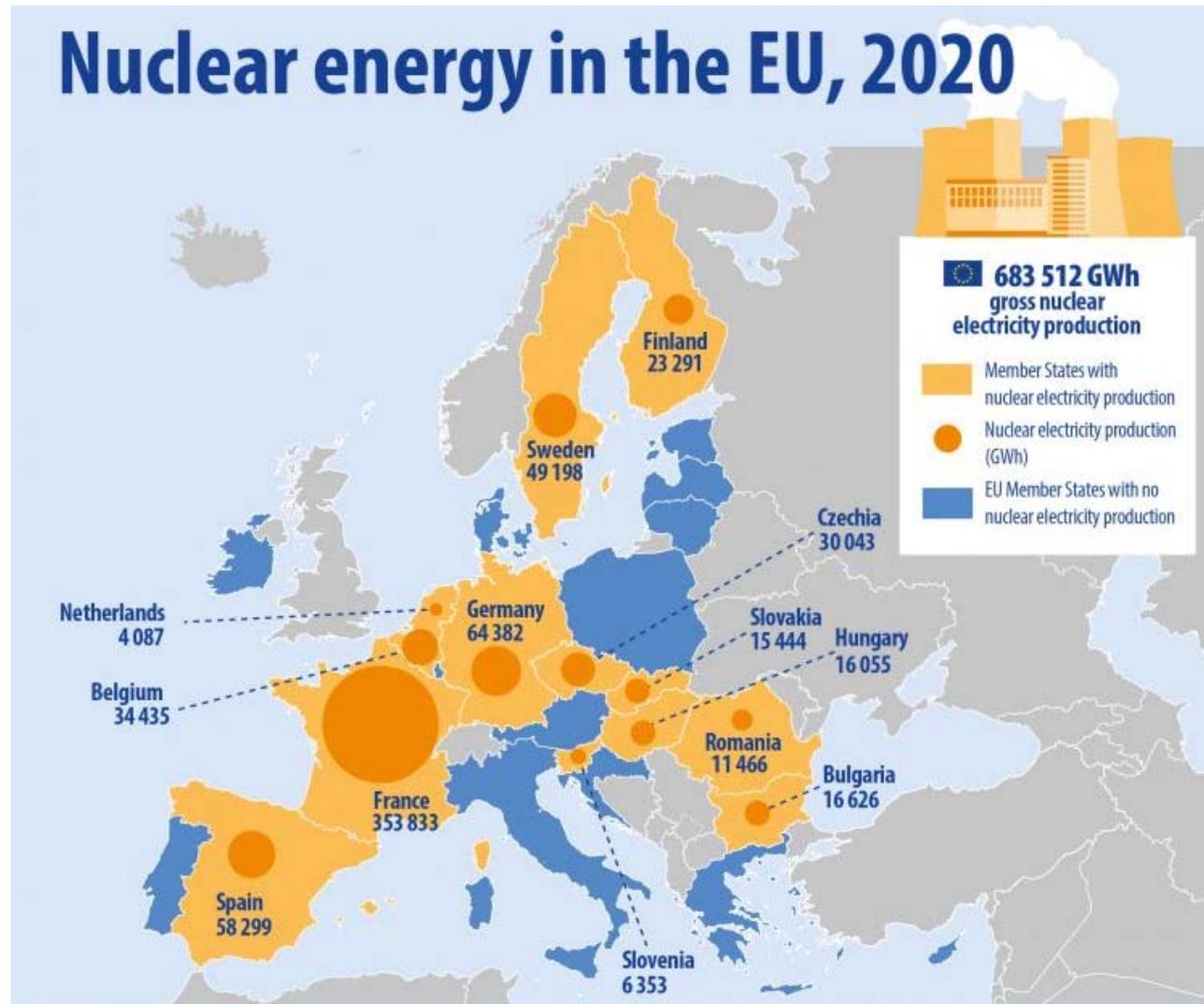
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022); Our World in Data based on Ember's Global Electricity Review (2022); Our World in Data based on Ember's European Electricity Review (2022)

Note: 'Other renewables' includes biomass, waste, geothermal and wave and tidal energy.

OurWorldInData.org/energy • CC BY



Puo esserci transizione energetica senza nucleare ?



14 EU Member States without nuclear electricity production:

Denmark, Estonia, Ireland, Greece, Croatia, Italy, Cyprus, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Austria, Poland, Portugal

Administrative boundaries: © EuroGeographics © UN-FAO © Turkstat
Cartography: Eurostat – IMAGE, 1/2022

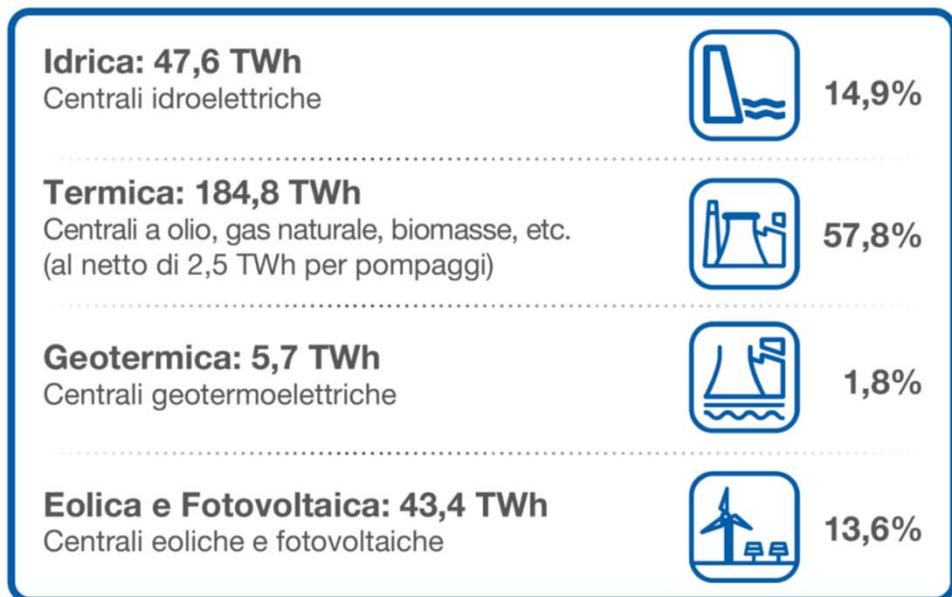
ec.europa.eu/eurostat



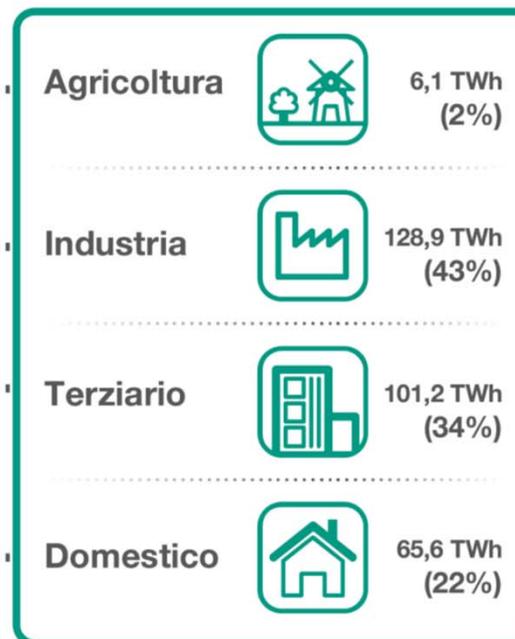
Bilancio elettrico 2019 italiano

Source: TERNA

Produzione netta



Consumi



MWh	Francia	Svizzera	Austria	Slovenia	Altri	Totale
IMPORT	15.244	22.194	1.229	5.193	115	43.975
EXPORT	948	981	2	245	3.658	5.834

7-9%

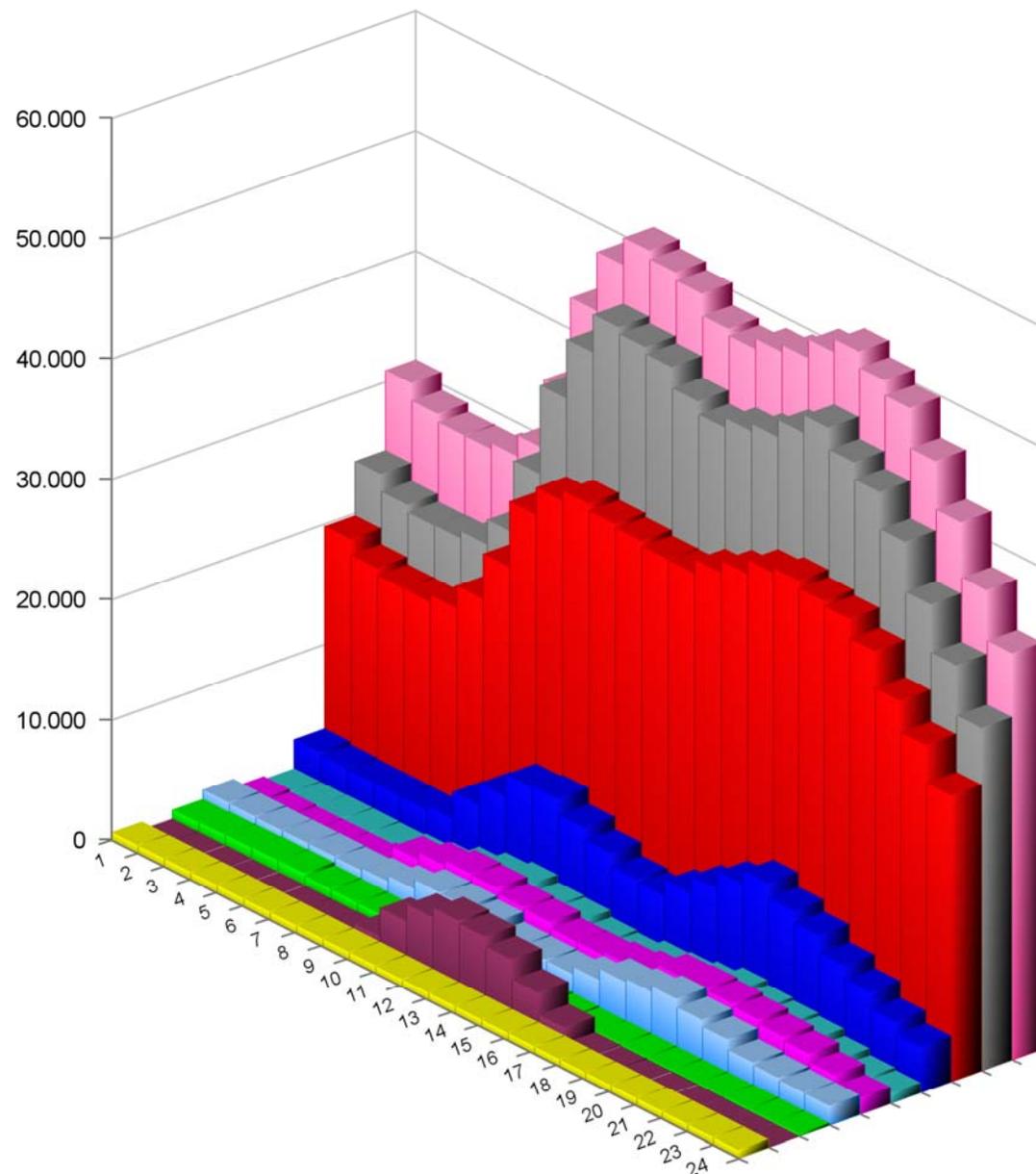
DOMANDA: 319,6 TWh



Obiettivo: massimizzare le rinnovabili

Source: https://download.terna.it/terna/4-CARICHI_8d9cecef1b7dcb5.pdf

Potenza oraria relativa al consumo interno lordo di energia elettrica in Italia nel 3° mercoledì del mese di dicembre 2020 divisa per 'fonti'



What's new?

- Generation IV
- Small and Medium (Modular) Reactors - SMR
- Mini (or Very small) Reactors
- Fusione Nucleare



Diverse taglie di impianti nuclearari



LARGE, CONVENTIONAL REACTOR
700+ MW(e)



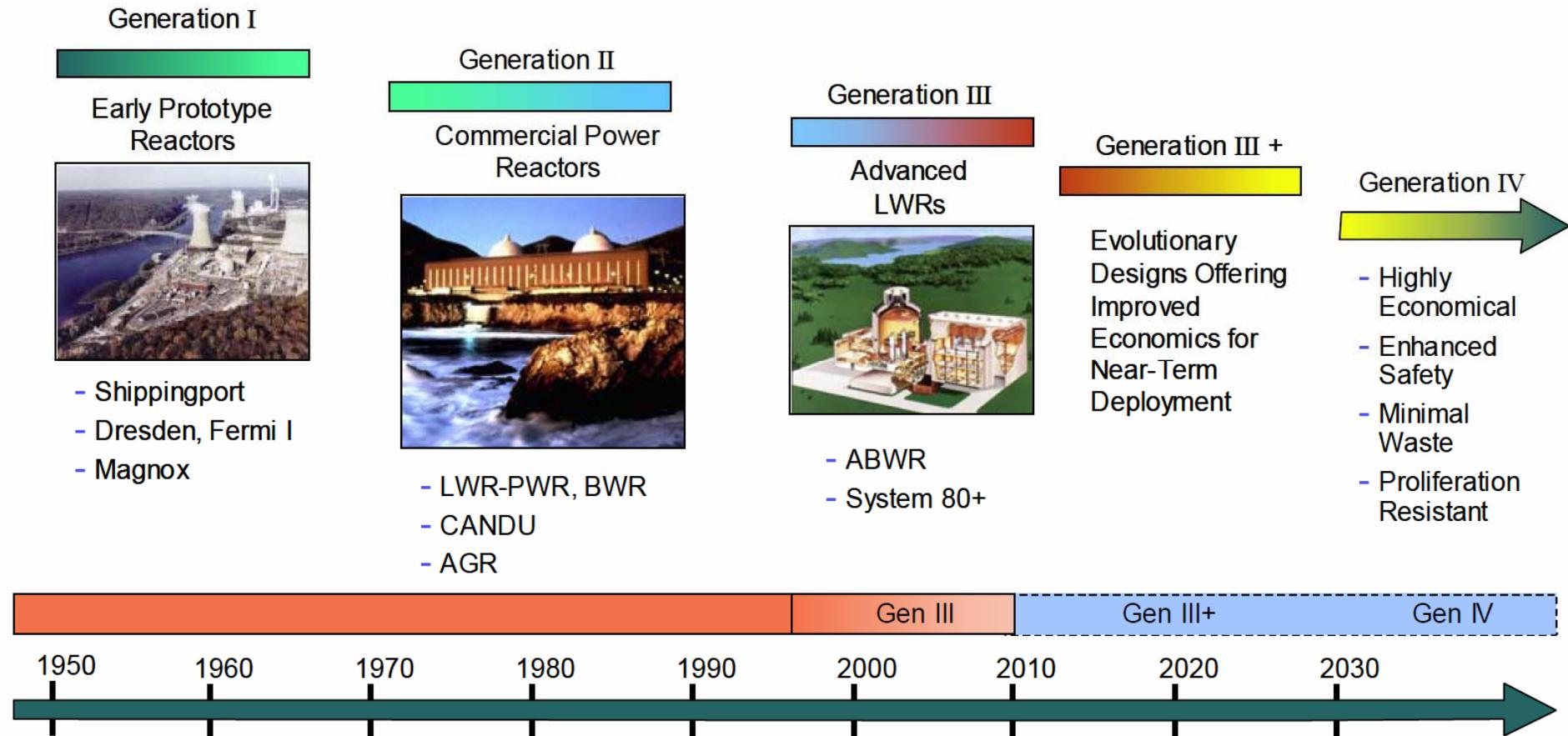
SMALL MODULAR REACTOR
Up to 300 MW(e)



MICROREACTOR
Up to ~10 MW(e)



Evoluzione della tecnologia nucleare per la produzione elettrica



Gli obiettivi della IV Generazione

- Al fine di rafforzare il ruolo futuro degli impianti nucleari di potenza, è stata definita una tabella di marcia per definire e pianificare le esigenze di R&S.
- Gli impegnativi obiettivi tecnologici per la quarta generazione sono definiti in quattro aree
 - **Sostenibilità dell'energia nucleare**
 - **Competitività dell'energia nucleare**
 - **Sicurezza e affidabilità**
 - **Resistenza alla proliferazione e protezione fisica**



Sustainable Nuclear Energy

I vantaggi del raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità sono:

- **Estendere l'approvvigionamento di combustibile nucleare** ai secoli futuri riciclando il combustibile esaurito per recuperare il suo contenuto energetico e convertendo ^{238}U in nuovo materiale fissile;
- **Impatto positivo sull'ambiente** attraverso la sostituzione di fonti energetiche e di trasporto inquinanti mediante la produzione di elettricità e idrogeno prodotto dal nucleare;
- **Ridurre la capacità e la complessità dei depositi geologici** tramite una sostanziale riduzione della quantità di rifiuti e del loro calore di decadimento, oltre alla durata e tossicità dei rifiuti radioattivi residui.



Competitive Nuclear Energy

I vantaggi del raggiungimento degli obiettivi economici includono:

- **Ridurre i costi di produzione** di energia attraverso una serie di progressi innovativi nell'efficienza degli impianti e del ciclo del combustibile, semplificazioni di progettazione e dimensioni degli impianti
- **Ridurre il rischio economico** per i progetti nucleari attraverso lo sviluppo di impianti costruiti utilizzando tecniche innovative di fabbricazione e costruzione e possibilmente progetti modulari
- **Consentire la produzione distribuita** di idrogeno, acqua dolce, teleriscaldamento e altri prodotti energetici da produrre dove sono necessari.



Safe and Reliable Systems

Gli obiettivi di sicurezza e affidabilità considerano in generale un funzionamento sicuro e affidabile, una migliore gestione degli incidenti e la minimizzazione delle conseguenze, la protezione degli investimenti e la ridotta necessità di risposta alle emergenze esternamente all'impianto.

Guardando al futuro, il vantaggio di raggiungere questi obiettivi include:

- **Incrementare l'adozione di caratteristiche di sicurezza intrinseche**, progetti «robusti» e caratteristiche di sicurezza trasparenti che possono essere comprese dai non esperti
- **Conquistare e rafforzare la fiducia del pubblico** sulla sicurezza dell'energia nucleare.



Proliferation Resistance and Physical Protection

I vantaggi del raggiungimento di questi obiettivi includono:

- **Fornire una continua ed efficace resistenza alla proliferazione** dei sistemi di energia nucleare attraverso caratteristiche di progettazione migliorate e altre misure;
- **Aumentare la protezione fisica** contro il terrorismo aumentando la robustezza delle nuove strutture.



Bibliografia essenziale

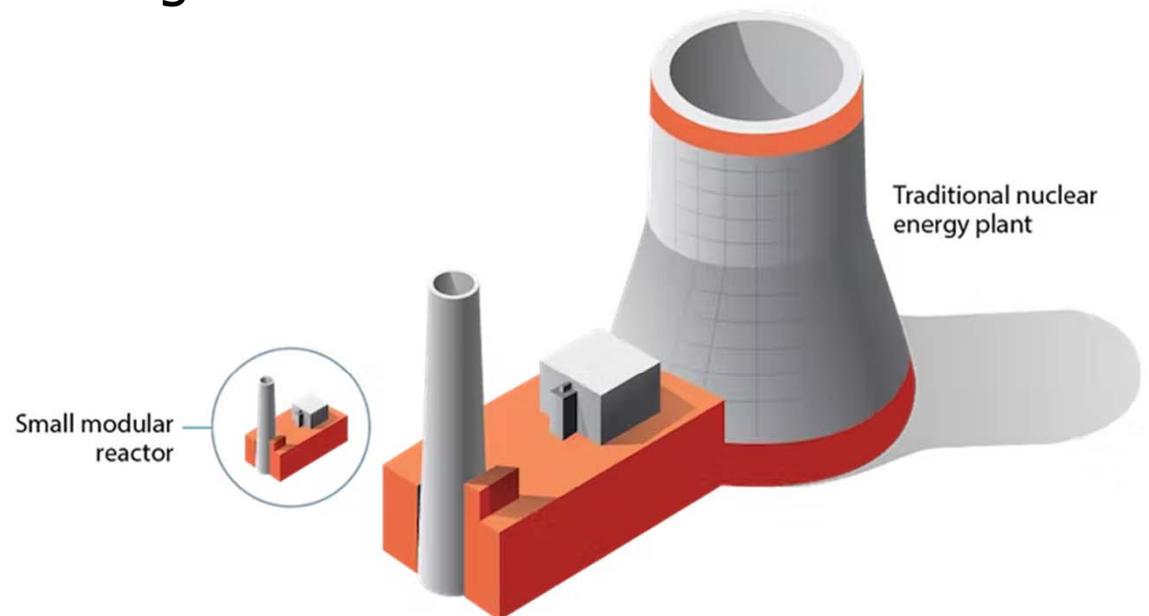


https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_44720/annual-reports



I piccoli reattori (modulari) SMR

- Un piccolo reattore modulare (SMR) è un reattore a fissione nucleare che presenta moduli costruiti e assemblati in fabbrica in una varietà di configurazioni e potenze elettriche.
- Sono reattori nucleari avanzati che hanno una capacità di **potenza fino a 300 MWe** per unità, che è circa un terzo/un quarto della capacità di generazione dei reattori nucleari tradizionali.
- Gli SMR presentano design compatti e semplificati con caratteristiche di sicurezza avanzate.



I piccoli reattori (modulari) SMR - vantaggi

- **Piccola potenza e architettura compatta e impiego di concetti passivi.** Pertanto, si fa meno affidamento sui sistemi di sicurezza attiva e sulle pompe aggiuntive, nonché sull'alimentazione elettrica per la mitigazione degli incidenti.
- Il design compatto consente la **modularità della fabbricazione** (in officina), e può anche facilitare l'implementazione di standard di qualità più elevati.
- La minore potenza porta alla **riduzione del termine sorgente** e a un **inventario radioattivo inferiore.**



I piccoli reattori (modulari)

SMR - vantaggi

- Possibile la localizzazione **sotterranea** o **subacquea** del reattore, con una maggiore protezione dai pericoli naturali (ad esempio sismici o tsunami a seconda della posizione) o causati dall'uomo (ad esempio l'impatto aereo).
- Il design modulare e le dimensioni ridotte consentono di avere **più unità sullo stesso sito**.
- **Minore richiesta di acqua** di raffreddamento, quindi soluzione adatta per regioni remote e per applicazioni specifiche come l'estrazione mineraria o la desalinizzazione.
- Possibilità di **rimuovere il modulo del reattore** o la disattivazione in situ alla fine del ciclo di vita.



I piccoli reattori (modulari) SMR - problemi

- Quadro normativo e autorizzativo (licensing)
- Standardizzazione
- Gestione dei rifiuti radioattivi
- Disponibilità finanziarie
- Disponibilità di personale qualificato e addestrato



SMR - Stato dell'arte

- Più di **80 progetti di SMR** commerciali sono stati sviluppati in tutto il mondo di diverse taglie e per diverse applicazioni, come elettricità, sistemi energetici ibridi, riscaldamento, desalinizzazione dell'acqua e vapore per applicazioni industriali.
- Sebbene gli SMR abbiano un **costo iniziale del capitale inferiore** per unità, la loro **competitività economica deve ancora essere dimostrata** nella pratica una volta implementati.
- Mentre si prevede che una più ampia diffusione di SMR inizierà in questo decennio, **due unità di reattori KLT-40S da 32 MW ciascuno sono già in funzione in Russia a bordo dell'Akademik Lomonosov**, una centrale nucleare galleggiante.
- Altri **due SMR in Argentina e Cina dovrebbero iniziare a operare entro i prossimi tre anni**.
- Il Canada inoltre ha avviato un intenso programma di review di diversi progetti con l'obiettivo di iniziarne la costruzione entro pochi anni.



Mini (Micro) reattori

- Una delle sfide per accelerare l'accesso all'energia è l'infrastruttura (copertura limitata della rete in alcune zone) e i costi di connessione alla rete per l'elettrificazione di zone rurali.
- Una singola centrale elettrica non dovrebbe rappresentare più del 10% della capacità totale installata della rete. Nelle aree prive di sufficienti linee di trasmissione e capacità di rete, gli SMR possono essere installati in una rete esistente o remotamente fuori rete, in funzione della sua minore potenza elettrica, fornendo energia a basse emissioni di carbonio per l'industria e la popolazione.
- Ciò è particolarmente rilevante per i microreattori, che sono un sottoinsieme di SMR progettati per generare energia elettrica in genere **fino a 10 MWe**.
- I microreattori hanno un ingombro inferiore rispetto ad altri SMR e saranno più adatti per le regioni inaccessibili a un'energia pulita, affidabile e conveniente.



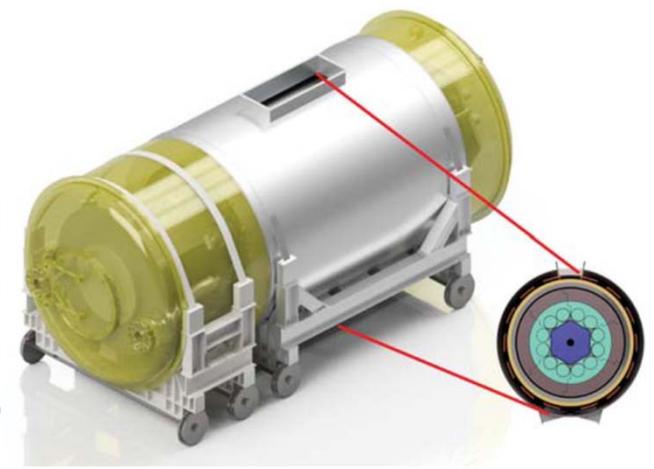
Mini (Micro) reattori

- **Trasportabile:** i progetti di unità più piccole renderanno i microreattori facilmente trasportabili.
- Ciò renderebbe più facile per i venditori spedire l'intero reattore su **camion, nave, aereo o automotrice.**
- Alcuni esempi di microreattori in avanzato stato di sviluppo sono:



U-battery, del consorzio URENCO, un reattore di potenza 10 MWt/4 MWe, 1.8 m di diametro, può essere restituito alla fabbrica per il rifornimento del combustibile.

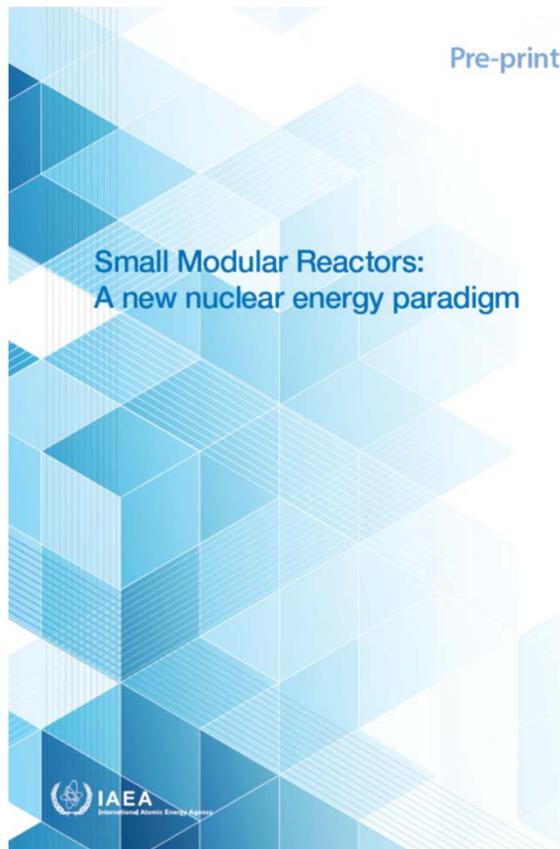
eVinci, progettato dalla Westinghouse. Fornisce calore ed energia combinati – 5 MWe e fino a 13MWt, oltre 8 anni di funzionamento a piena potenza prima del rifornimento di combustibile. Target di installazione in loco inferiore a 30 giorni.



Bibliografia essenziale

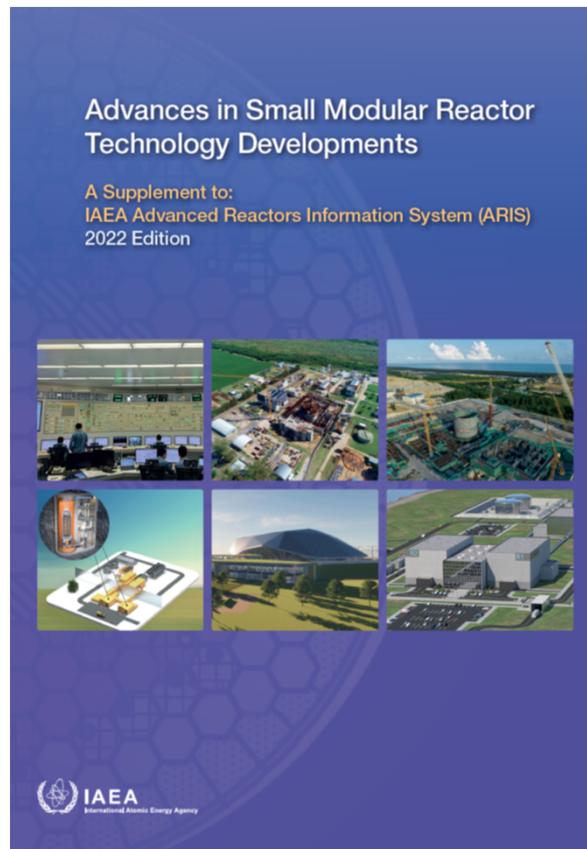


<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>



Pre-print

Small Modular Reactors:
A new nuclear energy paradigm



Advances in Small Modular Reactor
Technology Developments

A Supplement to:
IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)
2022 Edition

https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2022.pdf

<https://aris.iaea.org/sites/overview.html>



**Grazie per
l'attenzione**

