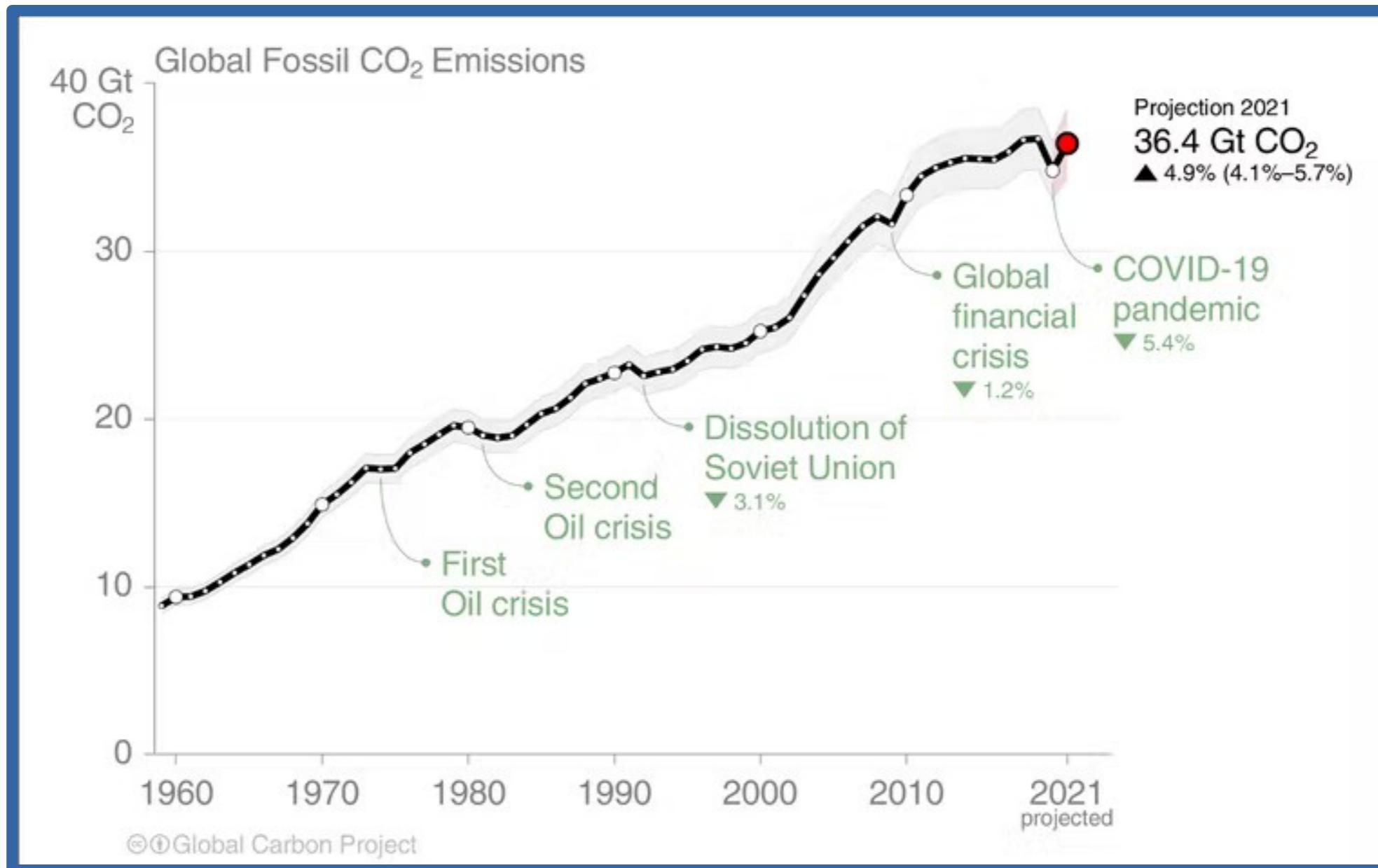


LE POTENZIALITÀ DELLA FONTE NUCLEARE NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

Enrico Brandmayr, PhD

Comitato Nucleare e Ragione

LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI...CHE VERRÀ



Nel 2022 le emissioni hanno raggiunto il record di 37 Gt...

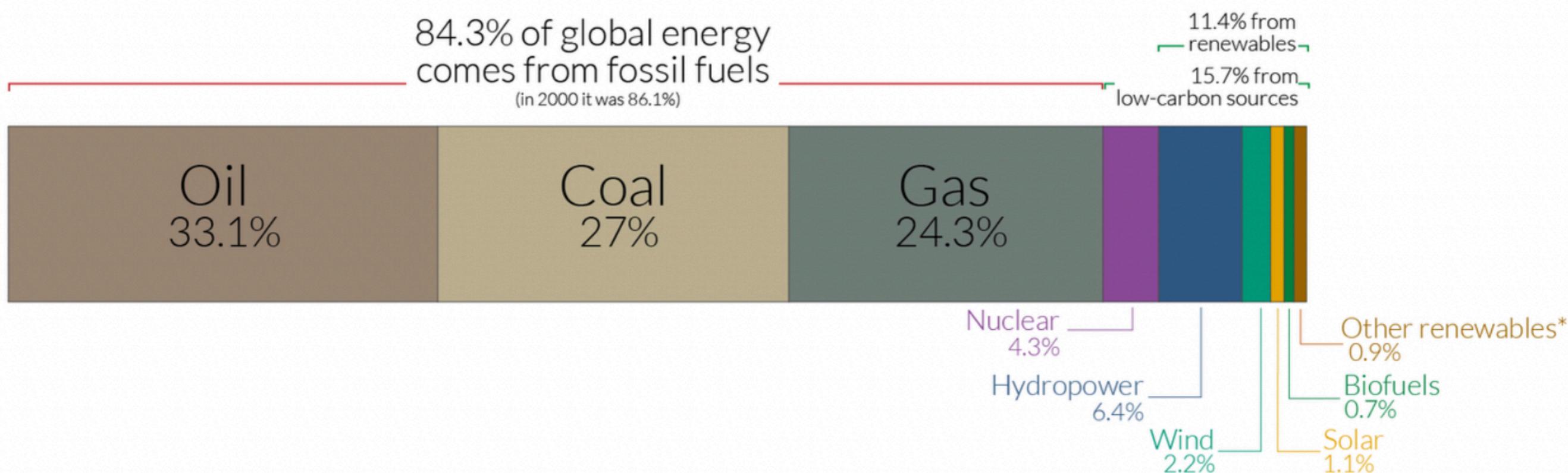
Il 73% delle emissioni climalteranti proviene dalla produzione di energia

CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA PER FONTE

Our World
in Data

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.



*'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](https://ourworldindata.org) – Research and data to make progress against the world’s largest problems.

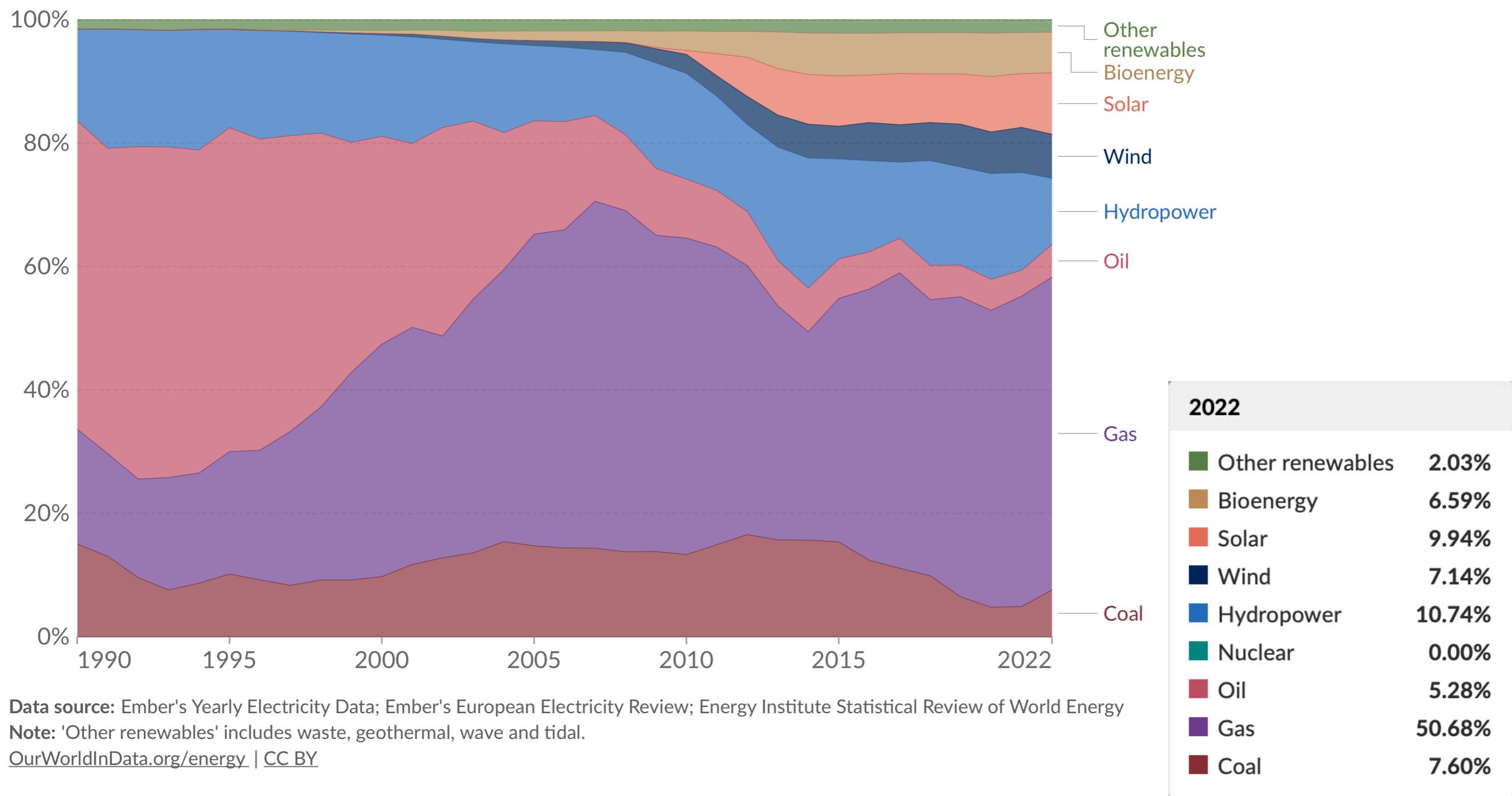
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

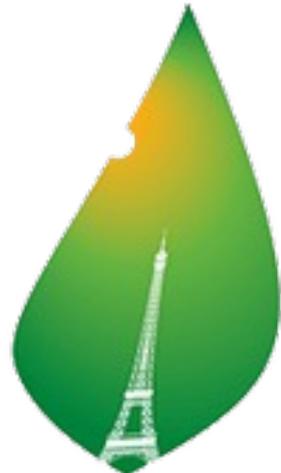
ITALIA - PRODUZIONE DI ELETTRICITÀ PER FONTE

Electricity production by source, Italy

Our World
in Data



PUNTI CHIAVE DELLA POLITICA CLIMATICA



PARIS2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
COP21·CMP11



A European Green Deal

Striving to be the first climate-neutral continent

- Limitare l'aumento globale della temperatura al 20100 entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. (Oggi siamo a +1,2°C)

- Raggiungimento della neutralità climatica (Net-zero-emissions) al 2050



- Include il nucleare tra le fonti sostenibili:
 1. Costruzione di nuove centrali con le migliori tecnologie
 2. Prolungamento della vita utile delle centrali esistenti
 3. Ricerca e sviluppo

I RISCHI DELL'ELETTRIFICAZIONE

Table 1.1 ▷ Primary risks associated with key clean electrification technologies

	Wind	Solar PV	Nuclear	Battery storage	Demand response	Grids	Electric vehicles	Heat pumps
Regulatory and policy risks								
Regulatory frameworks	Medium	Low	Medium	Medium	High	Medium	Medium	Medium
Policy support	Low	Low	Medium	Low	High	Low	Low	Low
Permitting and certification	Medium	Medium	High	Low	Low	High	Medium	Low
Supply chain risks								
Critical minerals	High	Medium	Low	High	Low	Medium	High	Low
Manufacturing	High	Low	Medium	Medium	Low	Low	Low	Medium
Skilled labour	Medium	Medium	High	Low	Low	High	Low	Medium
Financial risks								
Costs of financing	High	Medium	High	Medium	Low	High	Medium	Medium
Revenue and savings predictability	Medium	Low	Low	Medium	Medium	Low	Low	Low
Overall risks	High	Low	Medium	Medium	Medium	High	Low	Medium

IL NUCLEARE NEL MONDO

CURRENT STATUS

412 NUCLEAR POWER REACTORS IN OPERATION

370 170 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

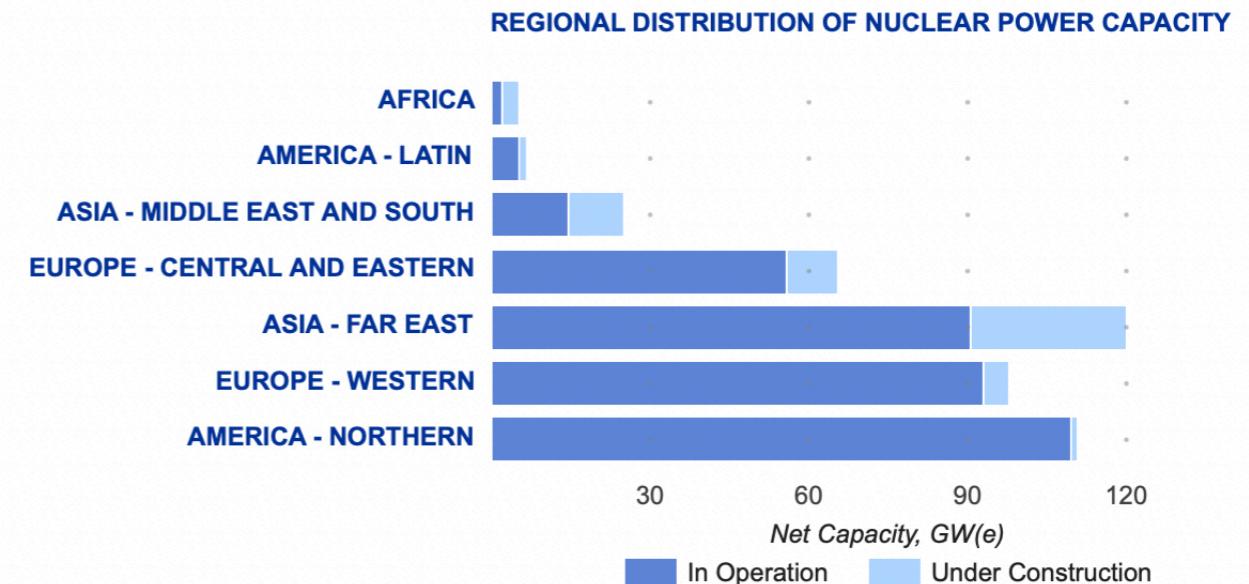
25 NUCLEAR POWER REACTORS IN SUSPENDED OPERATION

21 228 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

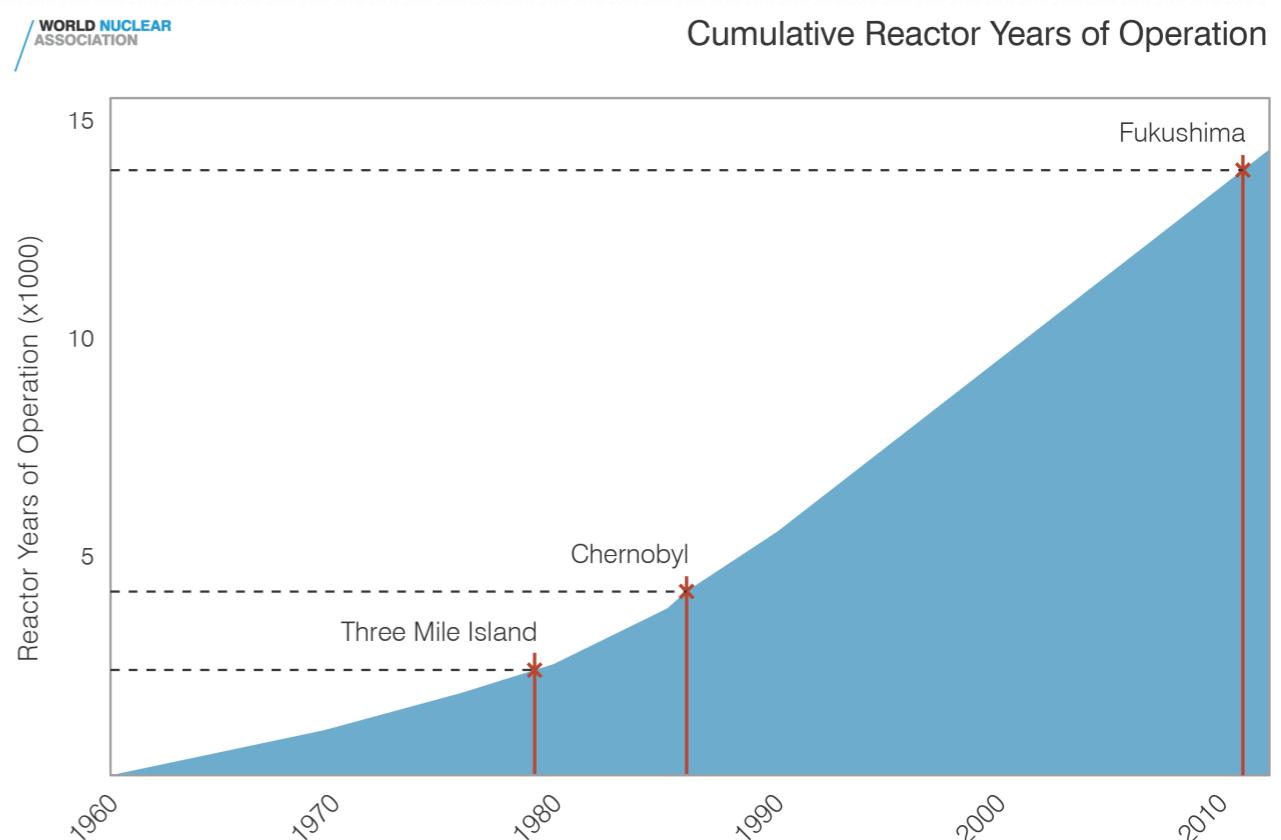
58 NUCLEAR POWER REACTORS UNDER CONSTRUCTION

60 207 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

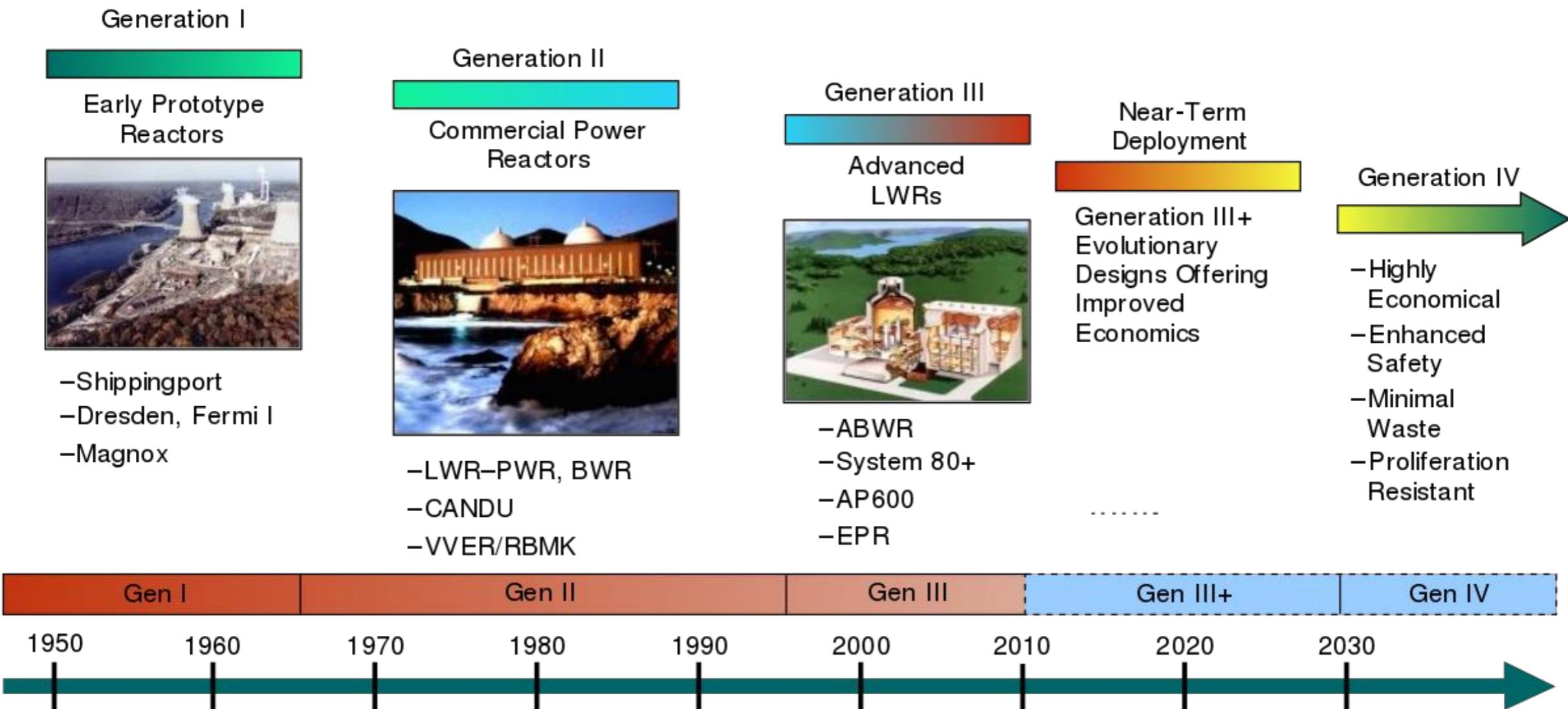
19 631 REACTOR-YEARS OF OPERATION



Circa il 10%
energia prodotta
ogni anno,
+0.3% nel 2022



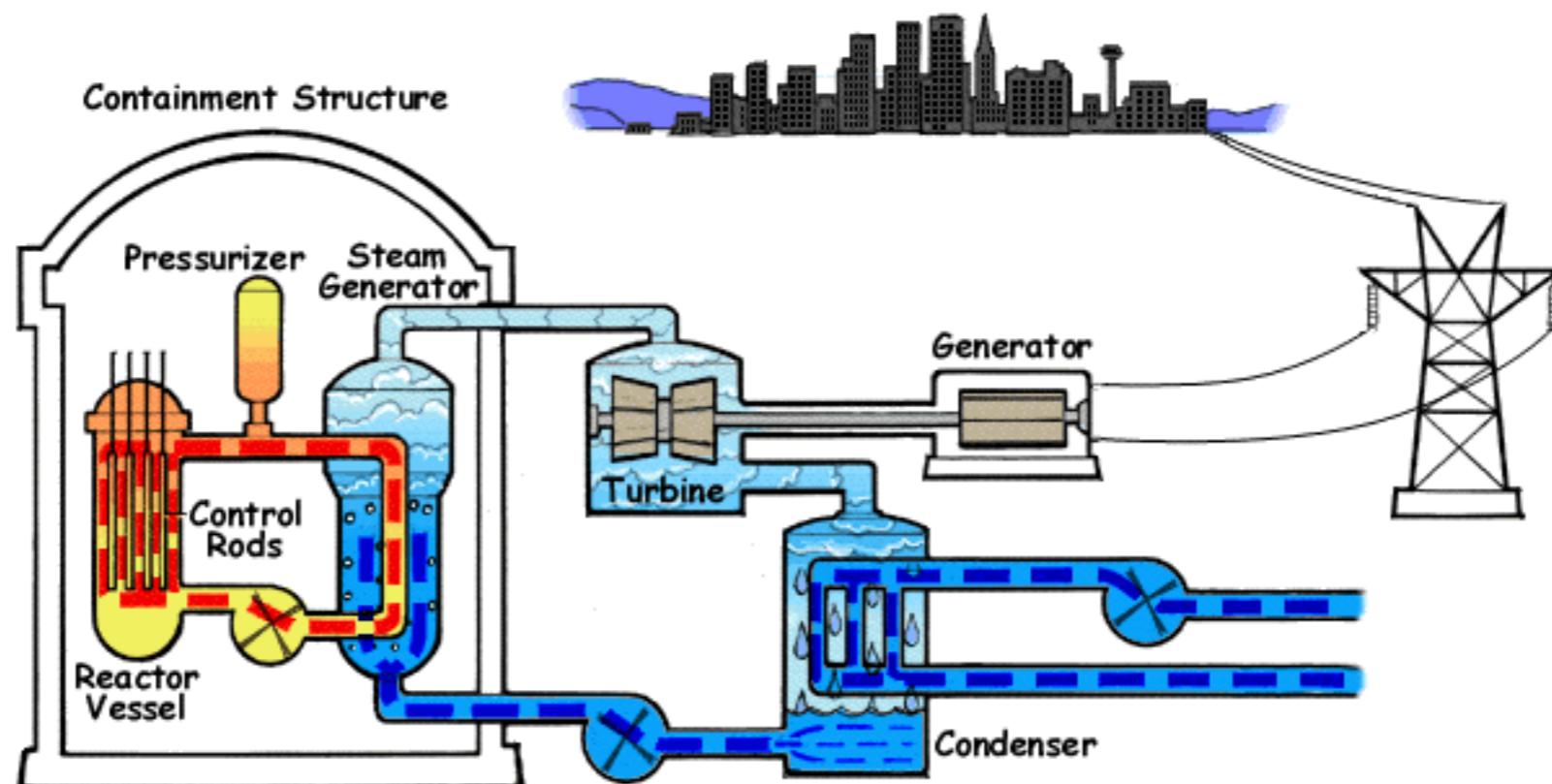
IL PROGRESSO DELLA TECNOLOGIA NUCLEARE



Source : GenIV International Forum

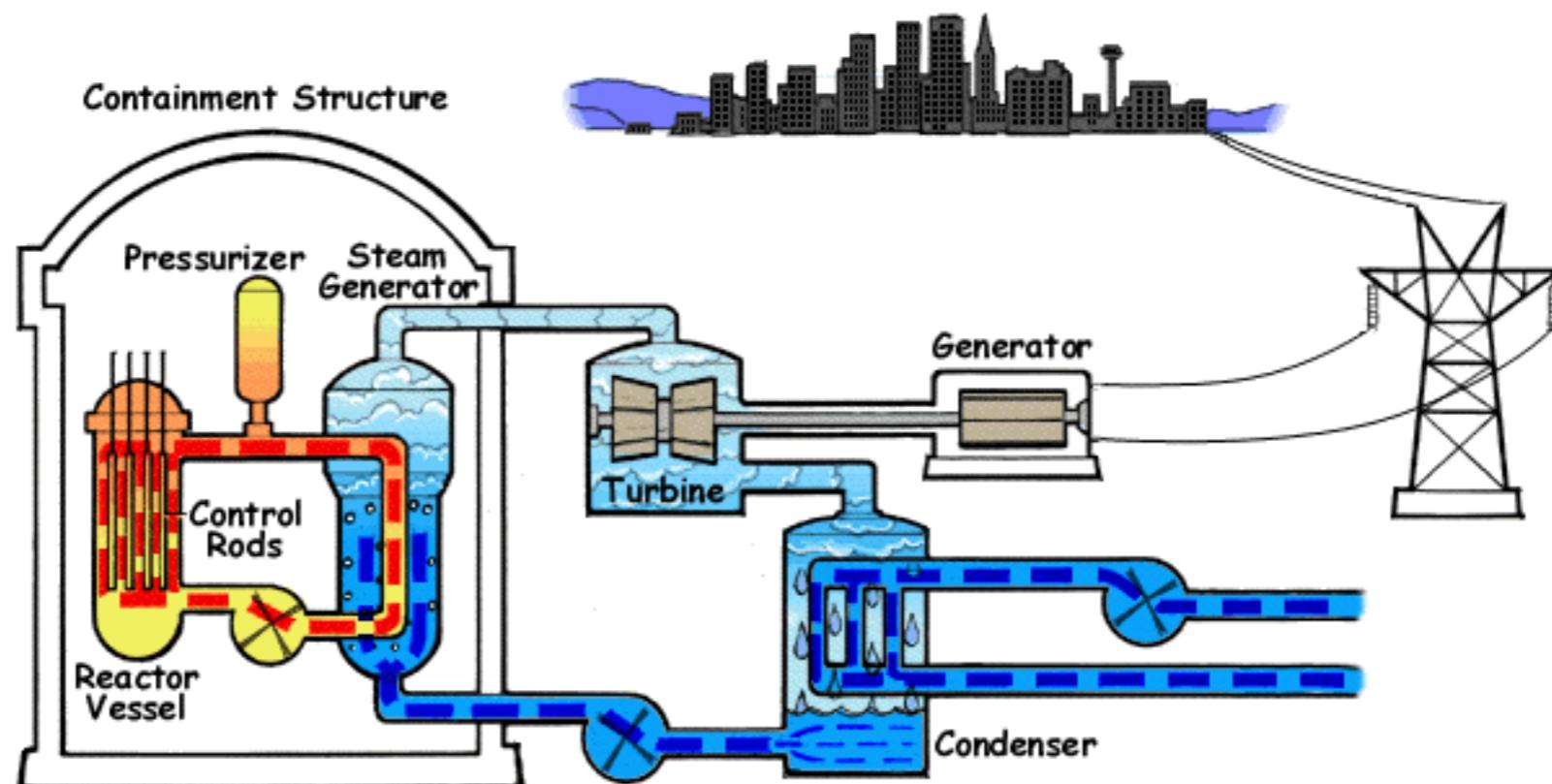
COME FUNZIONA UN REATTORE NUCLEARE

- IL PWR è ad oggi il reattore più diffuso al mondo
- Reazioni di fissione a catena producono calore nel circuito primario.
- Il calore è trasferito al generatore di vapore nel circuito secondario.
- Le turbine generano elettricità.
- Il calore in eccesso è scambiato con l'acqua o l'atmosfera.

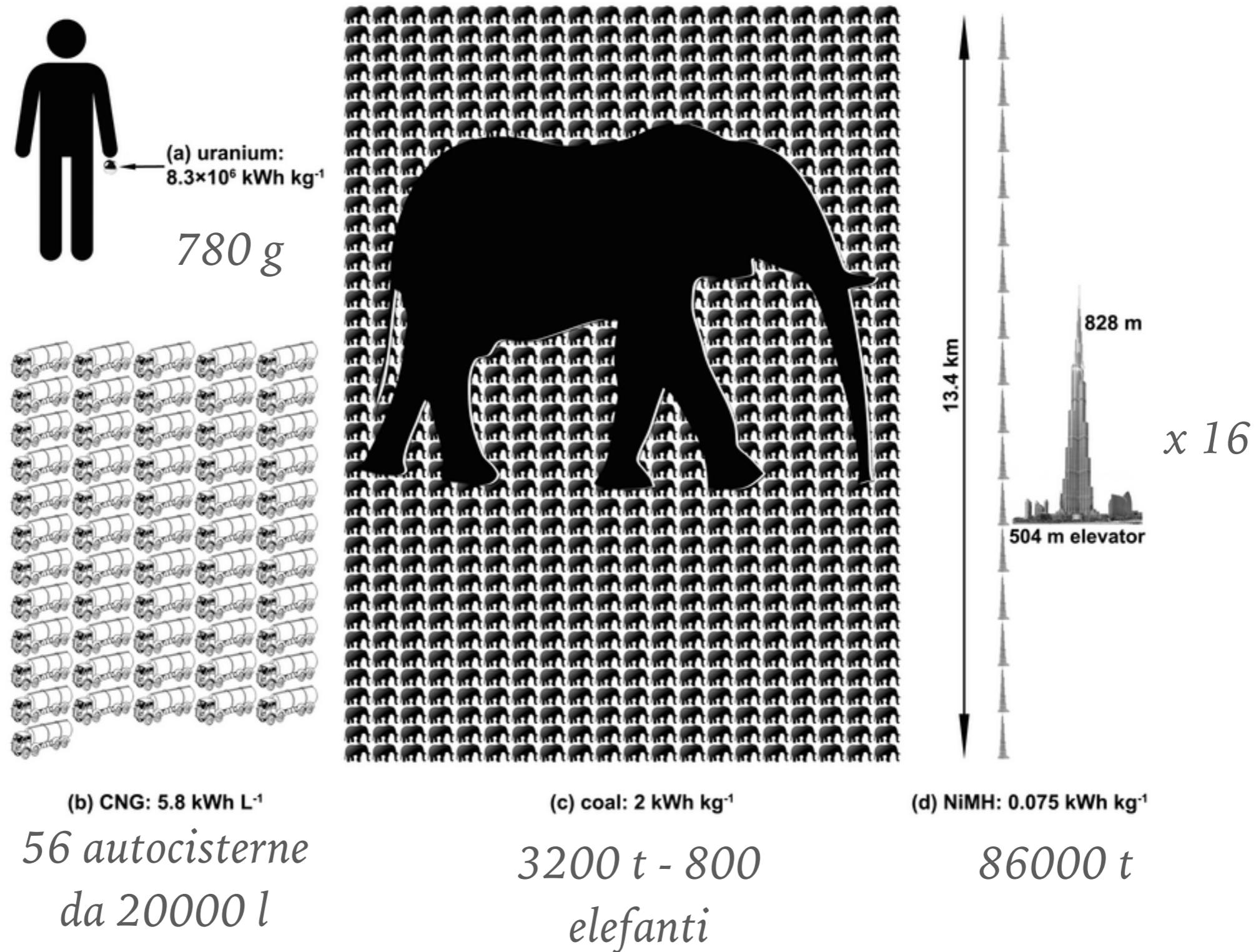


COME FUNZIONA UN REATTORE NUCLEARE

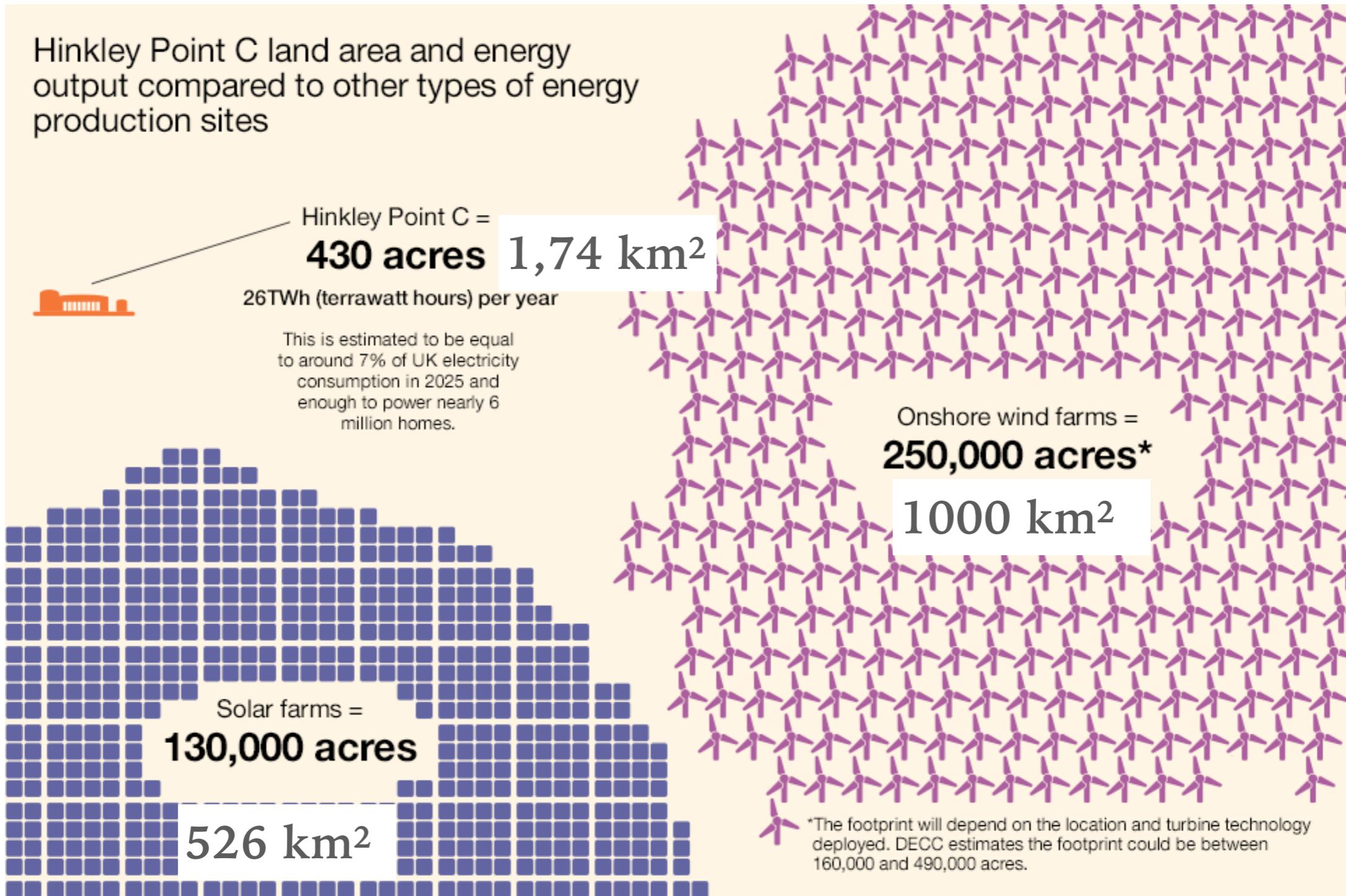
- IL PWR è ad oggi il reattore più diffuso al mondo
- Reazioni di fissione a catena producono calore nel circuito primario.
- Il calore è trasferito al generatore di vapore nel circuito secondario.
- Le turbine generano elettricità.
- Il calore in eccesso è scambiato con l'acqua o l'atmosfera.



LA DENSITÀ ENERGETICA - QUANDO LE DIMENSIONI CONTANO



CONSUMO DI SUOLO RIDOTTO



CONSUMO DI SUOLO RIDOTTO

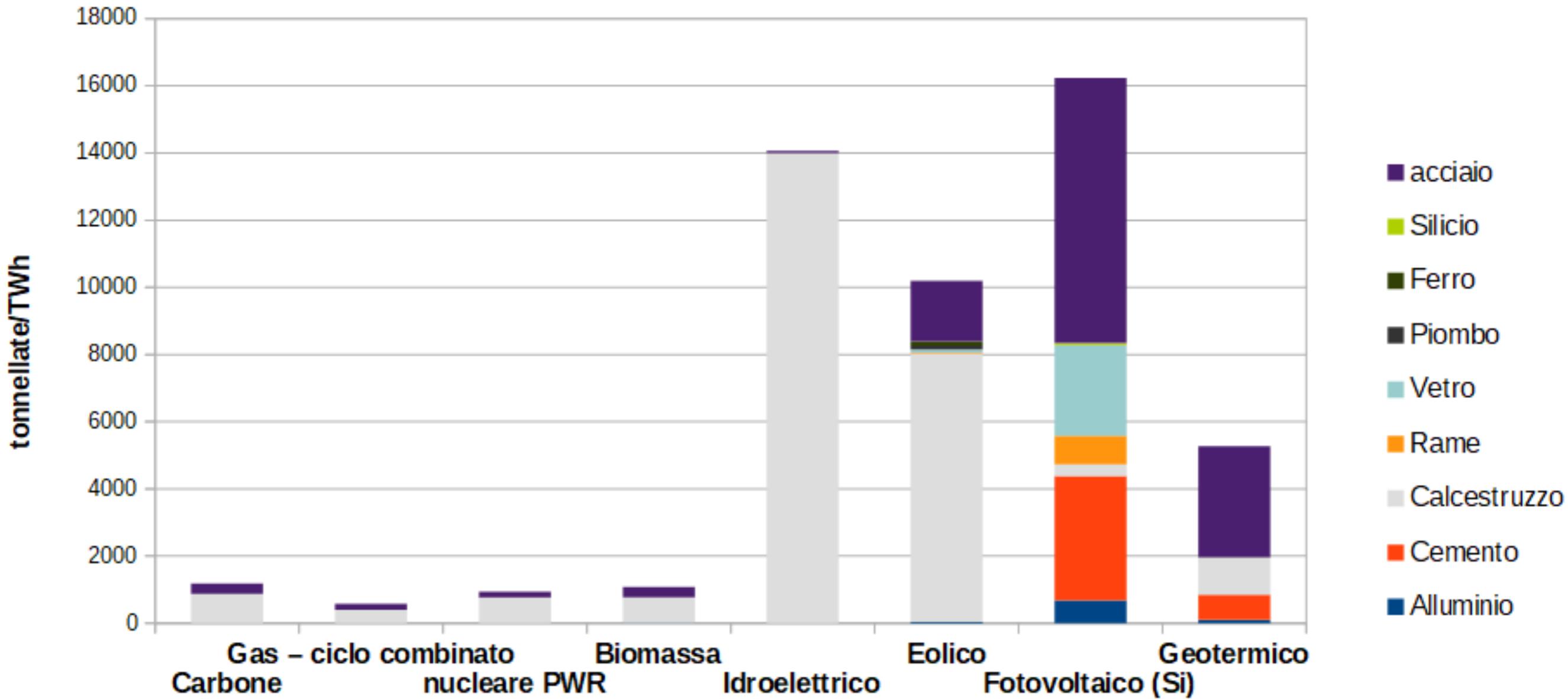


- *Impianto fotovoltaico di Troia (FG):*
150 ettari (1,5 km²) 103 MW di potenza
150 GWh all'anno di elettricità

- *Centrale nucleare di Gundremmingen (D), chiusa anzitempo:*
35 ettari (0,35 km²) 2.600 MW di potenza
20.000 GWh di elettricità all'anno

- *La centrale nucleare su 1/4 della superficie produceva 130 volte l'elettricità, fotovoltaico di Foggia.*

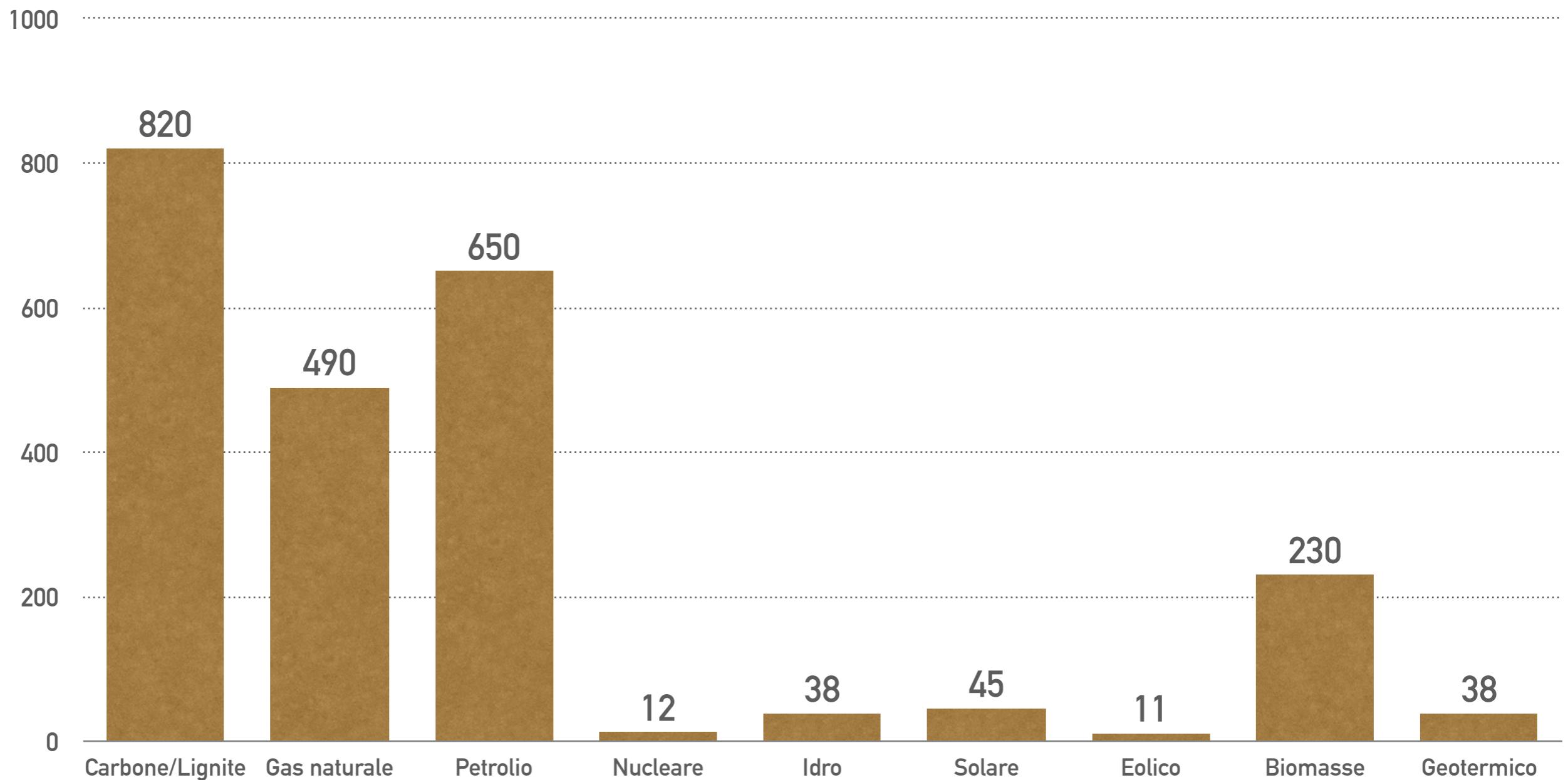
UTILIZZO DI RISORSE E MATERIALI RIDOTTO



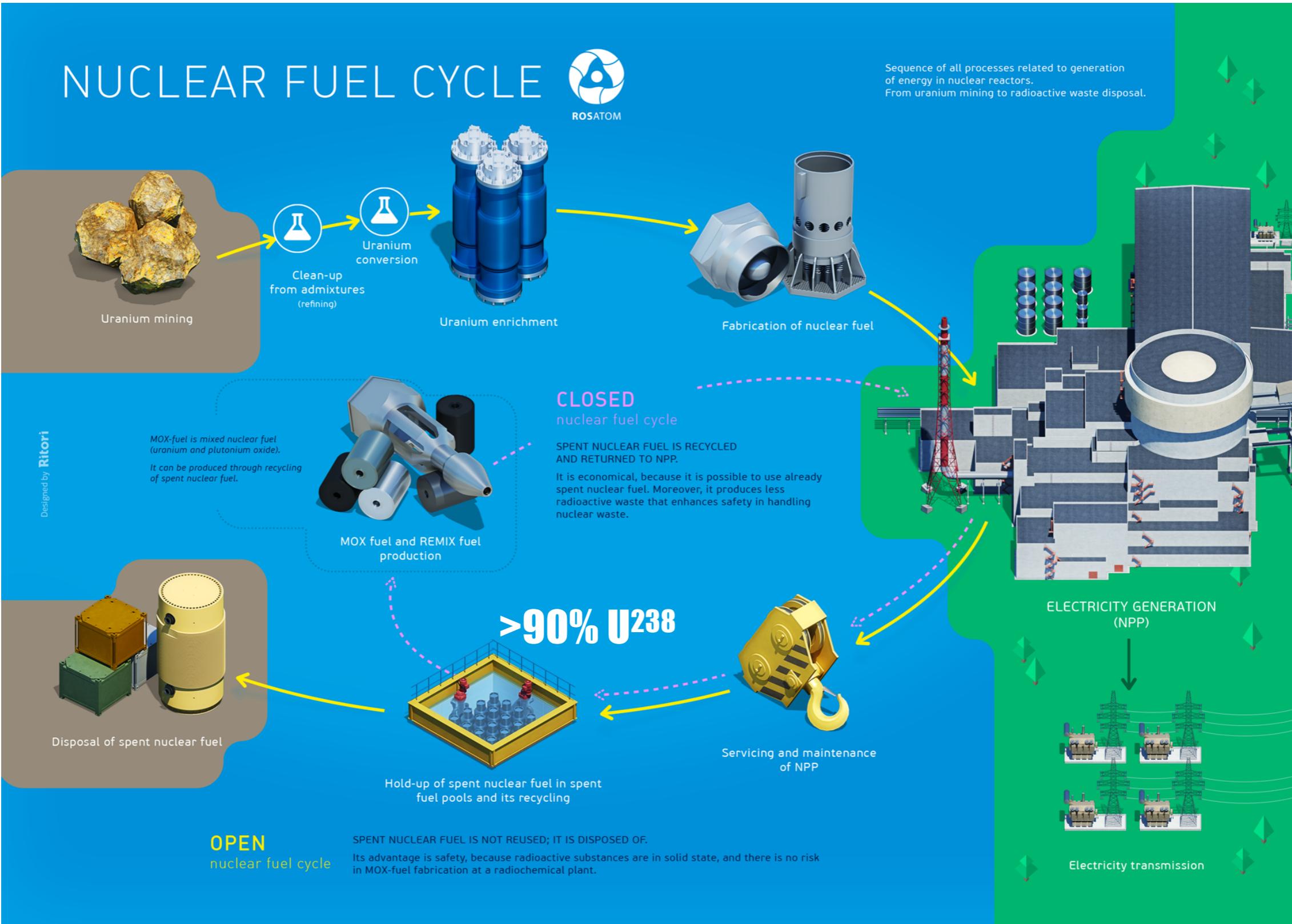
Elaborazione CNeR. Fonte: US Department of Energy, Quadriennal Technology Review, 2015

BASSE EMISSIONI SUL CICLO DI VITA

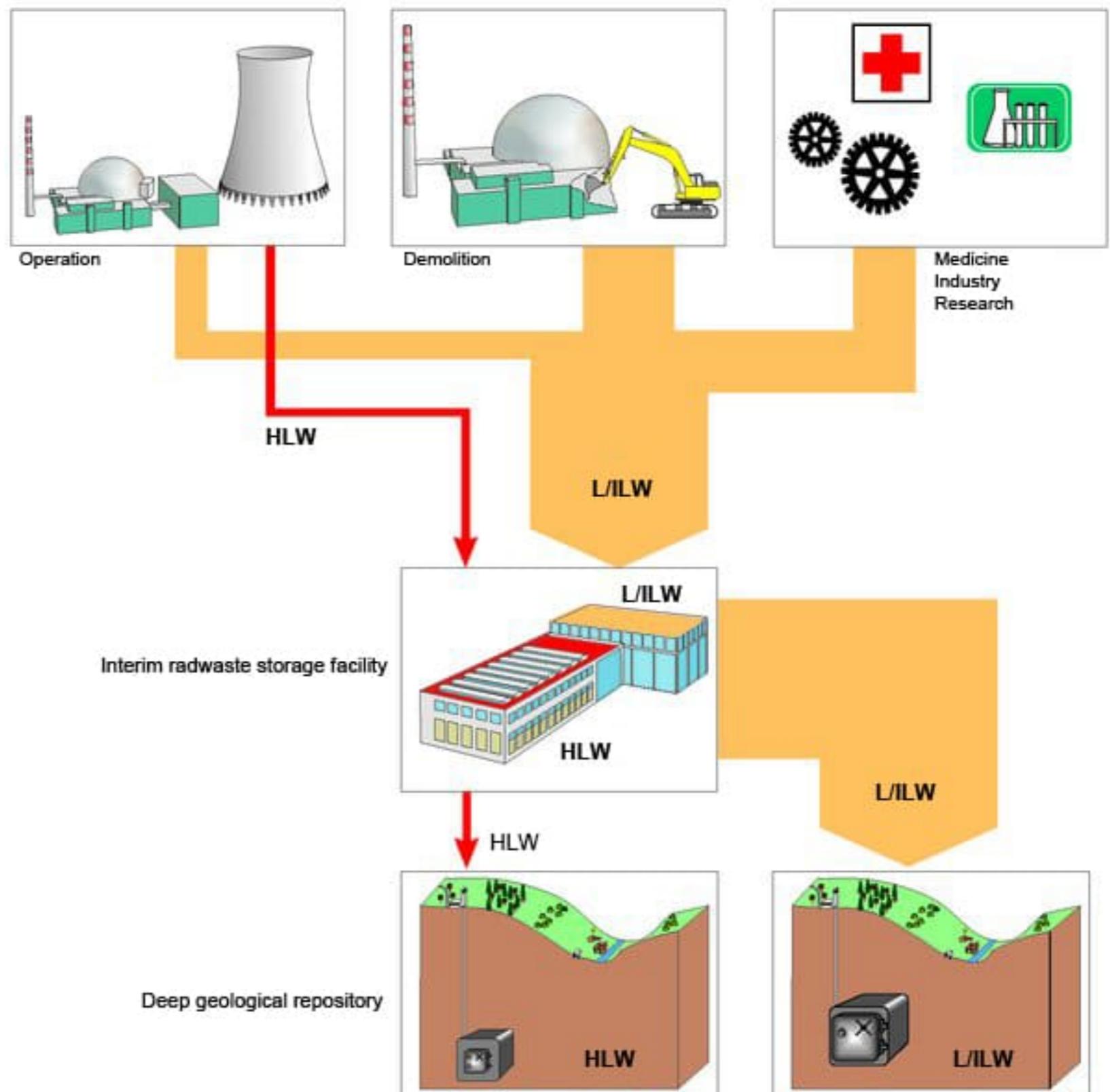
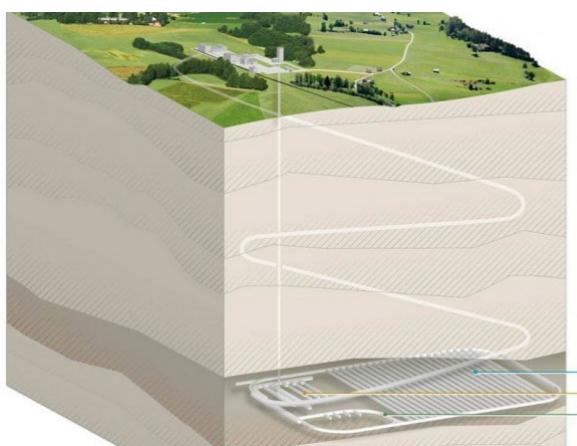
Impronta di carbonio delle fonti energetiche (gCO_{2eq}/kWh)



CICLO DEL COMBUSTIBILE VIRTUOSO E SOSTENIBILE



IL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI NUCLEARI

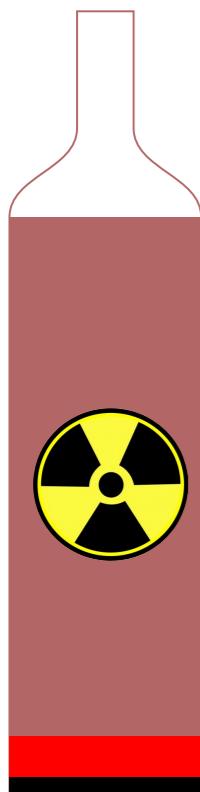


Fonte: <https://www.ensi.ch/en/waste-disposal/>

RIFIUTI NUCLEARI - QUANTI NE PRODUCIAMO?



Produzione nucleare: 2.6 kWh/g per persona



low-level waste: 760 ml

intermediate waste: 60 ml
high-level waste: 25 ml

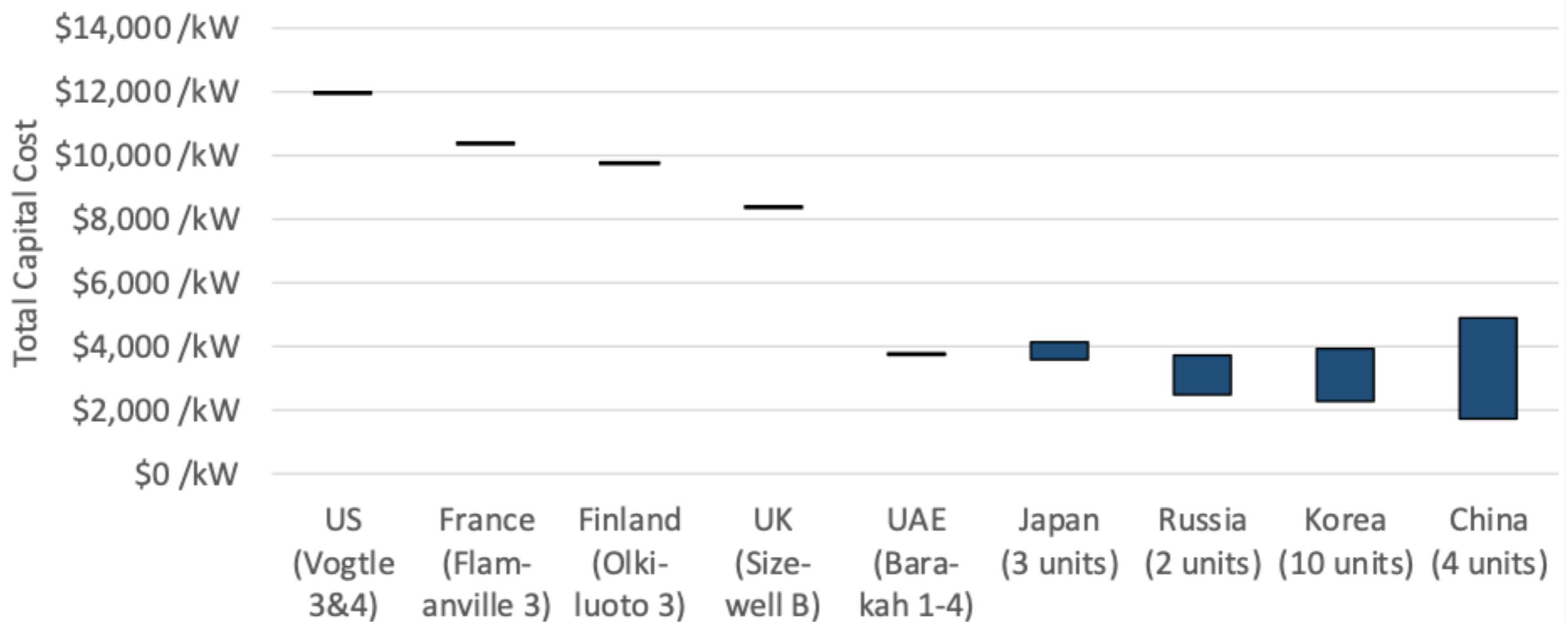


83 kg

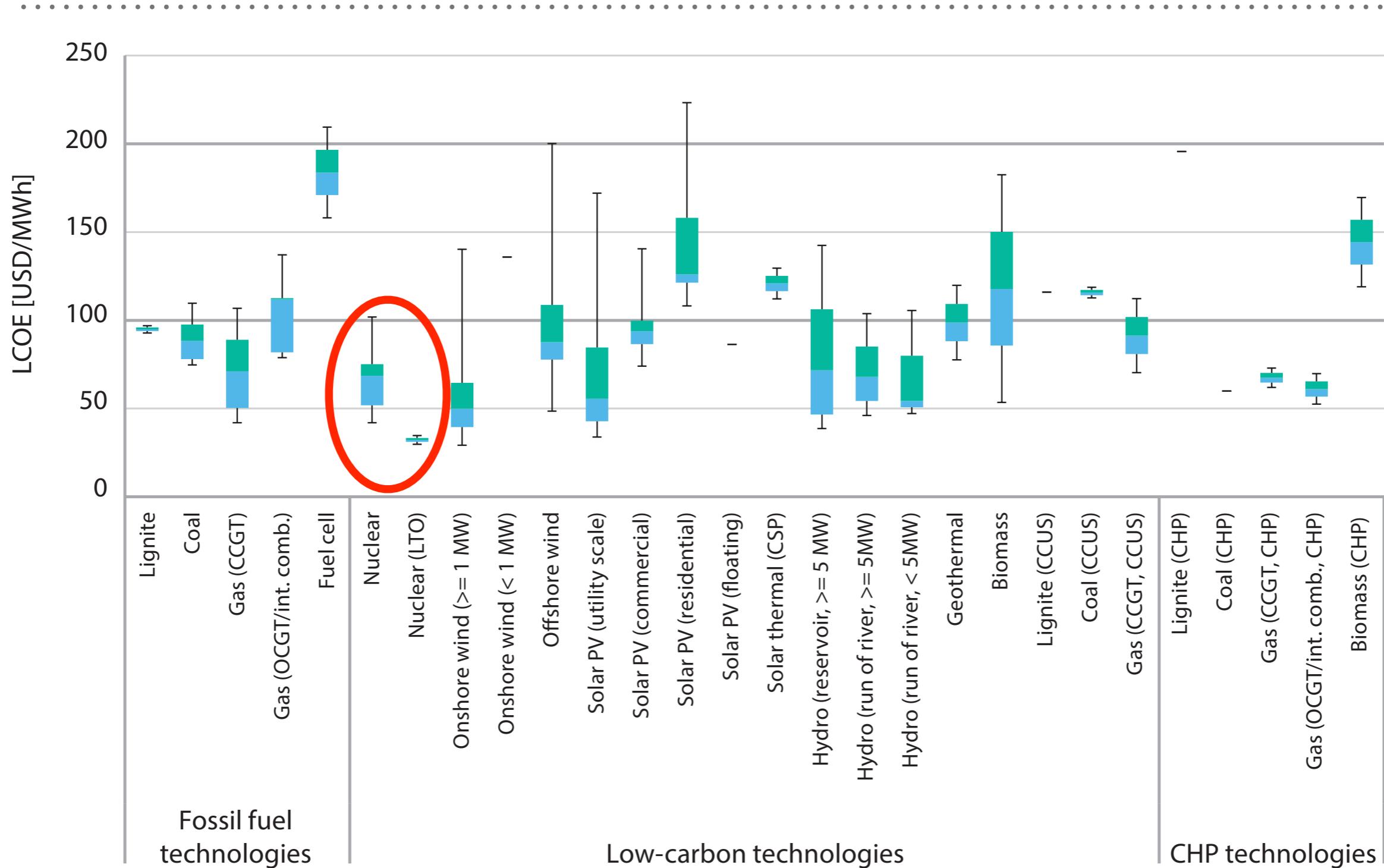


517 kg

I COSTI DEL NUCLEARE - COSTO CAPITALE



I COSTI DEL NUCLEARE - LCOE



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.

Source: IEA - NEA 2020

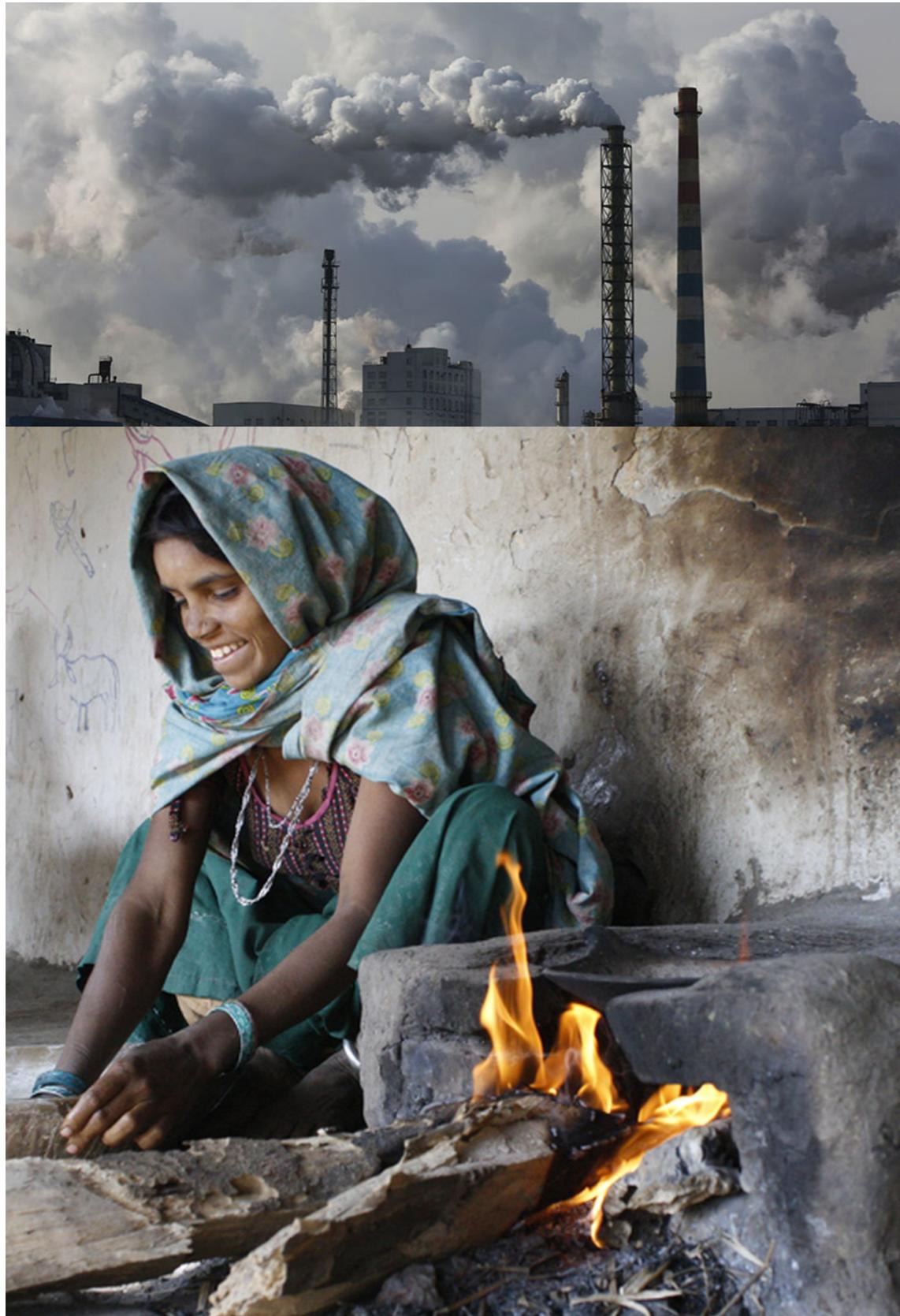
ALTRI PREGI DELLA FONTE NUCLEARE

- **Affidabile.** Elevato fattore di capacità.

Nucleare 90% - Eolico 35% - Fotovoltaico 25%

- **Fonte programmabile.** **Stabilizza** la rete.
- **Resiliente agli eventi meteo estremi.**
- **Autonomia:** mesi con un carico di combustibile.
- **Versatilità.** Produce **elettricità, calore e propulsione.**
- **Bassa volatilità.** I costi non risentono dell'instabilità geopolitica e finanziaria.
- Economicamente **competitiva**, malgrado gli alti costi di investimento.

QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



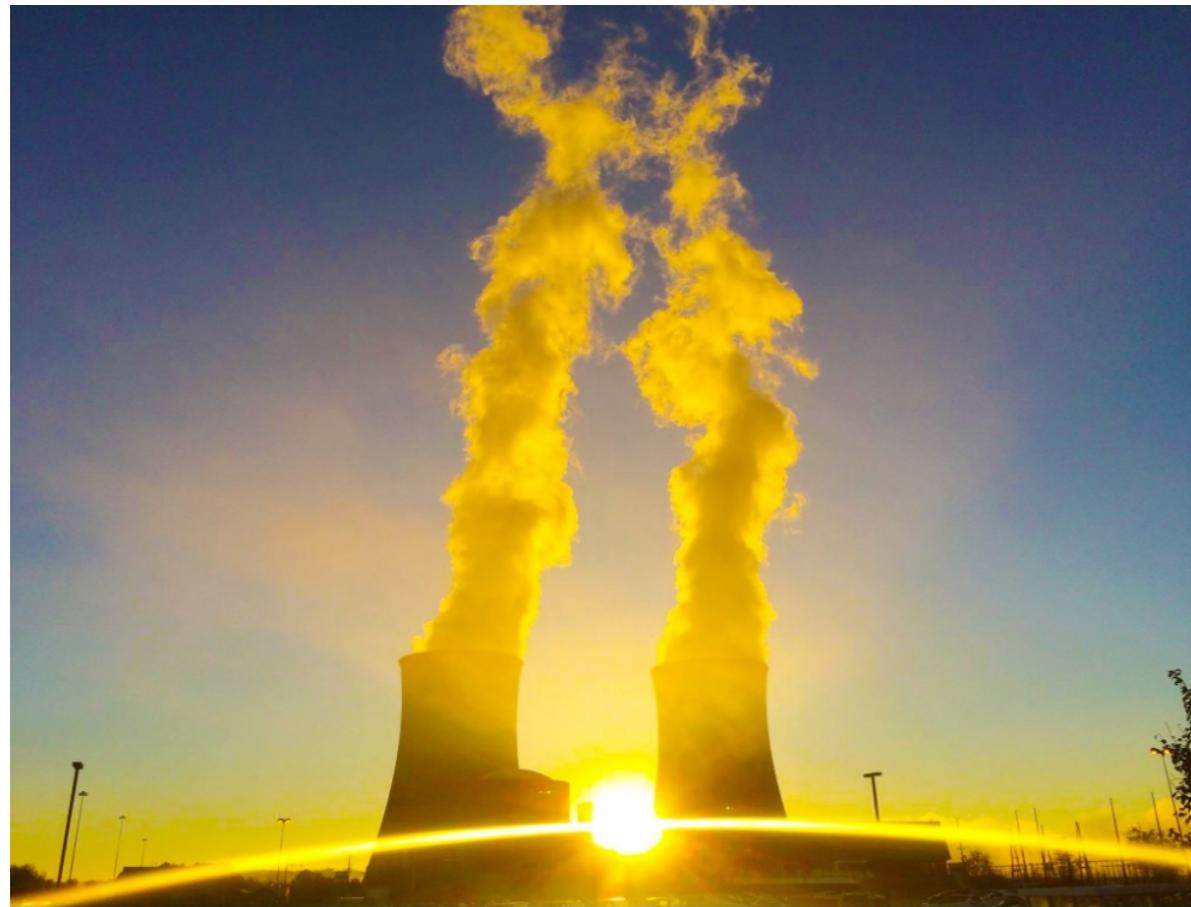
QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



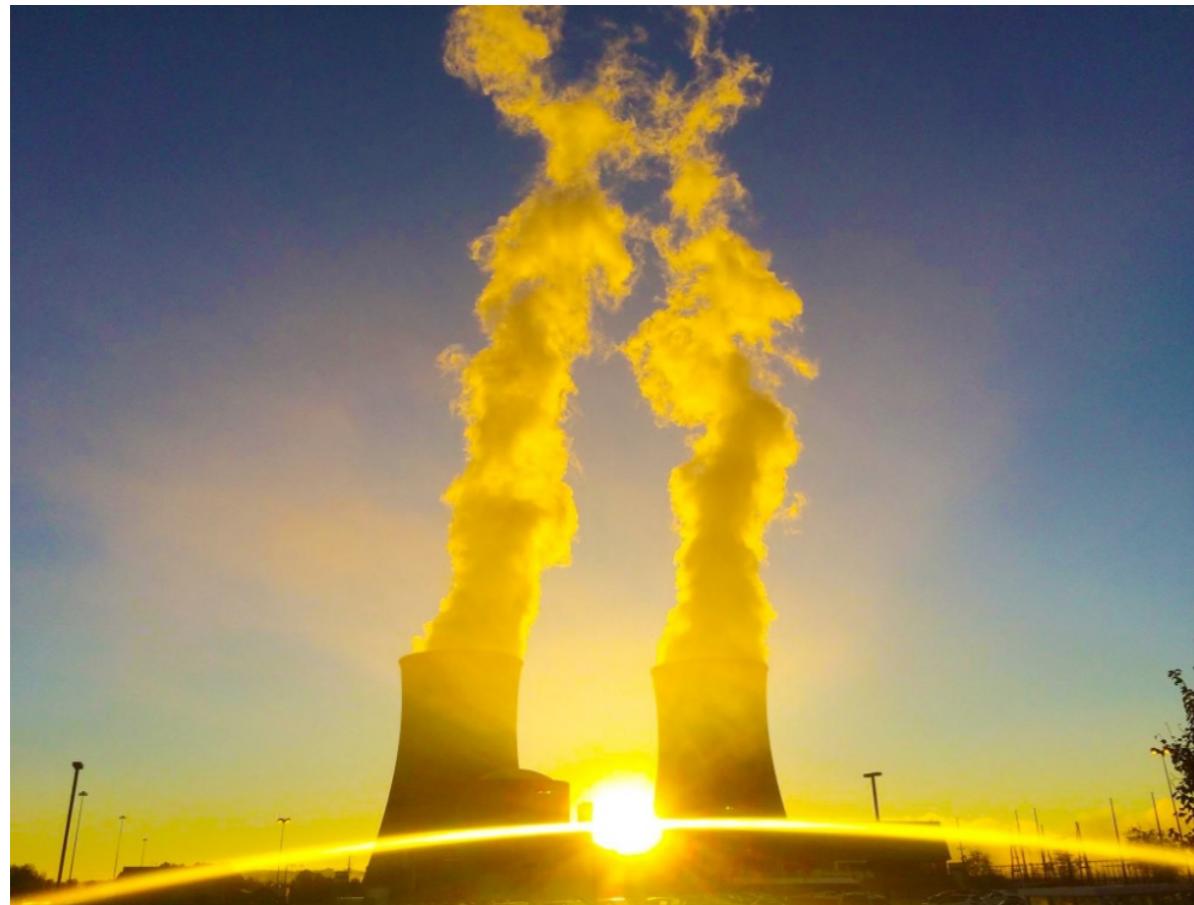
QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



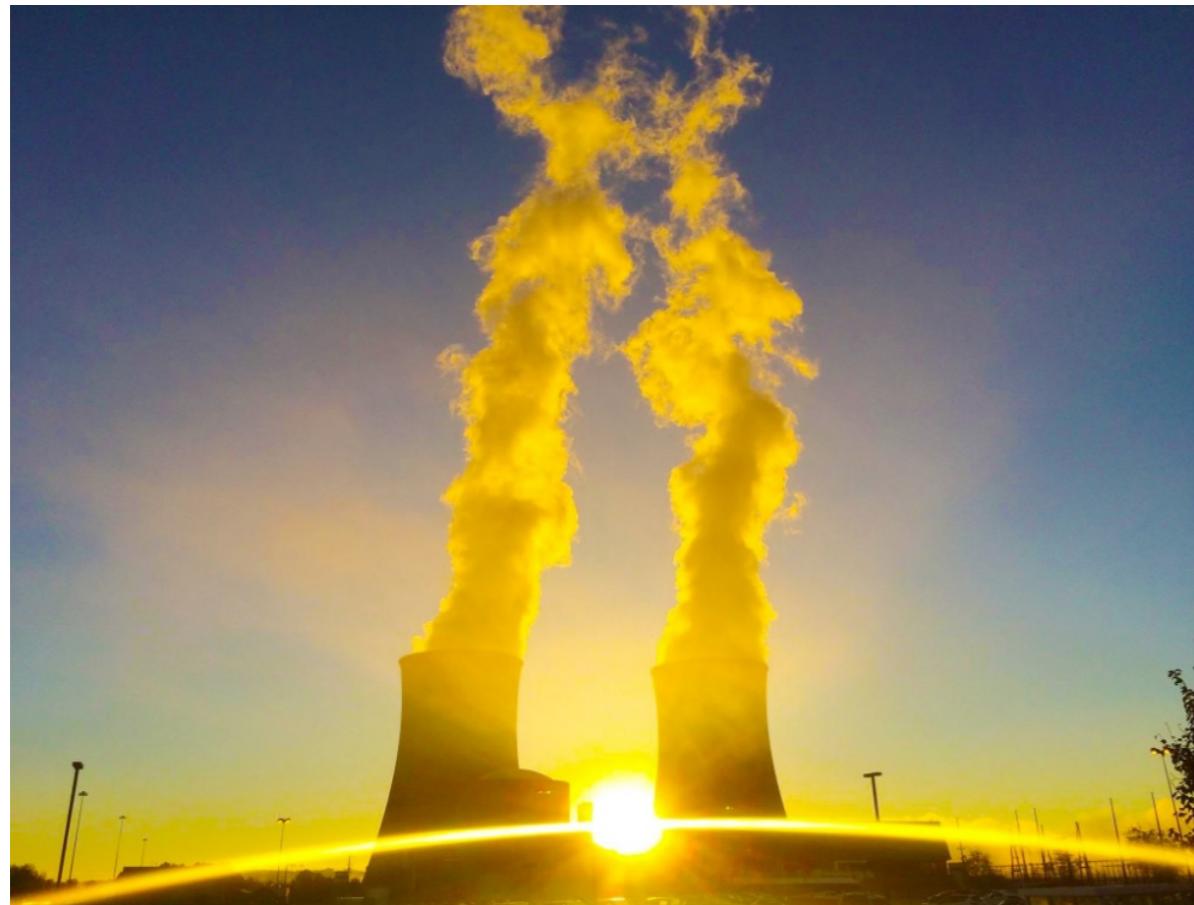
QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



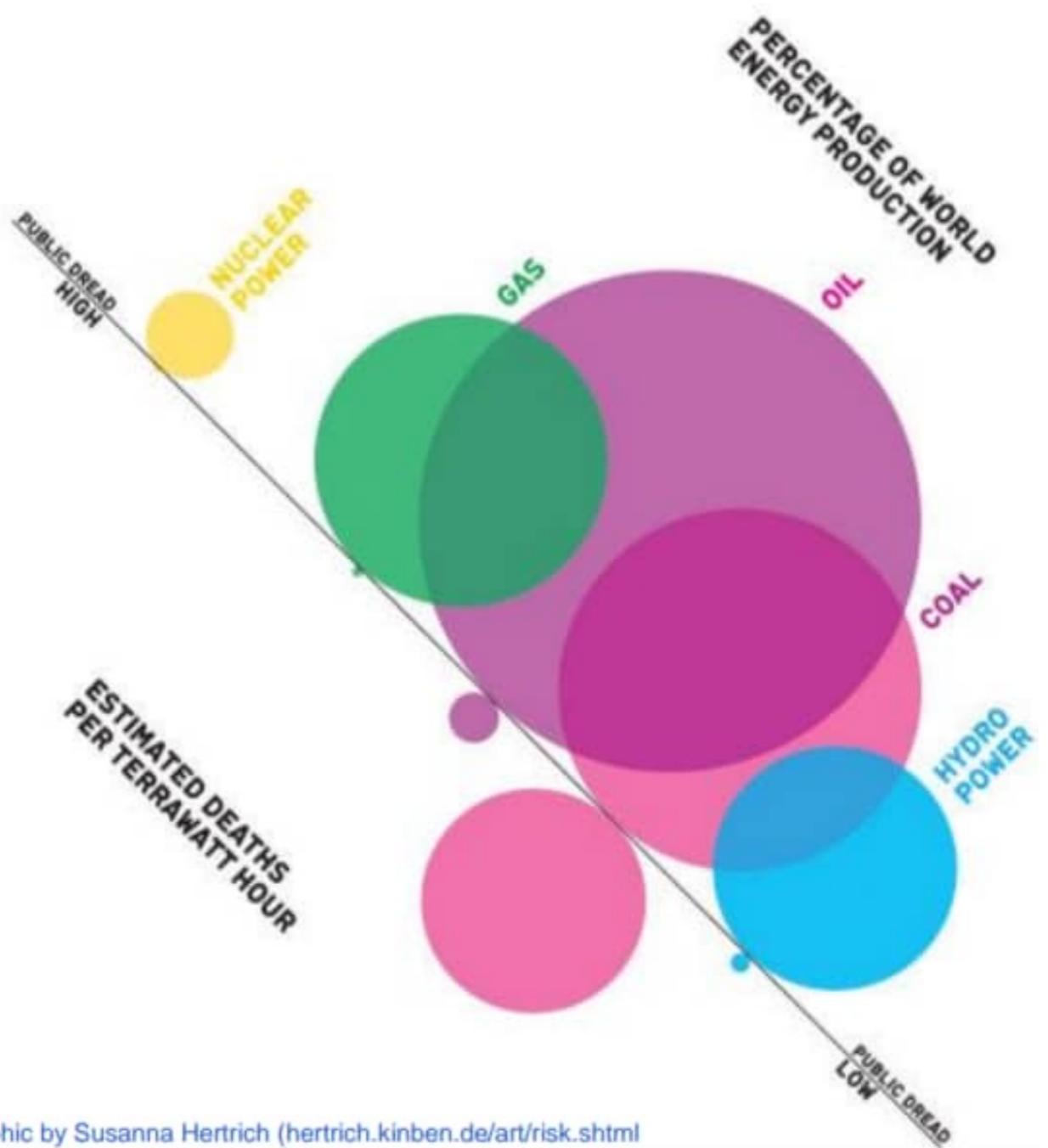
QUALE FONTE DI ENERGIA È PIÙ PERICOLOSA?



RISCHIO REALE E RISCHIO PERCEPITO

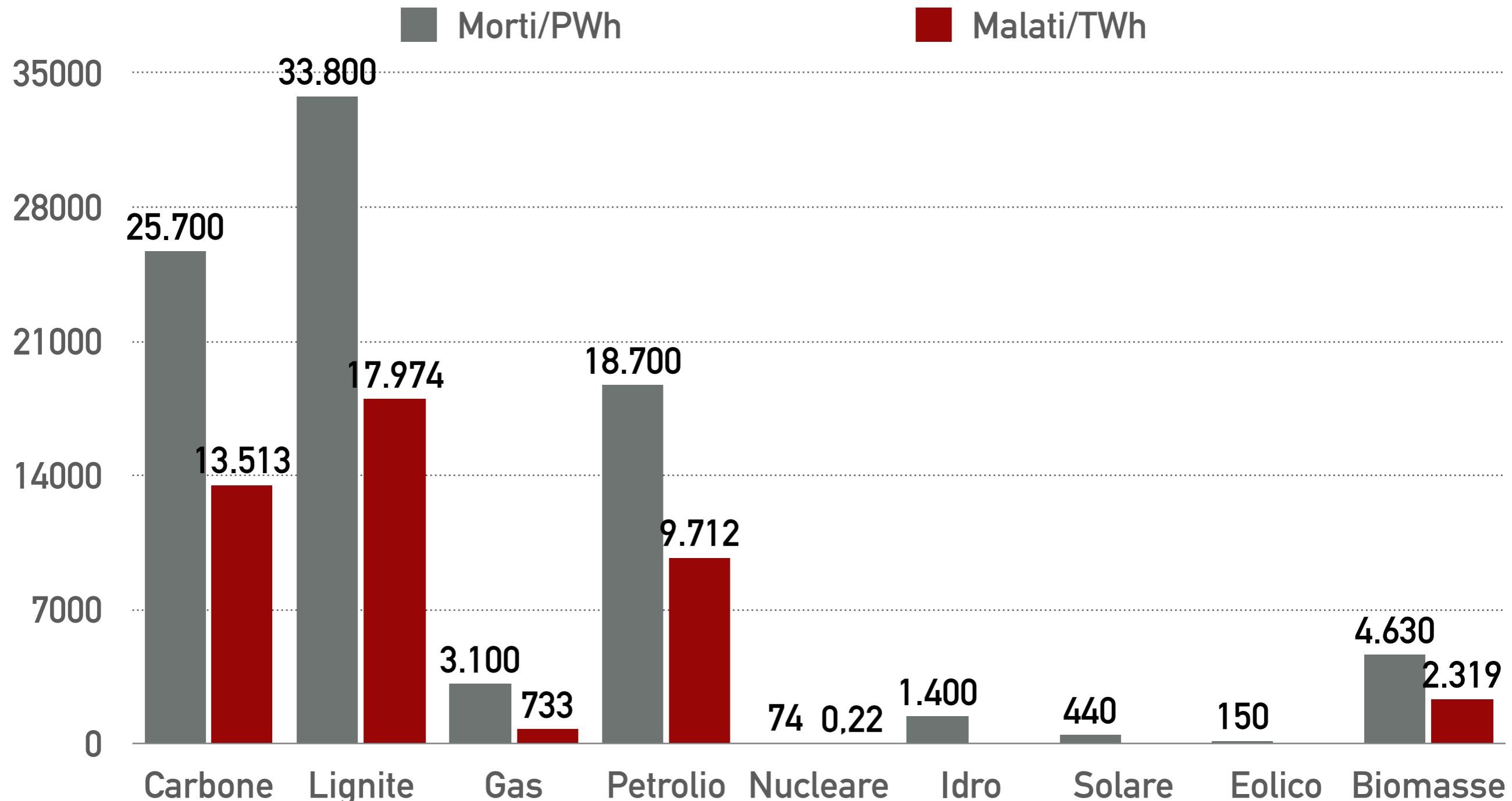


**PUBLIC DREAD
AND ACTUAL DEATHS
IN RELATION TO WORLD ENERGY PRODUCTION**

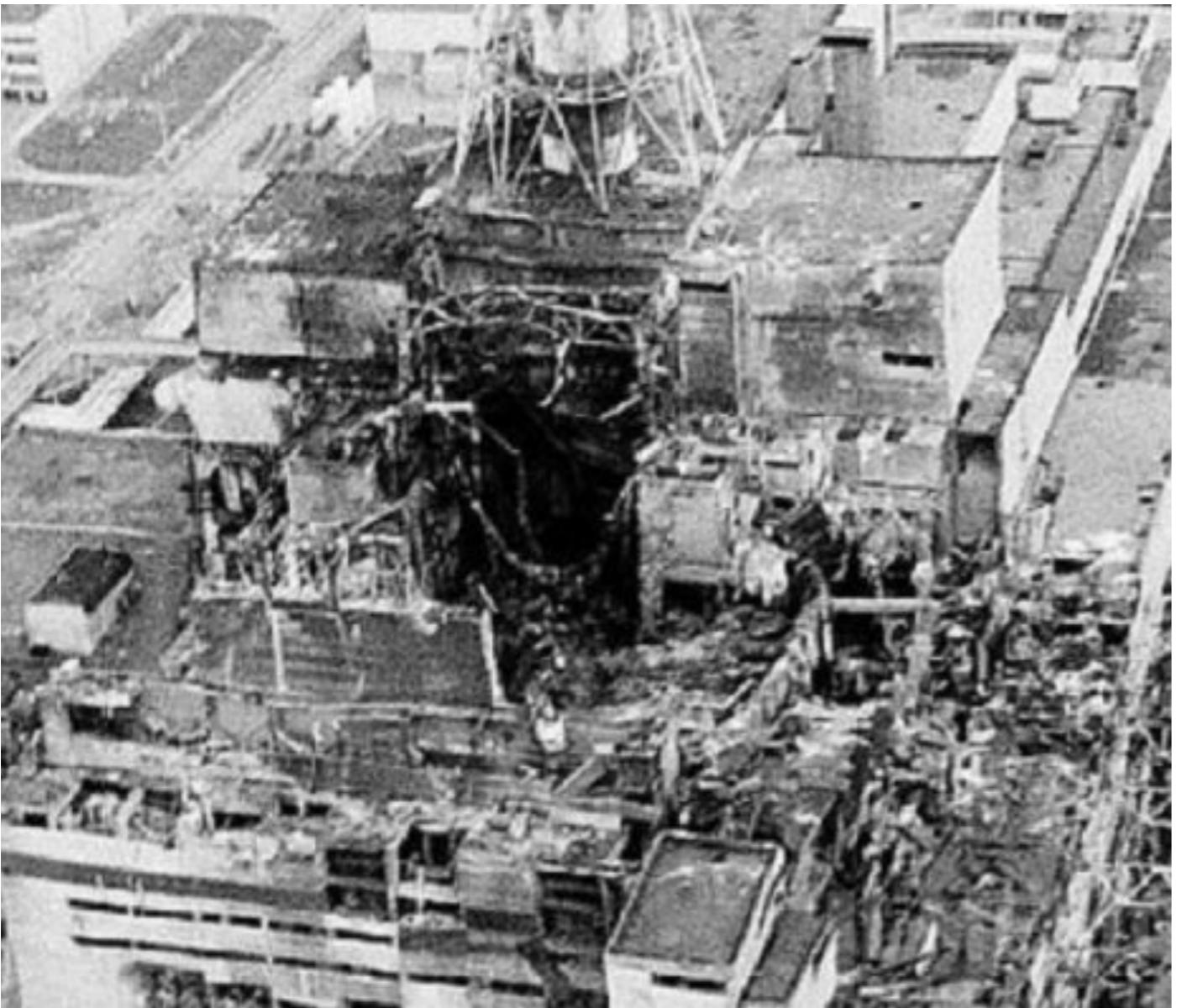


Graphic by Susanna Hertrich (hertrich.kinben.de/art/risk.shtml)

SICUREZZA



Fonti: Markandya, A., & Wilkinson, P. (2007). Electricity generation and health. *The Lancet*, 370(9591), 979-990;
<https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#605ca1db709b>



L'INCIDENTE DI CHERNOBYL

- L'incidente è la conseguenza di un design del reattore poco sicuro (LWGR-RBMK) e la concomitanza di azioni gravi e deliberate che portano a operare il reattore in condizioni proibite.
- 134 operatori esposti a SAR, di cui **47 deceduti** prematuramente
- **10 decessi** per cancro alla tiroide su 20 mila casi accertati
- Stimati come possibili 4000 decessi per cancro tra i tre gruppi più esposti (incidenza aggiuntiva del 3-4%)
- **PTS, infermità mentale, ansia, dipendenze, etc**

UNSCEAR Chernobyl report (2011): <http://www.unis.univie.ac.at/unis/en/pressrels/2011/unisinf398.html> ; https://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/backgrounder/en/

L'INCIDENTE DI DAIICHI

- La centrale nucleare Daiichi (una delle 5 nella regione colpita) si spegne in sicurezza a causa della scossa, tuttavia l'onda di tsunami scalca le barriere di difesa ed inonda i generatori diesel necessari a mantenere il processo di raffreddamento (**i generatori sono colpevolmente posti a 6 metri dal suolo, mentre l'onda è alta 13 m**). Ciò causa la fusione del nocciolo delle unità 1-2-3.
- Evacuazione forzata nel raggio di 20 km e consigliata da un'area più vasta
- **Nessuna morte riconducibile alle radiazioni**
- Possibili precursori del cancro tiroideale riscontrati nel 44% dei bambini della prefettura di Fukushima, contro il 57% del resto del Paese (screening effect).
- Nel 2018 2/3 degli evacuati rientrati.
-



Fonte: Neureiter et al., 2014

L'EVACUAZIONE ERA NECESSARIA?

- Circa 1,600 morti (polmonite, suicidi, stress, alcolismo e depressione) sono stati documentati come conseguenza dell'evacuazione, specialmente tra anziani e ospitalizzati.
- Secondo UN-SCEAR, la perdita di aspettativa di vita conseguente all'esposizione radiologica è di 3 mesi. Per confronto, l'aspettativa di vita di un abitante di Londra è ridotta di 4.5 mesi.



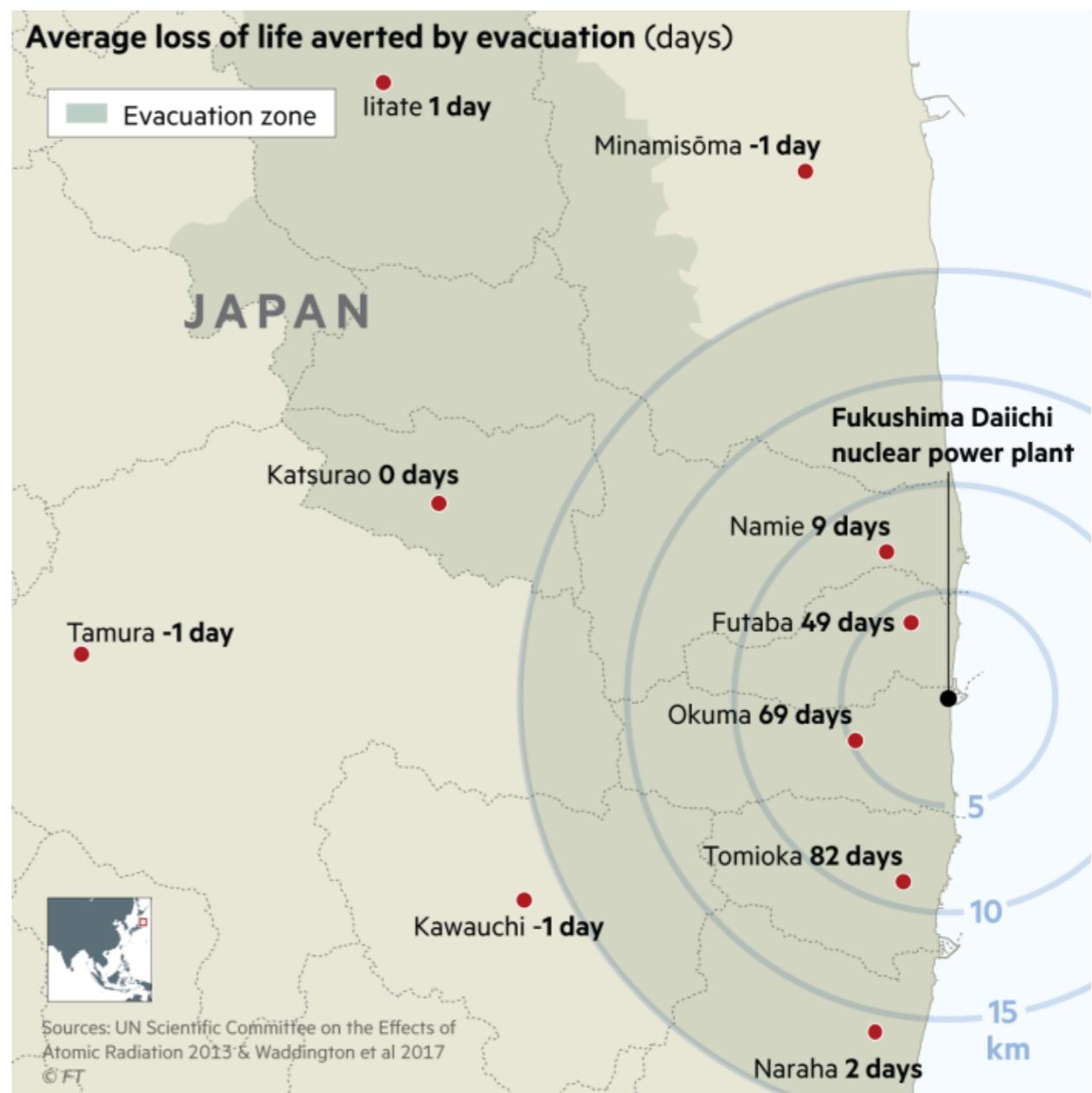
The Big Read Japan nuclear + Add to myFT

Fukushima nuclear disaster: did the evacuation raise the death toll?

More than 60,000 residents were displaced, with half yet to return. But some say moving out was more dangerous than the radiation itself



Robin Harding in Fukushima MARCH 10, 2018



SICUREZZA

1.300

United Nations Scientific Committee on the effects of radiation,
"Source and Effects of ionizing radiation: Sources, Vol. 1" (2008)

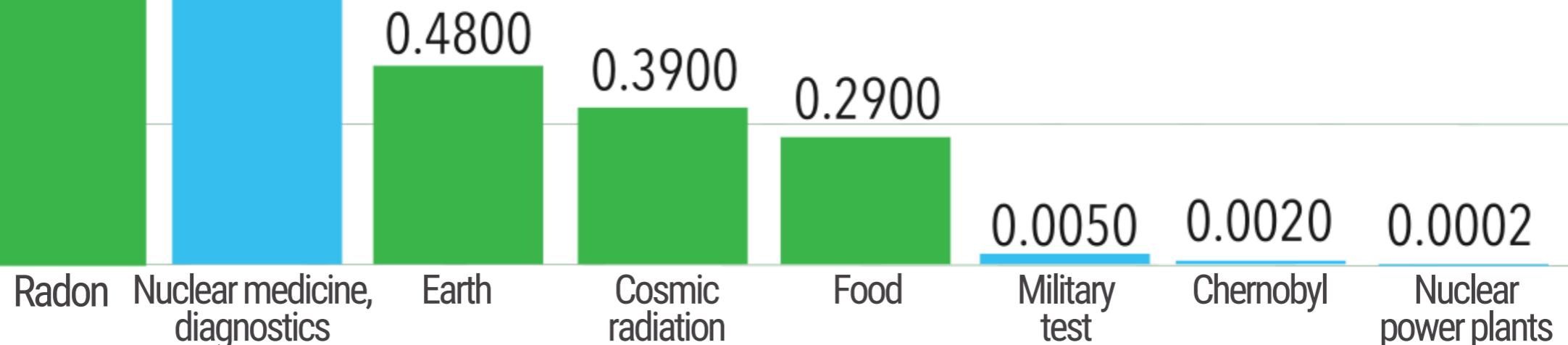


[mSv]

0.6500

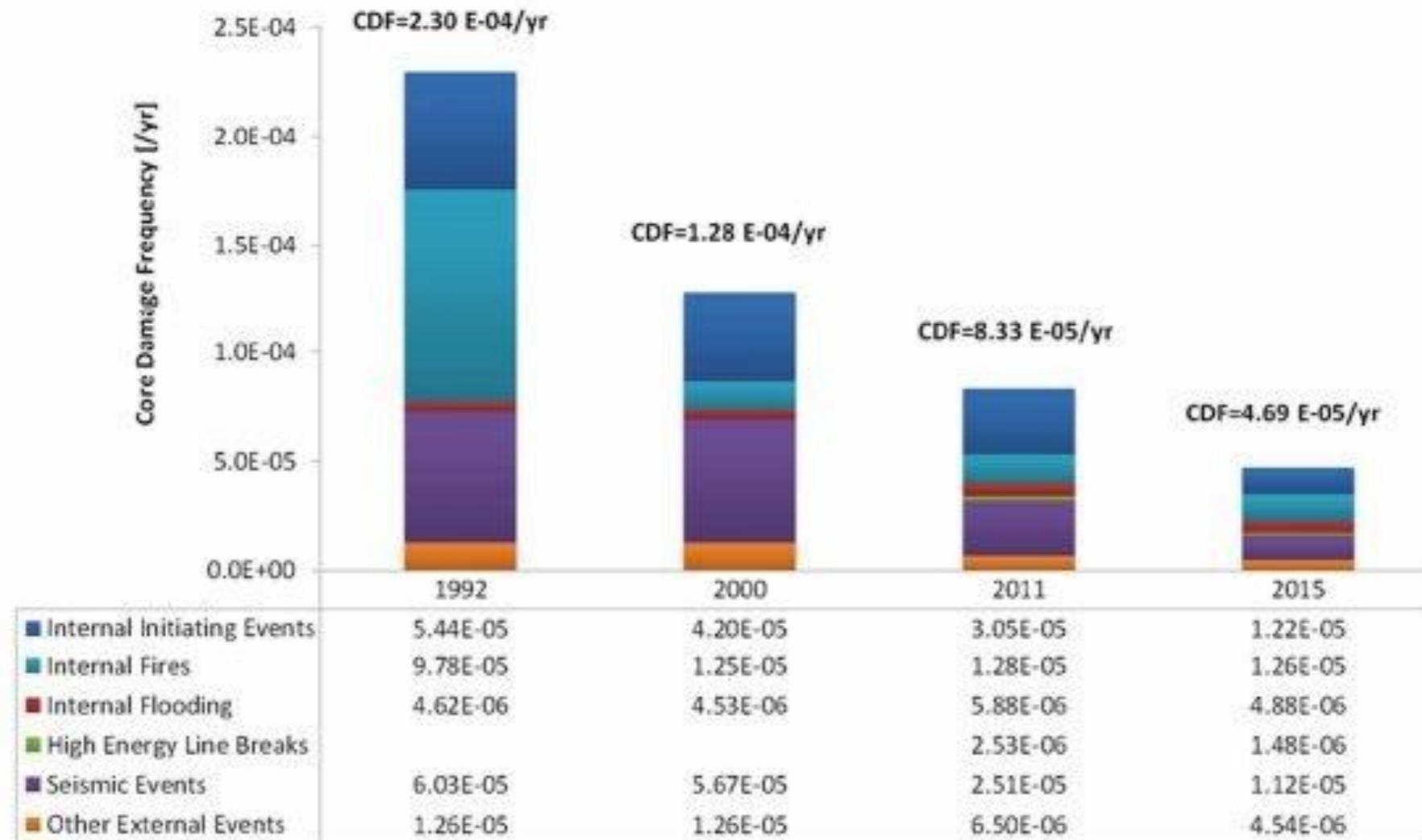
NATURAL SOURCES

ARTIFICIAL SOURCES



SICUREZZA - L'ESEMPIO DI KRSKO

Reducing the Risk of Core Damage Frequency (CDF)



HELB = High Energy Line Break

CDF = Core Damage Frequency

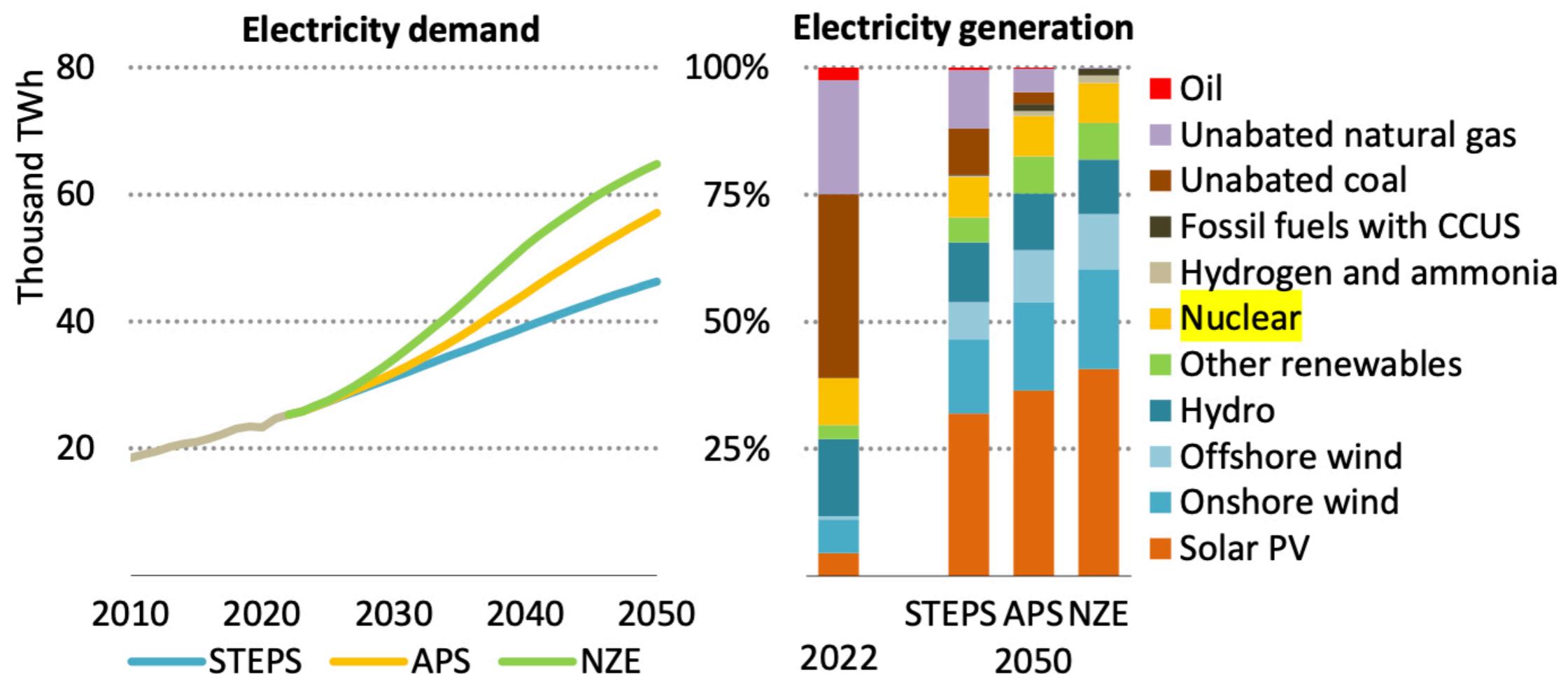
IE = Initiating Event

Fonte: Nuklearna
Elektrarna Krško



NUCLEARE E RINNOVABILI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI

Figure 3.13 ▷ Global electricity demand, 2010-2050, and generation mix by scenario, 2022 and 2050



IEA. CC BY 4.0.

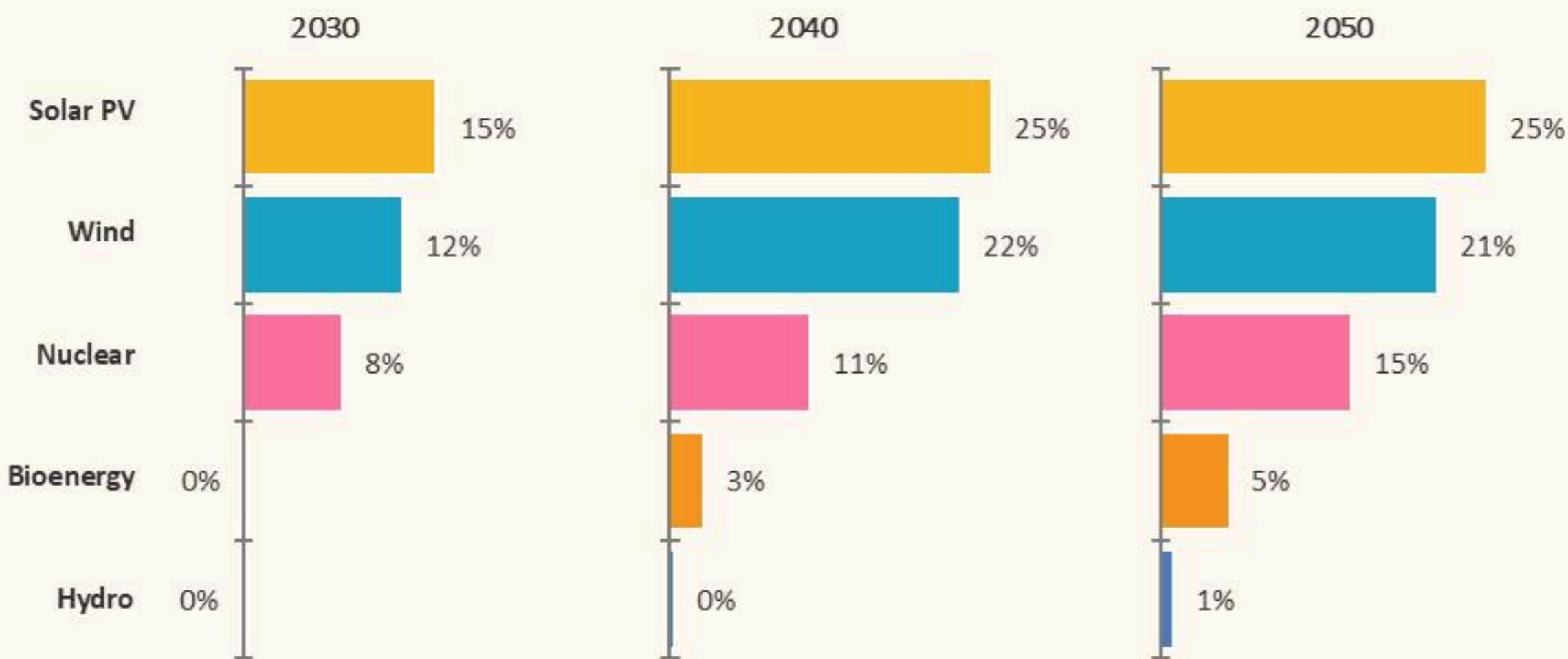
Electricity demand rises over 80% to more than 150% by 2050 across scenarios and is met increasingly by low-emissions sources at the expense of unabated coal and natural gas

NUCLEAR AND RENEWABLES FOR EMISSION REDUCTIONS

The IEA views governments as increasingly setting policies supportive of solar, wind, and nuclear generation



Change in WEO22's STEPS electricity generation scenario since WEO21, by forecast year and energy source – %



Notes: STEPS – Stated Policies scenario

Sources: International Energy Agency's World Energy Outlook (IEA's WEO), Radiant Energy Group analysis

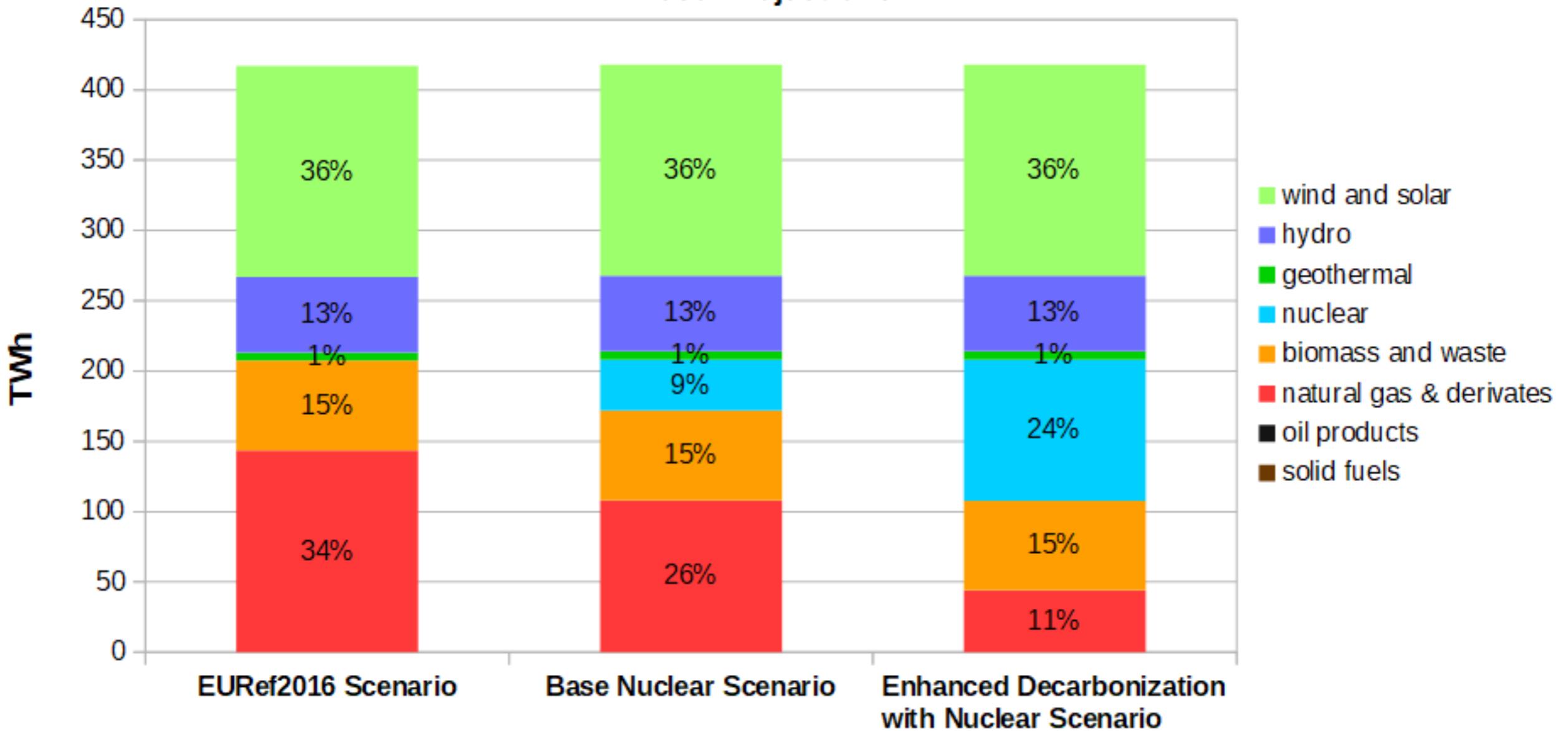
NUCLEARE E RINNOVABILI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI

Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society
Zadar, Croatia, 3-6 June 2018

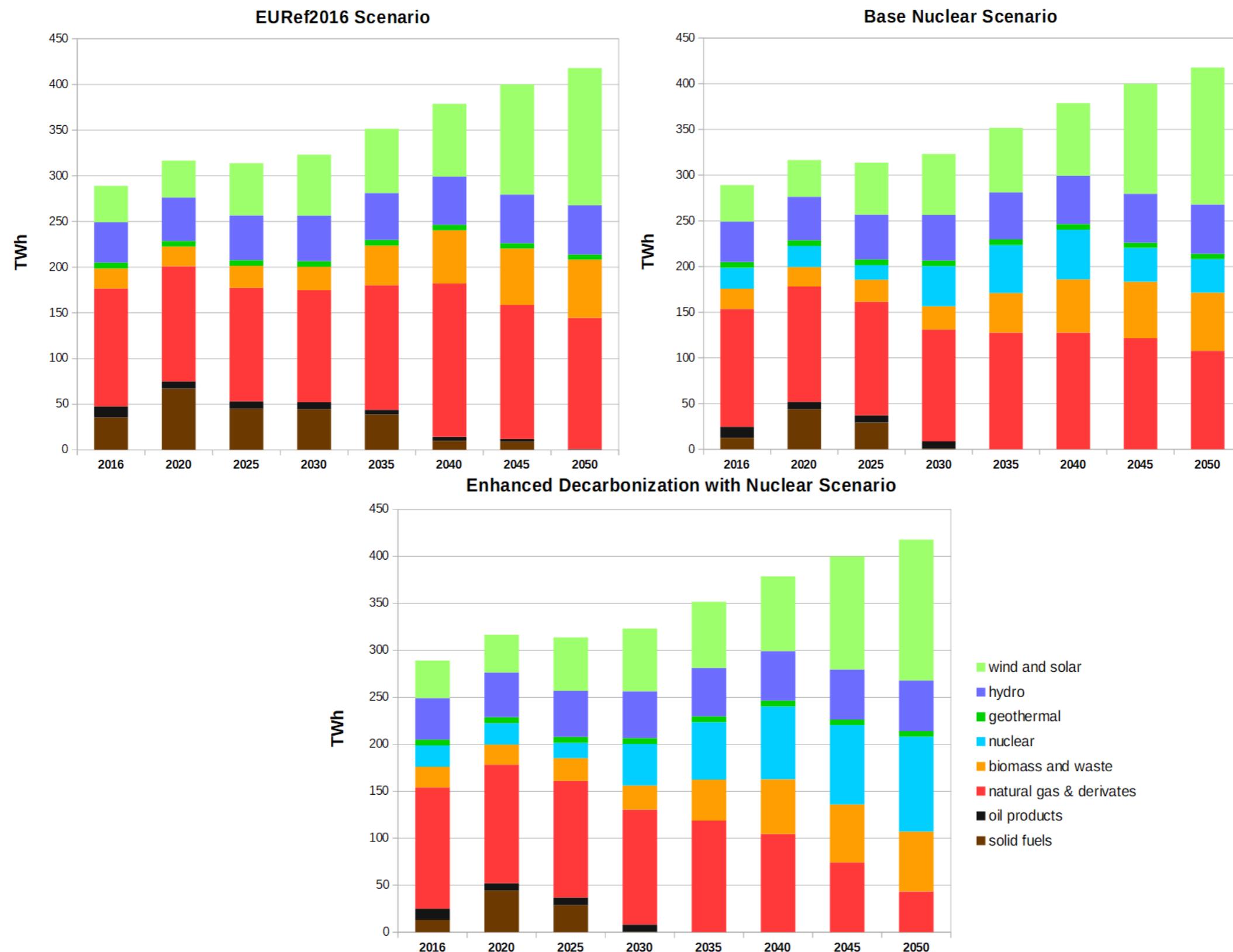
Paper No. 162

Nuclear Power In Italy: Lost And Potential Role In Decarbonizing The Electric System

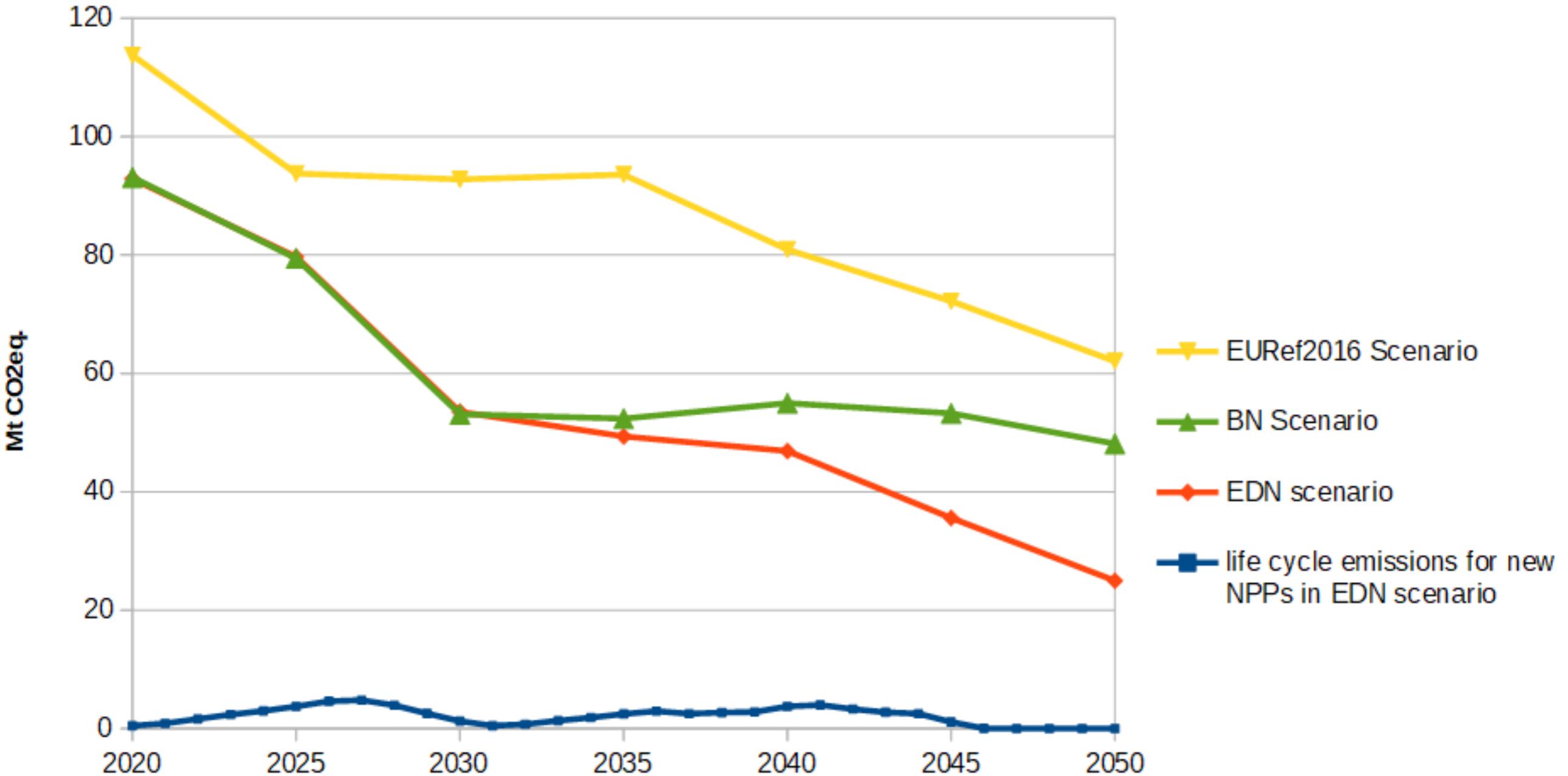
ITALY -2050 Projections



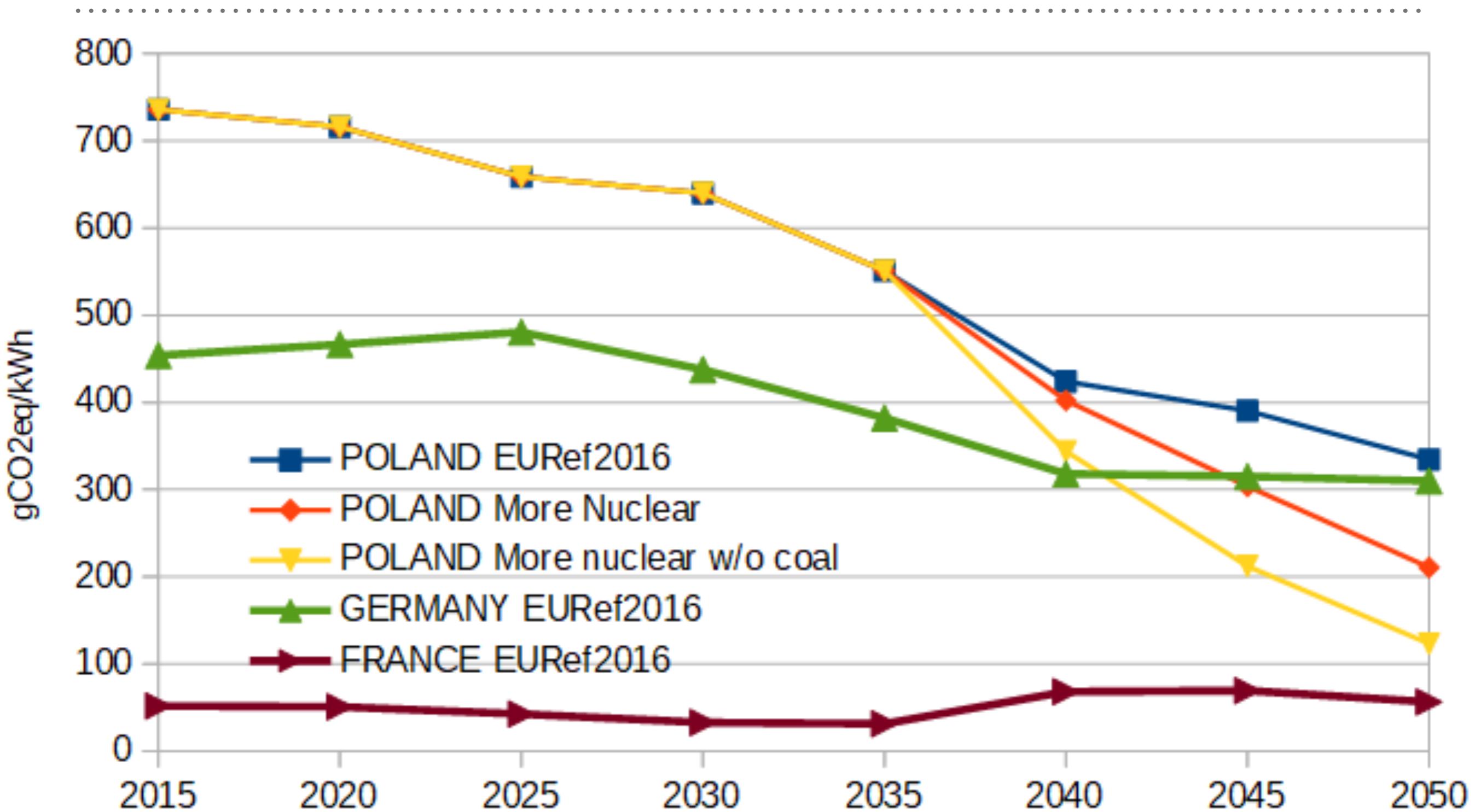
NUCLEARE E RINNOVABILI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI



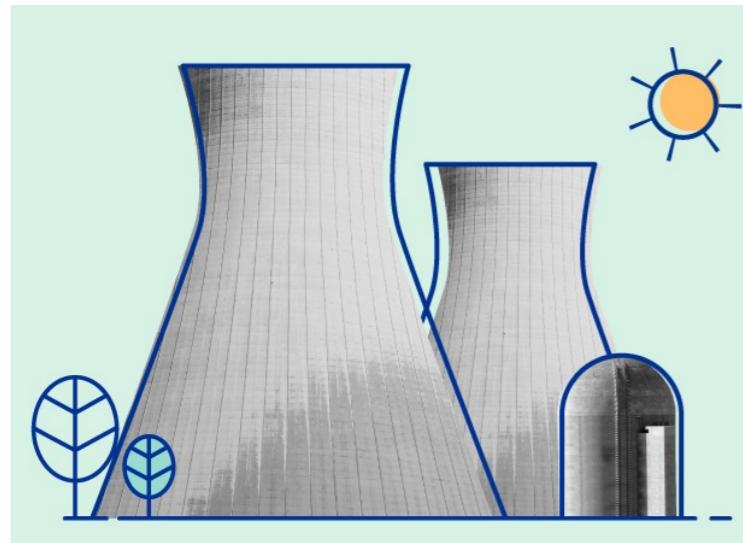
NUCLEARE E RINNOVABILI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI



NUCLEARE E RINNOVABILI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI



IL NUCLEARE DI DOMANI – REATTORI MODULARI E MICRO



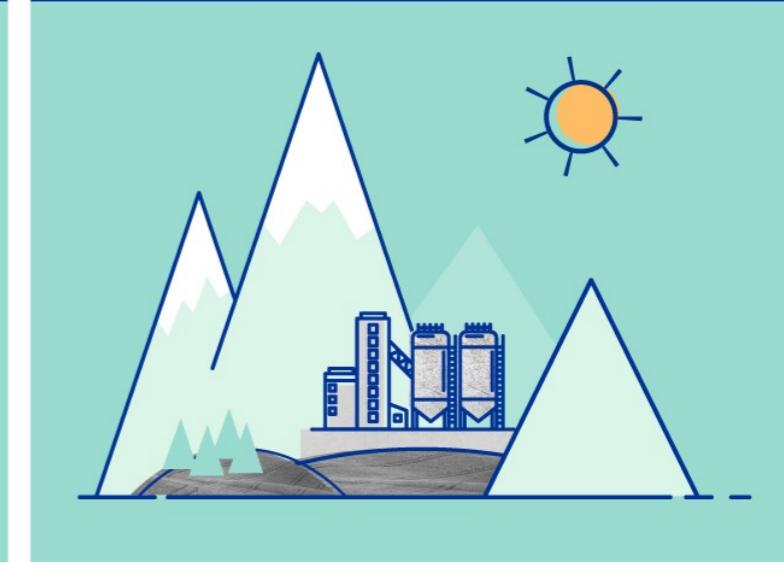
LARGE, CONVENTIONAL REACTOR
700+ MW(e)



SMALL MODULAR REACTOR
Up to 300 MW(e)

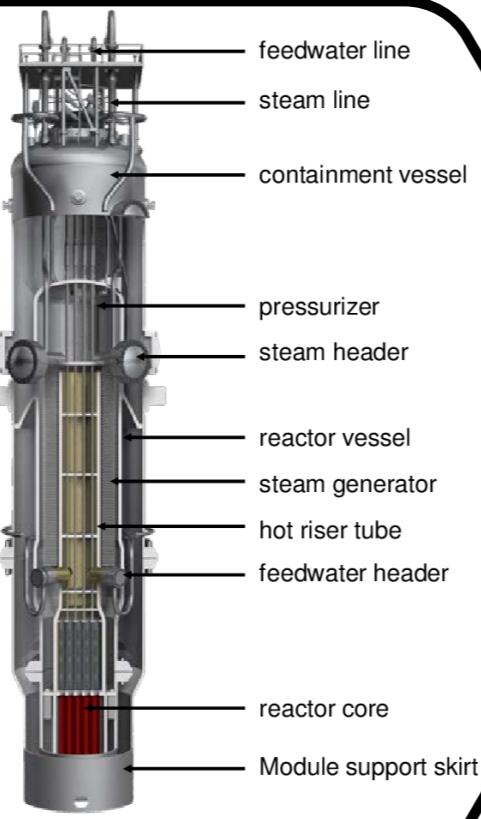
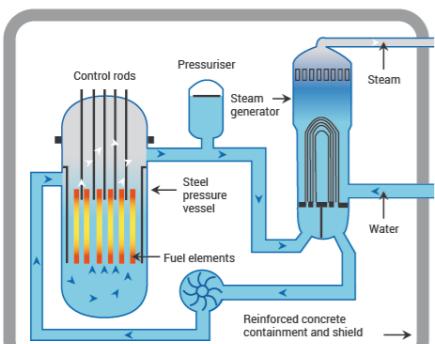


MICROREACTOR
Up to ~10 MW(e)



I VANTAGGI DEI PICCOLI REATTORI MODULARI (SMR)

- Costruzione in fabbrica
- Migliore integrazione con rinnovabili
- Sicurezza avanzata (walk-away)
- Ridotta EPZ
- Ridotto investimento capitale



ESEMPI DI PICCOLI REATTORI MODULARI (SMR)



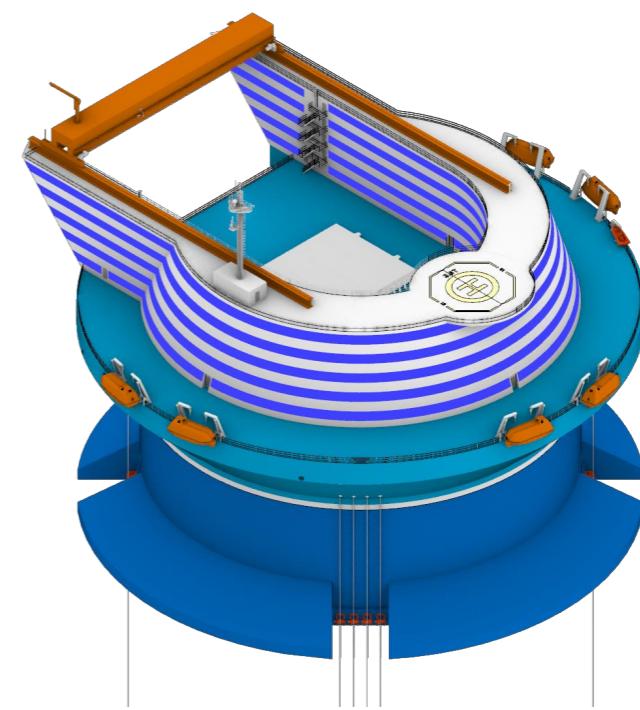
Akademik Lomonosov (Russia)



Progetto Nuscale



Shida Bay (Cina)



Progetto CorePower

IL NUCLEARE PER IL TRASPORTO MARITTIMO

- Maggiore velocità (25 nodi invece di 16/18)
- Maggiore capacità
- Maggiore autonomia
- “Reverse cold ironing”



IN CONCLUSIONE

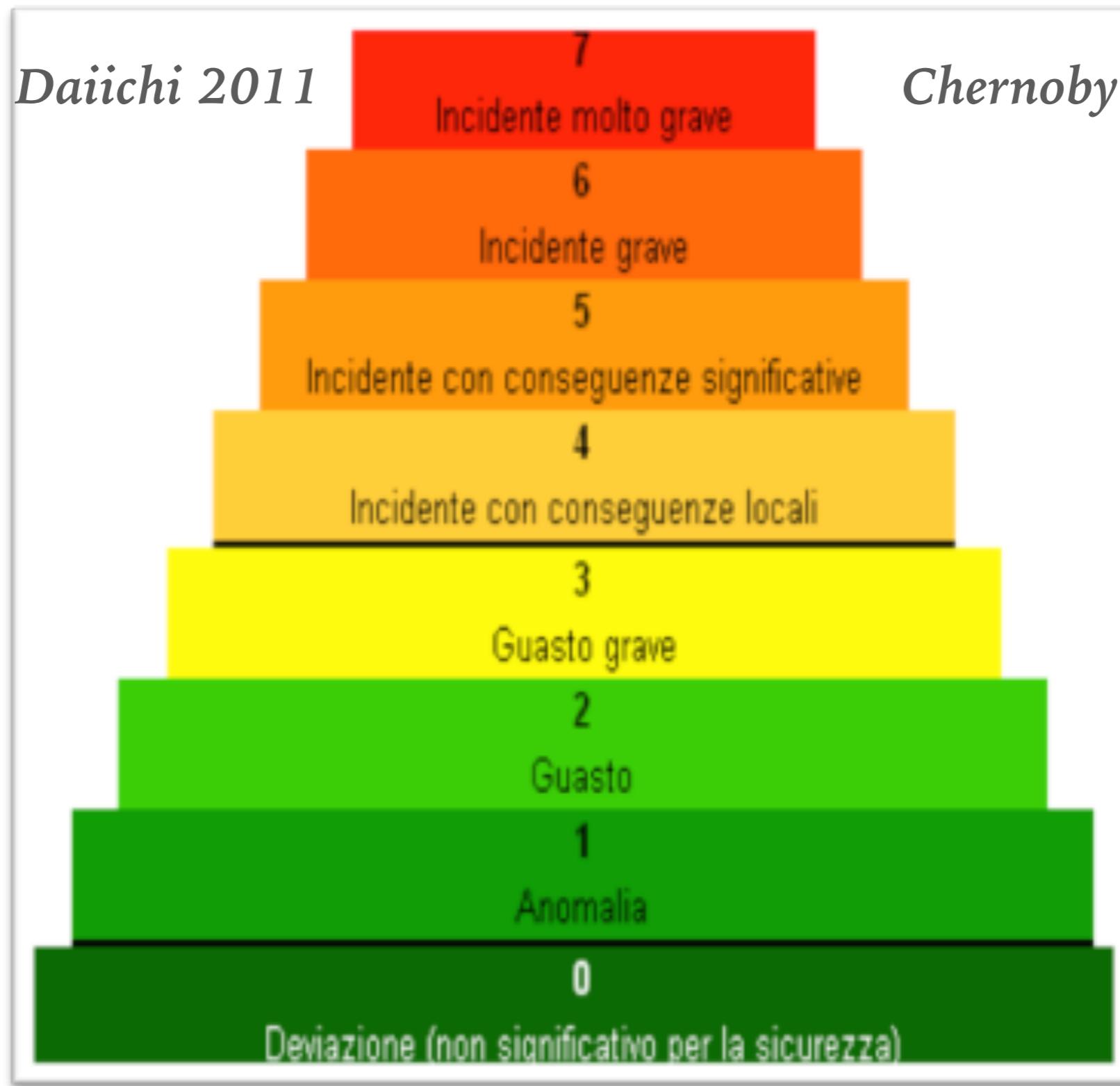
- La fissione nucleare è una fonte affidabile di produzione di energia pulita e a bassa intensità di carbonio
- La sicurezza è costantemente migliorata tramite miglioramenti procedurali e tecnologici ma è già elevata
- Il rischio percepito rimane alto e influenza l'opinione pubblica, malgrado effetti radiologici marginali
- Nucleare e nuove fonti rinnovabili non sono in competizione ma sono entrambe utili alla decarbonizzazione
- Il nucleare può contribuire a decarbonizzare con successo anche settori cosiddetti “hard to abate” come il trasporto marittimo.

GLI INCIDENTI NELLA PRODUZIONE DI ENERGIA NUCLEARE

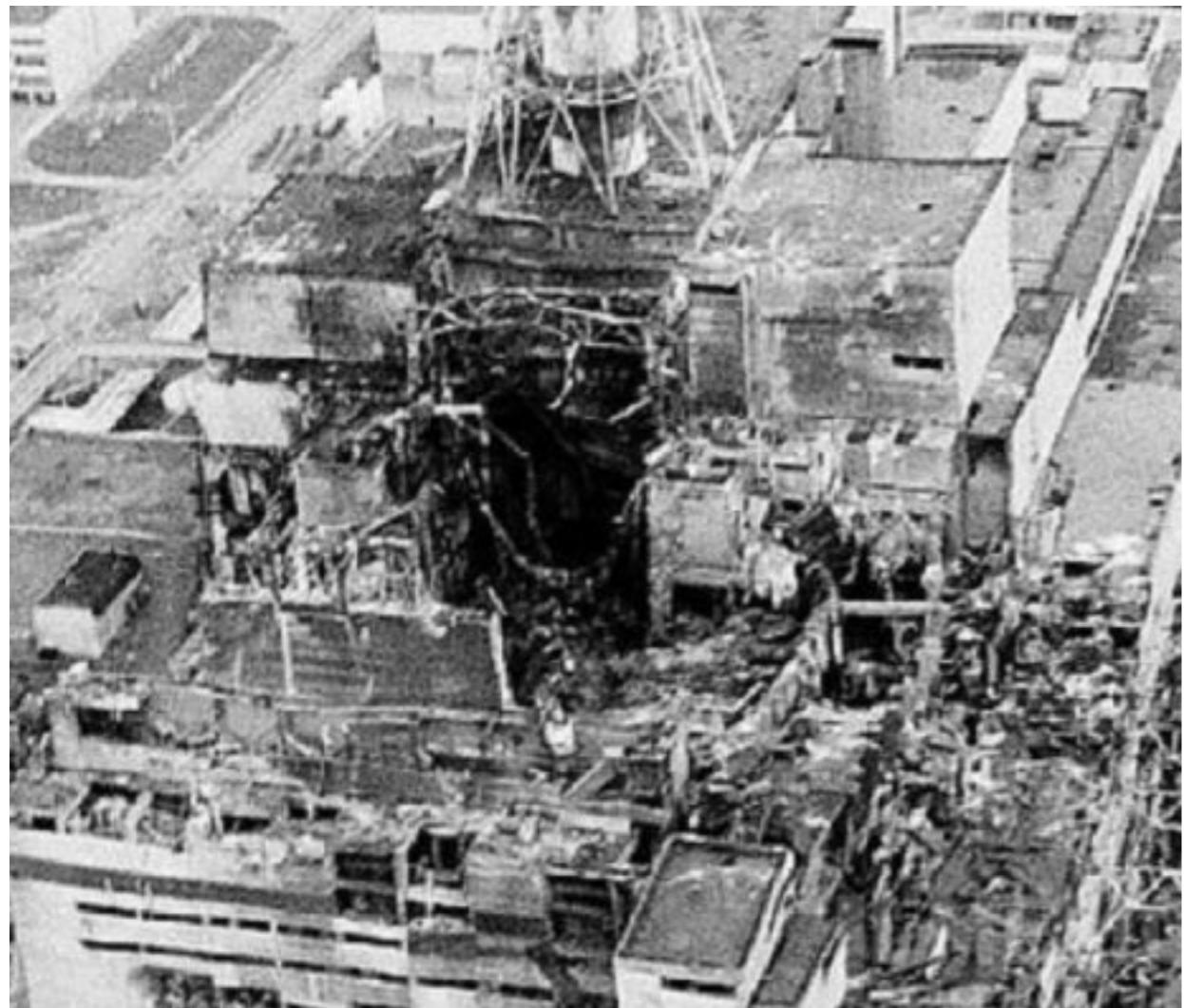
Fukushima Daiichi 2011

Chernobyl 4 1986

TMI 2 1979



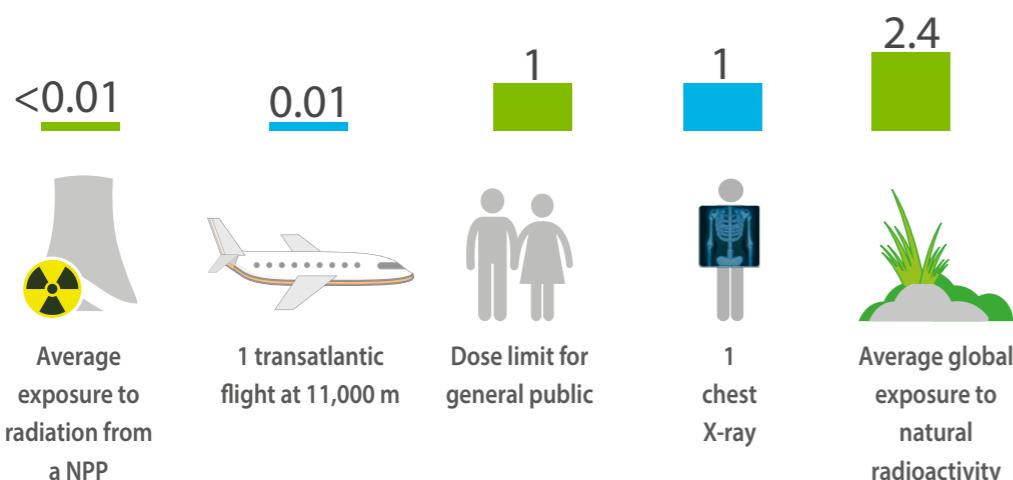
CHERNOBYL - L'INCIDENTE II



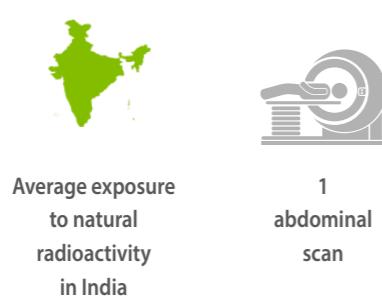
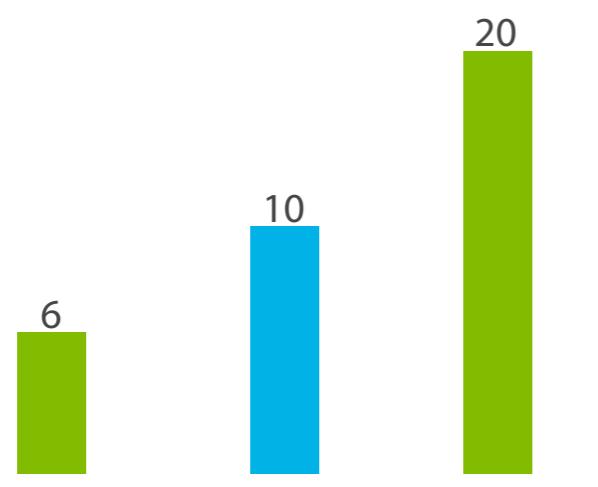
- Le esplosioni e la distruzione dell'edificio reattore conseguente alla fusione del nocciolo causano un ingente rilascio di materiale radioattivo, principalmente nelle aree limitrofe ma anche a lunghe distanze. I principali radionuclidi rilasciati sono Iodio 131, Cesio 134 e Cesio 137

Radioprotection: global scale of exposure (mSv)

■ mSv/year ■ mSv/ one off exposure



Sources: EDF, EURATOM, WNA 2012



CHERNOBYL - ESPOSIZIONE

- I livelli di esposizione medi registrati in conseguenza dell'incidente sono:
 - 120 mSv tra i 530 mila liquidatori
 - 30 mSv tra i 115 mila evacuati
 - 9 mSv tra i residenti delle aree contaminate (su due decenni)
 - <1 mSv nel resto d'Europa (nel primo anno)

UNSCEAR Chernobyl report (2011): <http://www.unis.unvienna.org/unis/en/pressrels/2011/unisinf398.html>

CHERNOBYL OGGI



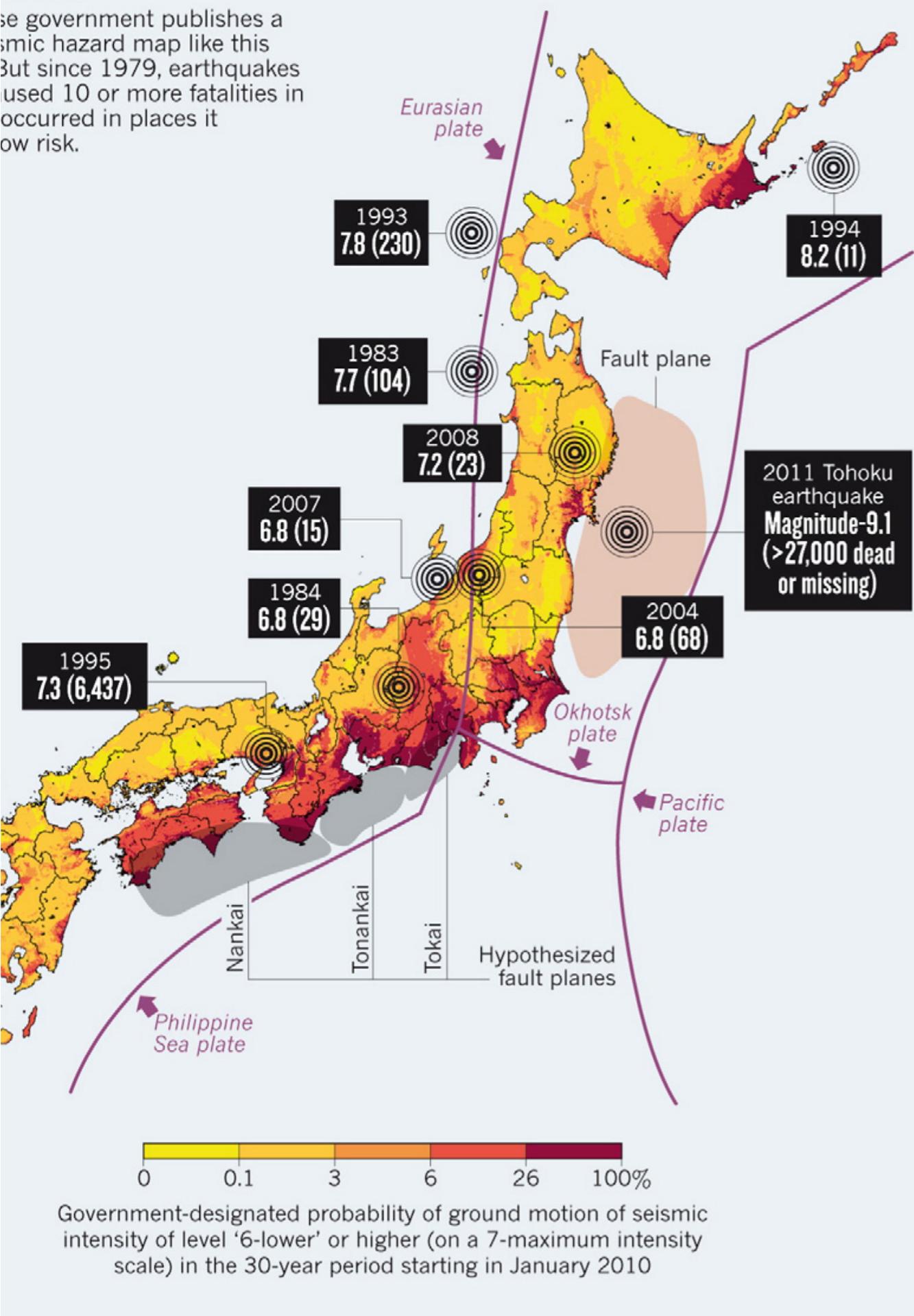
Photos courtesy of Dr. Davide Giusti, ENEA

<https://www.wired.com/story/the-chernobyl-disaster-might-have-also-built-a-paradise/>

CHECK

se government publishes a seismic hazard map like this. But since 1979, earthquakes used 10 or more fatalities in occurred in places it now risk.

From Stein et al., 2012



IL TERREMOTO DI TOHOKU, 2011

- L'11 marzo 2011 un terremoto catastrofico (Mw 9.1) colpisce la costa nord-orientale del Giappone



IL TERREMOTO DI TOHOKU, 2011

- L'11 marzo 2011 un terremoto catastrofico (Mw 9.1) colpisce la costa nord-orientale del Giappone
- Il terremoto genera uno tsunami con onde fino a 41 metri che in pochi minuti si infrangono su 650 km di costa, causando circa 27,000 tra morti e dispersi

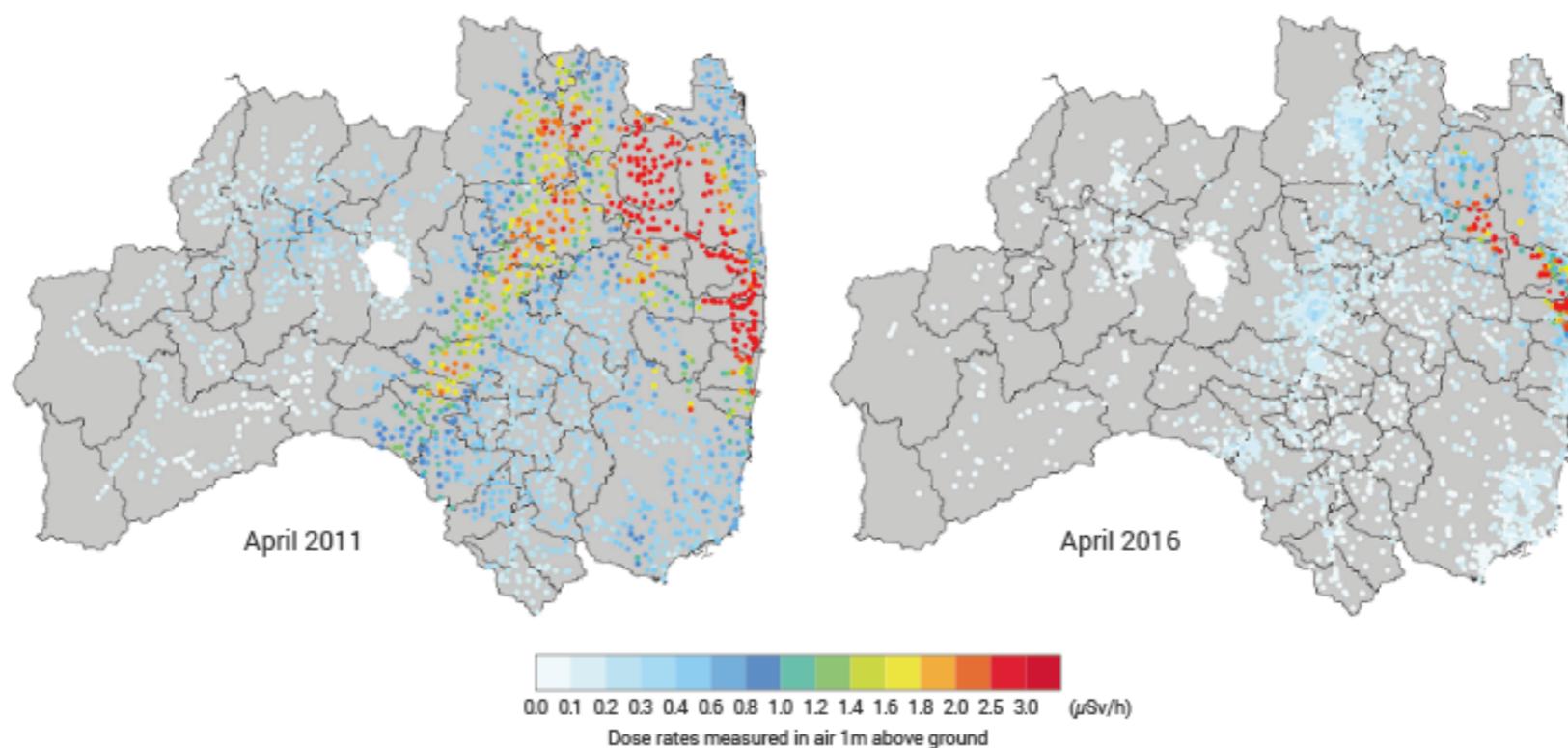
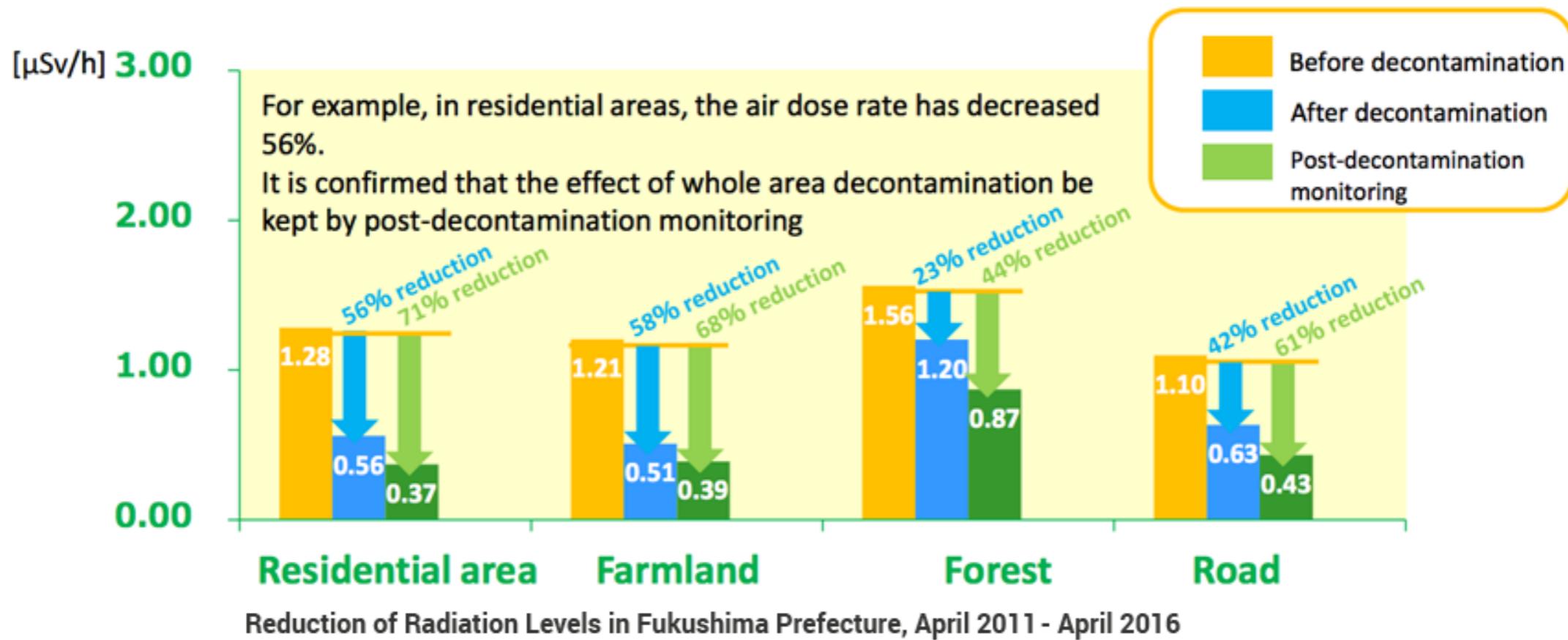
Restricted Area, Deliberate Evacuation Area
And Regions including Specific Spots Recommended for Evacuation (As of November 25, 2011)

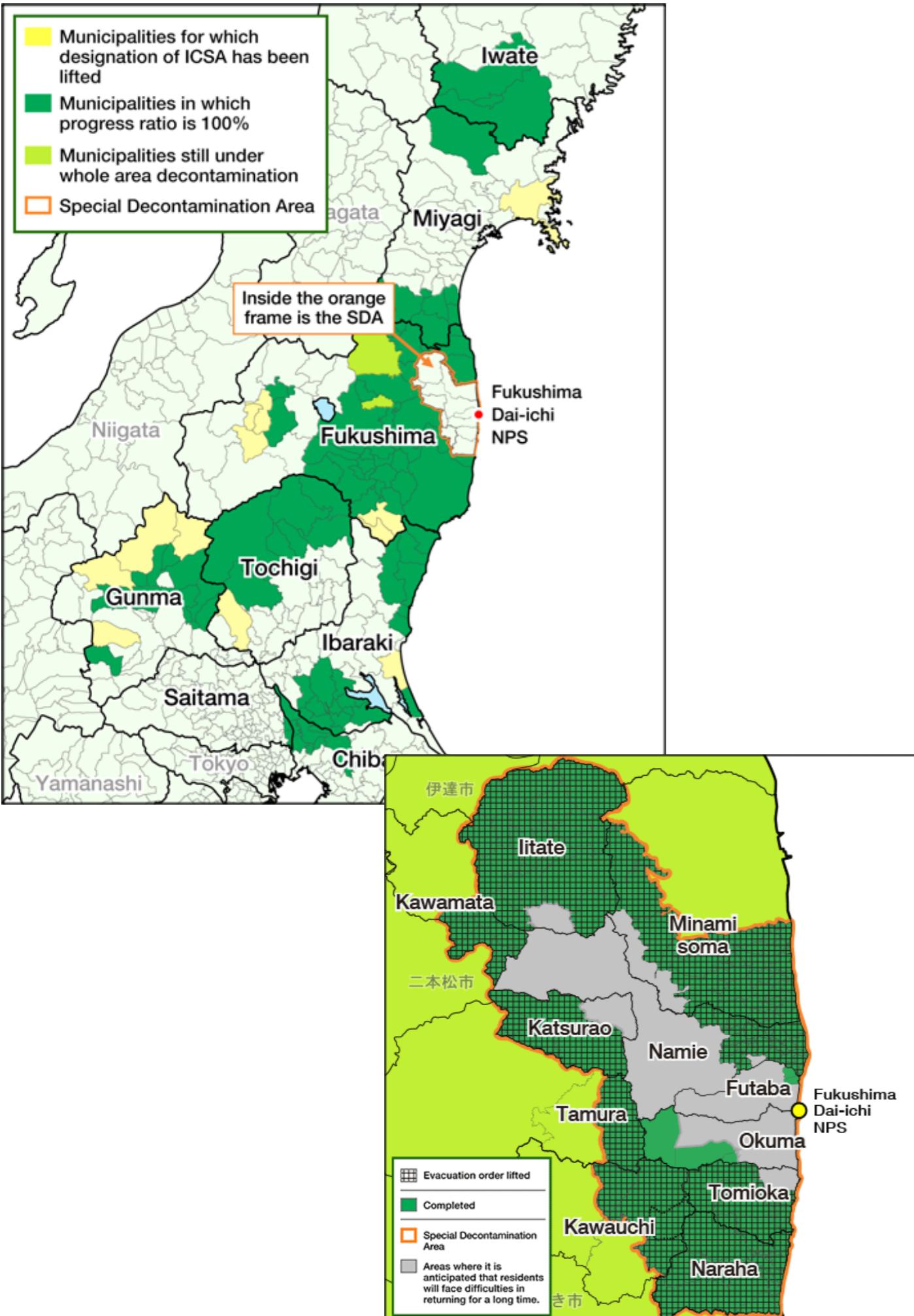


L'INCIDENTE DI DAIICHI

- 900 PBq sono rilasciati in atmosfera e nelle acque prospicienti
- Evacuazione forzata nel raggio di 20 km e suggerita da un'area più vasta
- Oltre 100 mila evacuati, mentre restrizioni al consumo di prodotti agricoli sono imposte

LA SITUAZIONE A FUKUSHIMA OGGI





LA SITUAZIONE A FUKUSHIMA OGGI

- Nessuna morte riconducibile alle radiazioni
 - Possibili precursori del cancro tiroidale riscontrati nel 44% dei bambini della prefettura di Fukushima, contro il 57% del resto del Paese (screening effect).
 - Graduale ritorno alle aree evacuate. Al 2018 restavano circa 30 mila evacuati.
 - Maggiori info nel reportage di Massimo Burbi su <https://nucleareeragione.org/2019/12/18/un-giorno-a-fukushima-2/>

LA SITUAZIONE A FUKUSHIMA OGGI



Foto M. Burbi

Sacchi di materiale contaminato



Foto M. Burbi

Namie Town - 8 km NE di Daiichi



Foto M. Burbi

Tomioka - 8 km S di Daiichi



Foto M. Burbi

A 2 km da Daiichi

LA SITUAZIONE OGGI

Per contestualizzare i valori precedenti...



In aeroplano...

$3.2 \mu\text{Sv}/\text{h}$



Piazza San Pietro

$0.9 \mu\text{Sv}/\text{h}$



Prypiat

$0.4 \mu\text{Sv}/\text{h}$