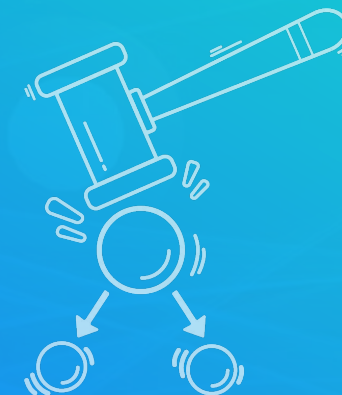


L'AVVOCATO DELL'ATOMO

I problemi del nucleare

Reattori nucleari di oggi



Dott. Luca Romano

Ing. Leonardo Mariano

Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

- 1. Il nucleare è pericoloso**
2. Non sappiamo come gestire le scorie
3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi
4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione
5. Può essere usato per la proliferazione militare
6. I costi ed i tempi
7. ...

Davvero ?



Chernobyl

**200-500
morti***

Bhopal

**20 mila
morti**



Banqiao

**171 mila
morti**



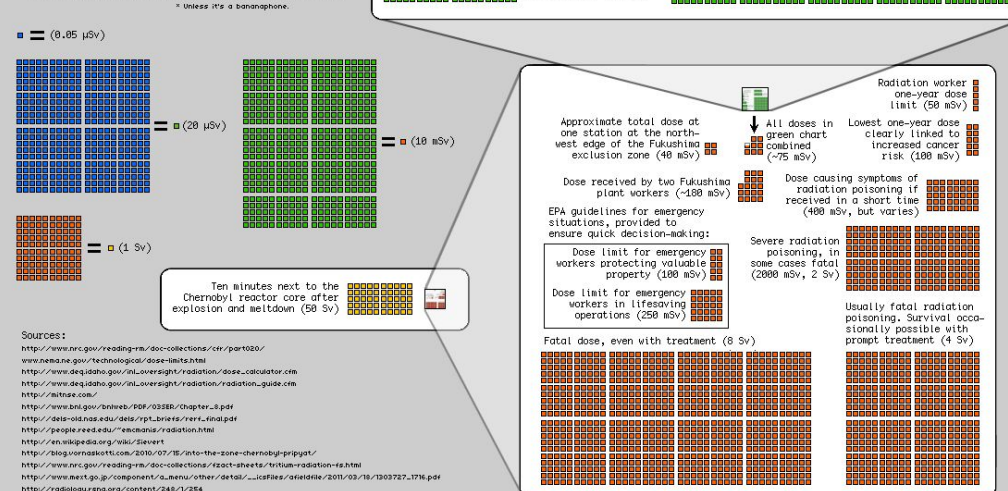
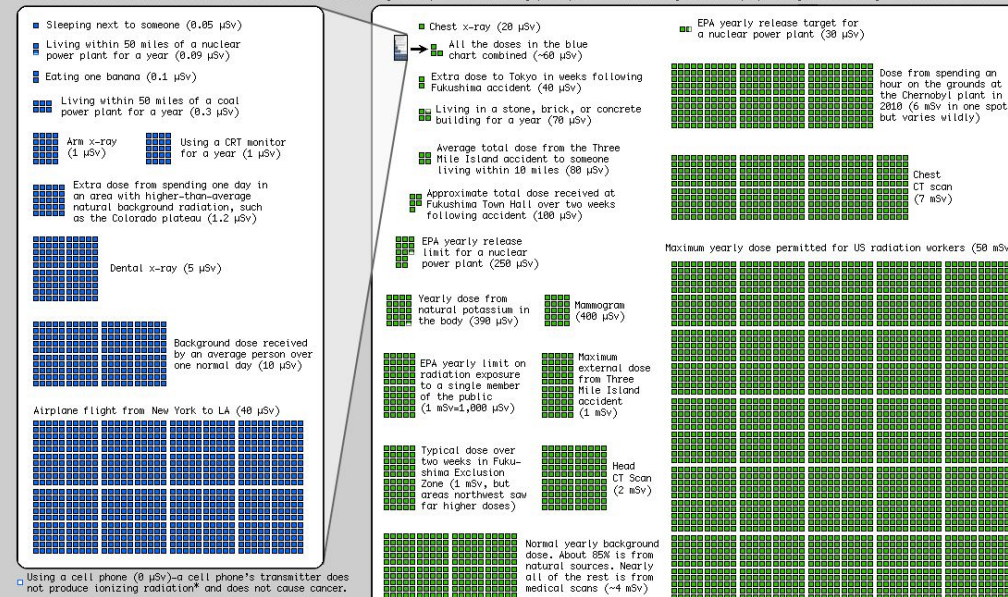
*Il report del Chernobyl Forum del 2003 ipotizza fino a 4000, ma il report UNSCEAR del 2008 e gli studi della Chernobyl Tissue Bank evidenziano come non ci sia evidenza che questo numero si sia concretizzato.

E le radiazioni, allora?

- **Tutto** è radioattivo
- È la **dose** che fa il veleno
- Oggi i limiti di legge sono **di 1 mSv sopra il fondo naturale**
- Non c'è evidenza di effetti sulla salute umana sotto i **100 mSv**
- Vivere a 50 km da una centrale nucleare per un anno è equivalente a **mangiare una banana**
- Fare **una TAC al torace equivale a una dose 7 volte superiore** al limite di legge per la radioattività ambientale
- Vi sono nel mondo diversi luoghi dalla **radioattività naturale elevatissima**, dove la gente vive tranquillamente. Anche in Italia.

Radiation Dose Chart

This is a chart of the ionizing radiation dose a person can absorb from various sources. The unit for absorbed dose is "sievert" (Sv), and measures the effect a dose of radiation will have on the cells of the body. One sievert (all at once) will make you sick, and too many more will kill you, but we safely absorb small amounts of natural radiation daily. Note: The same number of sieverts absorbed in a shorter time will generally cause more damage, but your cumulative long-term dose plays a big role in things like cancer risk.



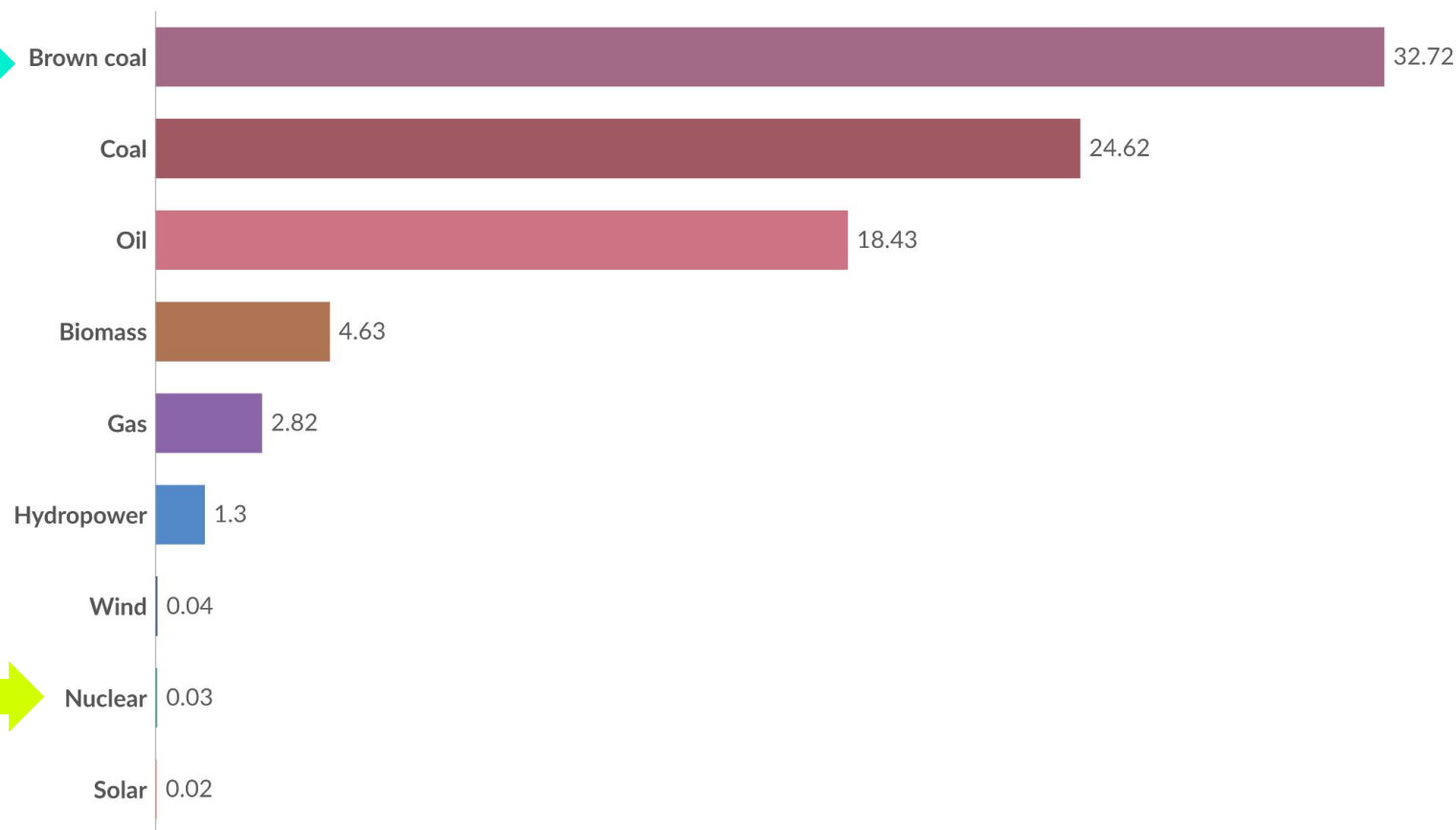
Sources:
<http://www.nrc.gov/readingrm/doc-collections/cfr/part020/>
<http://www.nrc.gov/technologies/dose-limits.html>
<http://www.deq.idaho.gov/nl/oversight/radiation/dose-calculator.cfm>
<http://www.deq.idaho.gov/nl/oversight/radiation/radiation-guide.cfm>
<http://nrciac.com/>
http://www.bnl.gov/bnlweb/PDF/03388/Chapter_3.pdf
http://deis-015.nsl.nsl.gov/deis/rpt_briefs/nrc-015.pdf
<http://pnpnp.nsl.nsl.gov/nrc/nrc/radiation.html>
<http://www.nsl.nsl.gov/nsl/Sievert>
<http://blog.versawork.com/2010/07/18/into-the-zone-berkeley-prigat/>
<http://www.nrc.gov/readingrm/doc-collections/radiation/radiation-rs.html>
<http://www.nrc.gov/readingrm/doc-collections/radiation/radiation-rs.html>
<http://radiology.ams.org/content/24/1/254>

Chart by Randall Munroe, with help from Ellen, Senior Reactor Operator at the Bead Research Reactor, who suggested the idea and provided a lot of the sources. I'm sure I've added in lots of mistakes; it's for general education only. If you're basing radiation safety procedures on an internet PNG image and things go wrong, you have no one to blame but yourself.

Death rates per unit of electricity production

Our World
in Data

Death rates are measured based on deaths from accidents and air pollution per terawatt-hour¹ of electricity.



Data source: Markandya & Wilkinson (2007); Sovacool et al. (2016); UNSCEAR (2008; & 2018)

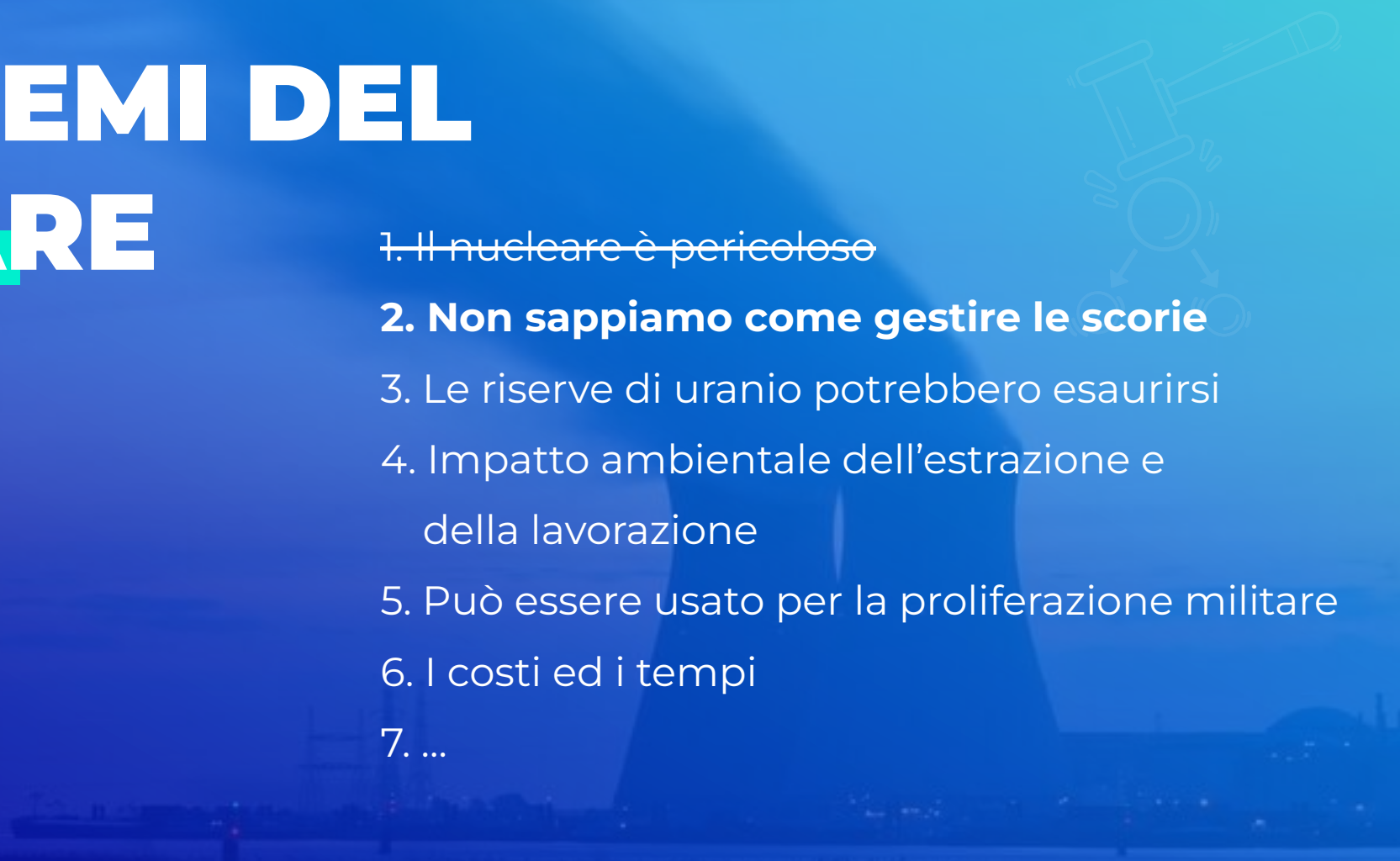
OurWorldinData.org/energy | CC BY

1. Watt-hour: A watt-hour is the energy delivered by one watt of power for one hour. Since one watt is equivalent to one joule per second, a watt-hour is equivalent to 3600 joules of energy. Metric prefixes are used for multiples of the unit, usually: - kilowatt-hours (kWh), or a thousand watt-hours. - Megawatt-hours (MWh), or a million watt-hours. - Gigawatt-hours (GWh), or a billion watt-hours. - Terawatt-hours (TWh), or a trillion watt-hours.

E
comparato
alle altre?

Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

- 
- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
 - 2. Non sappiamo come gestire le scorie**
 3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi
 4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione
 5. Può essere usato per la proliferazione militare
 6. I costi ed i tempi
 7. ...

Cosa sono i rifiuti radioattivi?

LLW Rifiuti a bassa attività	Tutto ciò che ha una radioattività superiore alla soglia consentita per i rifiuti comuni, ma che non richiede schermature particolari per essere maneggiato.
ILW Rifiuti ad attività intermedia	Tutto ciò che non ha una radioattività così alta da richiedere un raffreddamento, ma va comunque schermato anche durante il trasporto.
HLW Rifiuti ad alta attività	Tutto ciò che ha una radioattività sufficientemente elevata da richiedere di essere raffreddato (i decadimenti radioattivi generano calore).

LLW Rifiuti a bassa attività	• Tutti i materiali non ILW o HLW (filtri dell'acqua di raffreddamento, tute del personale, strumenti usa e getta, etc...)
ILW Rifiuti ad attività intermedia	• Cladding metallico che contiene le pastiglie di combustibile. • Resine usate per il trattamento iniziale del combustibile
HLW Rifiuti ad alta attività	• Barre di combustibile esausto • Liquidi di riprocessamento del combustibile esausto

Quante se ne producono?

Produzione annuale di rifiuti industriali in europa:



Rifiuti industriali:
Circa 1000 milioni di m³



Rifiuti industriali tossici:
Circa 10 milioni di m³



Rifiuti radioattivi:
50 000 m³

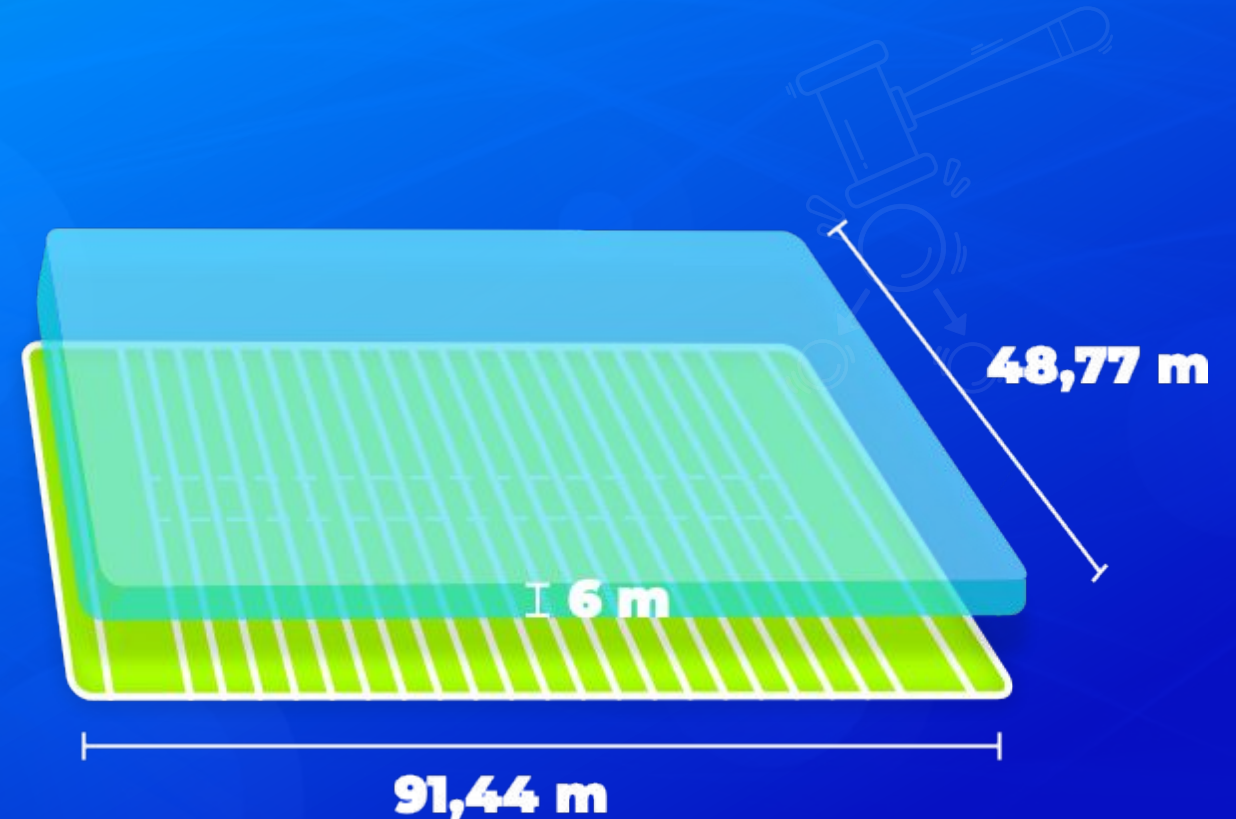


Rifiuti radioattivi di alto livello:
500 m³

Fonte: *Nuclear and Renewable Energies* (Roma: Accademia Nazionale dei Lincei, 200) aggiornata con dati dalla commissione europea "Radioactive Waste Management in the European Union" (Bruxelles: EC, 1998)

Quante se ne producono?

- Oggi nel mondo esistono **poco più di 400 mila t** di scorie radioattive di alto livello
- In Francia **le scorie costituiscono 1/10000 del totale dei rifiuti tossici** e 1/120000 del totale dei rifiuti

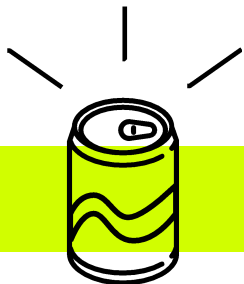


Le scorie sono riciclabili

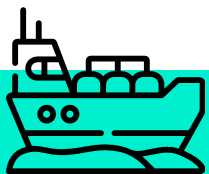
- L'uranio che esce da un reattore **contiene ancora circa il 97% della sua energia**
- Sappiamo già come costruire **reattori in grado di sfruttare il combustibile al 100%**
- Oggi non lo si fa solo perché non conviene economicamente



Riassumendo



Questo è il volume di rifiuti radioattivi che **una persona** produrrebbe **in una vita**, usando solo energia nucleare



Questo è il volume di rifiuti radioattivi che produrrebbe **l'umanità in un secolo** usando reattori veloci



Questo è il volume di rifiuti radioattivi di alto livello prodotti dalla **Svizzera in 50 anni**

Foto: Zwilag cask storage hall

Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
- ~~2. Non sappiamo come gestire le scorie~~
- 3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi**
4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione
5. Può essere usato per la proliferazione militare
6. I costi ed i tempi
7. ...

La situazione attuale

- La domanda Mondiale di Uranio è di circa **70 mila tonnellate all'anno**
- Di queste, circa **56 mila vengono estratte dalle miniere**
- Le altre provengono dallo **smantellamento degli arsenali militari**
- Le miniere conosciute e già prezzate **saranno sufficienti per i prossimi 90-100 anni** ai consumi attuali



Prospettive future



Miniere da scoprire



Acqua di mare



Riciclo di scorie

Combinando questi tre fattori, avremmo **riserve di uranio per i prossimi 25 mila anni**

*E poi ci sarebbe anche il **Torio...***

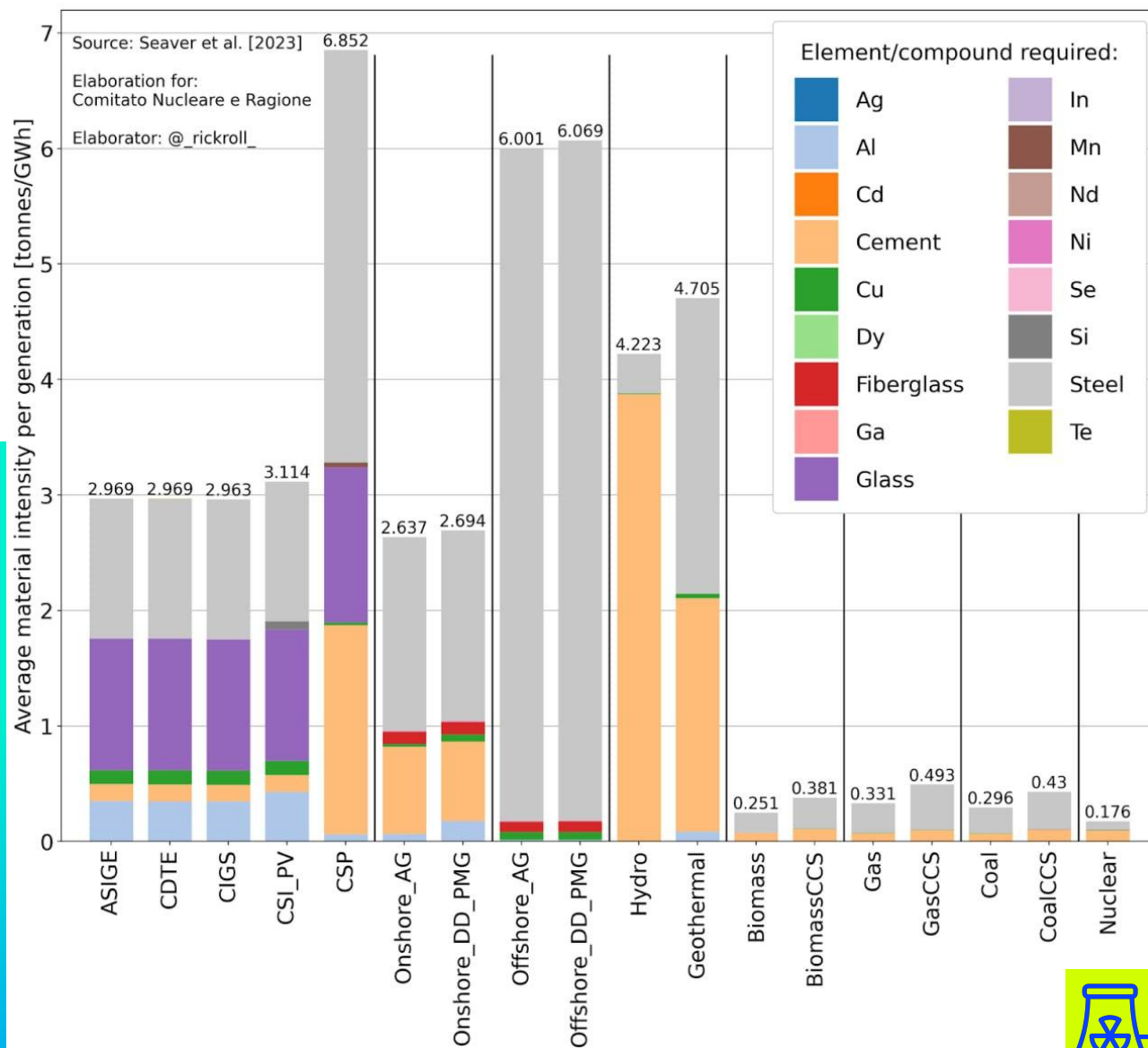
Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

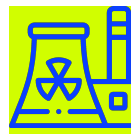
- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
- ~~2. Non sappiamo come gestire le scorie~~
- ~~3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi~~
- 4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione**
5. Può essere usato per la proliferazione militare
6. I costi ed i tempi
7. ...

4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione

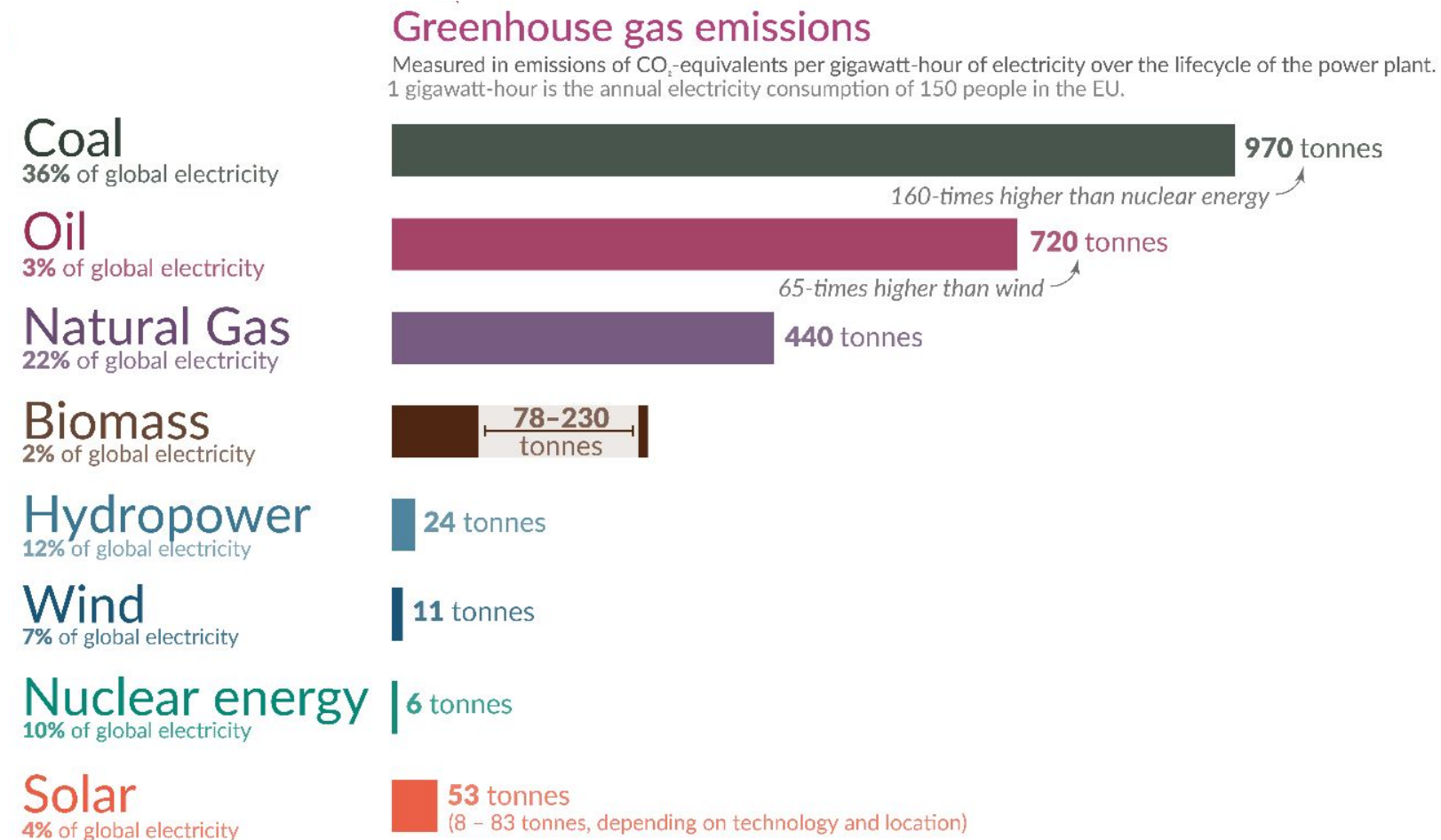
Leonardo Mariano | 2025



La produzione di energia ha sempre un effetto sull'ambiente



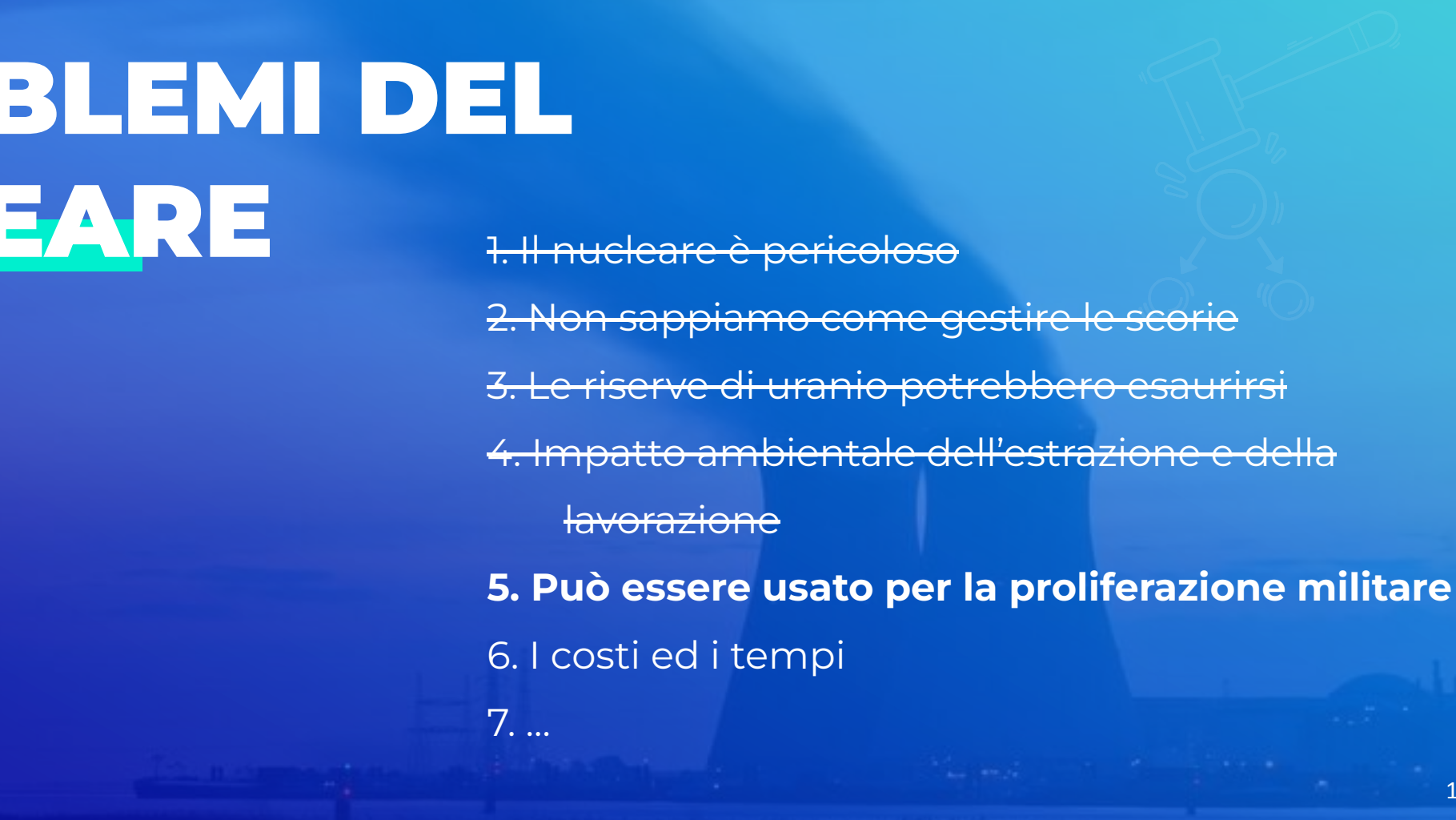
L'impatto ambientale di una fonte dev'essere calcolato sul suo ciclo-vita



Fonte: Our World in Data, 2025

Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

- 
- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
 - ~~2. Non sappiamo come gestire le scorie~~
 - ~~3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi~~
 - ~~4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione~~
 - 5. Può essere usato per la proliferazione militare**
 6. I costi ed i tempi
 7. ...

Non Così Facilmente

200 mln \$

Costo di un ordigno nucleare oggi

90+%

Grado di arricchimento weapon grade

5-8 mld \$

Costo di un reattore nucleare

3-5%

Grado di arricchimento reactor grade

NON CONVIENE!

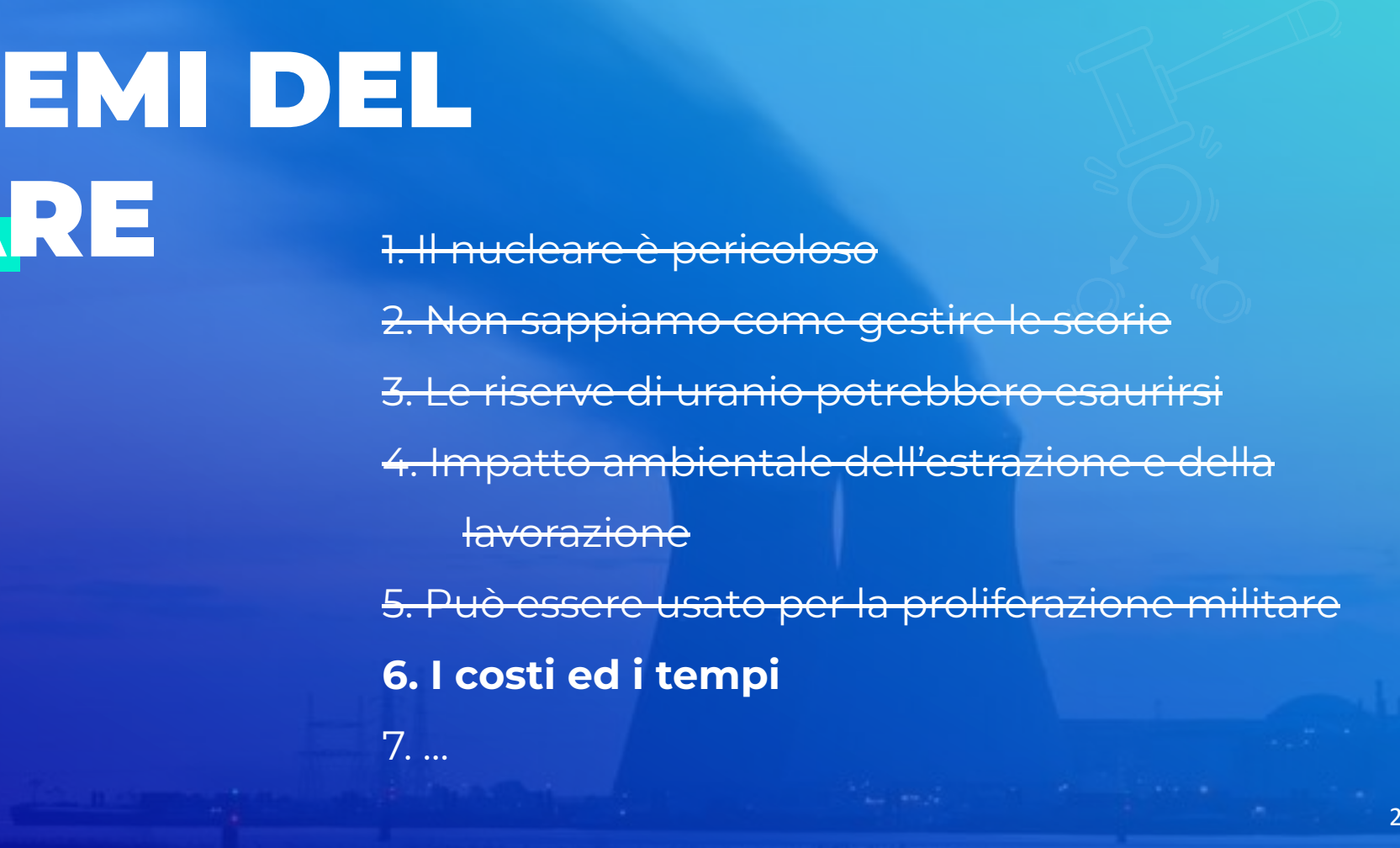
Plutonio per ordigni militari

- Richiede un grado di purezza di **almeno l'80% di isotopo 239**
- Quello che si forma nei reattori contiene **fino al 40% di Pu 240**
- **Non è utilizzabile a scopi militari** a meno di non effettuare cicli combustibili molto rapidi
- I centri di riprocessamento del PU nel mondo sono **pochi e tutti controllati**



Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

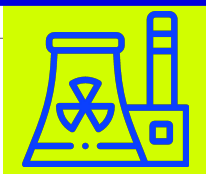
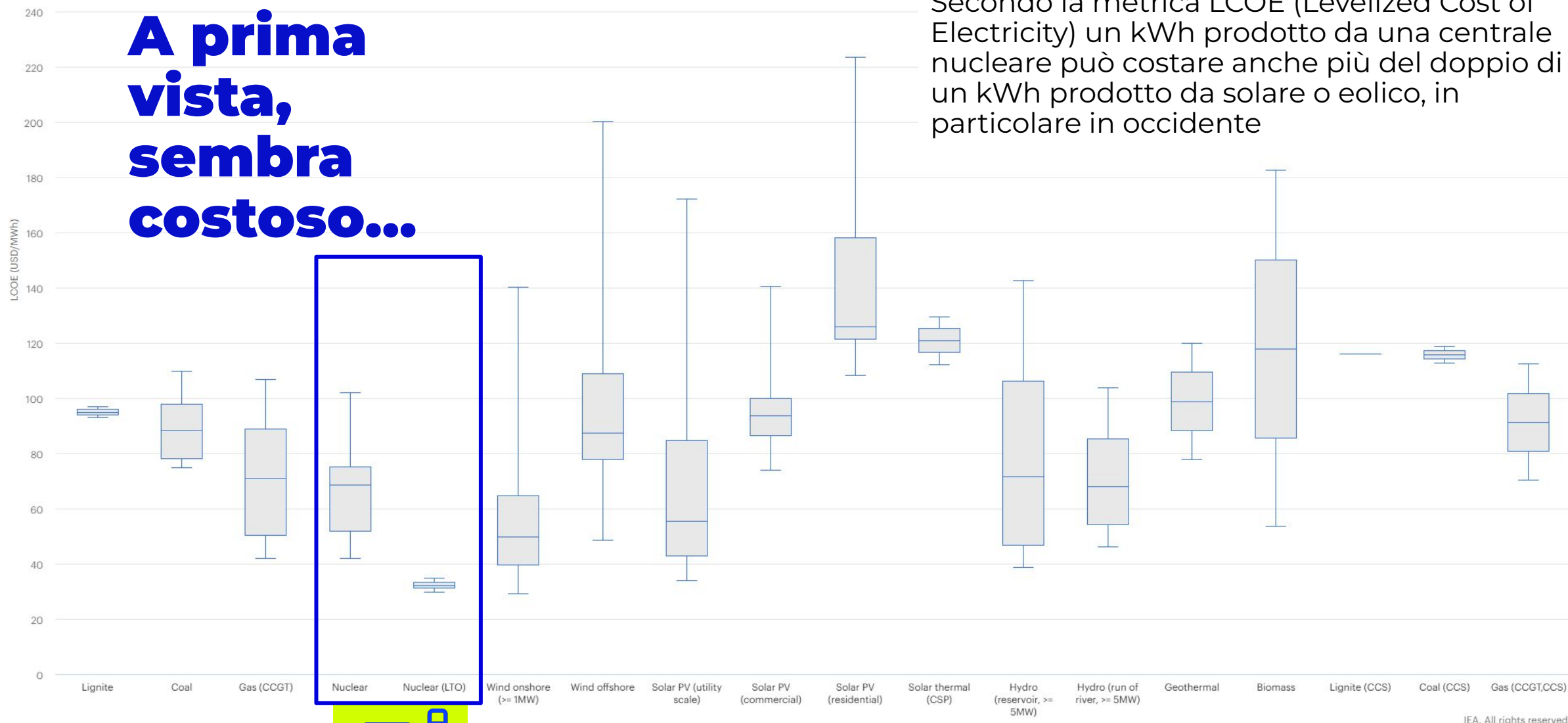
- 
- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
 - ~~2. Non sappiamo come gestire le scorie~~
 - ~~3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi~~
 - ~~4. Impatto ambientale dell'estrazione e della lavorazione~~
 - ~~5. Può essere usato per la proliferazione militare~~
 - 6. I costi ed i tempi**
 7. ...

6. I costi e i tempi

Leonardo Mariano | 2025

**A prima
vista,
sembra
costoso...**

Secondo la metrica LCOE (Levelized Cost of Electricity) un kWh prodotto da una centrale nucleare può costare anche più del doppio di un kWh prodotto da solare o eolico, in particolare in occidente



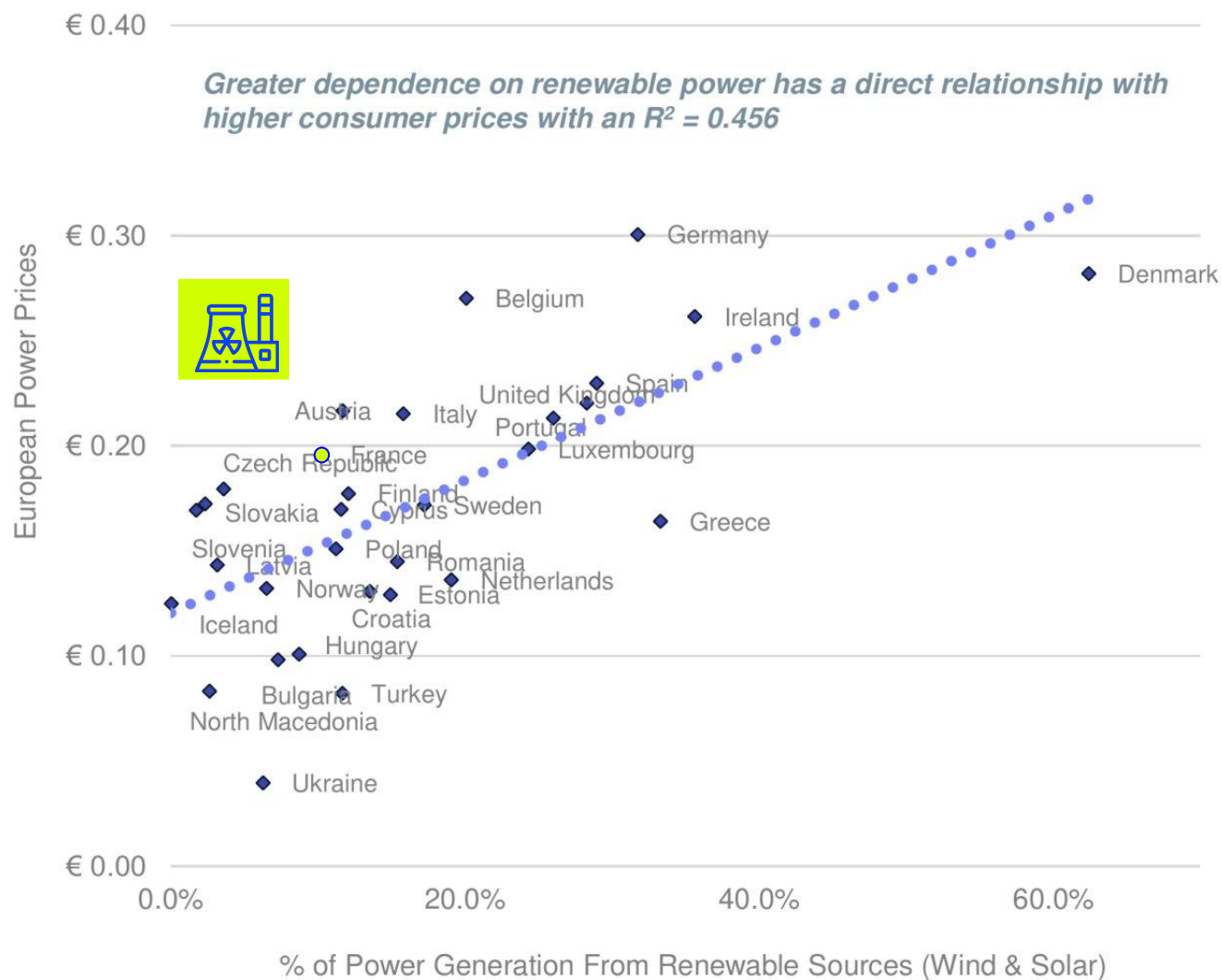
Fonte: IEA, projected costs of generating electricity 2020, LCOE by technology, discount rate of 7%

IEA. All rights reserved.

6. I costi e i tempi

Leonardo Mariano | 2025

**...Ma per i
consumatori
conta il
prezzo, non il
costo**



LCOE non considera:

- i meccanismi di domanda-offerta nella borsa elettrica
- Il calo di valore delle rinnovabili ad alte penetrazioni
- le inter-conessioni necessarie
- I costi di backup
- I costi di storage

6. I costi e i tempi

Leonardo Mariano | 2025

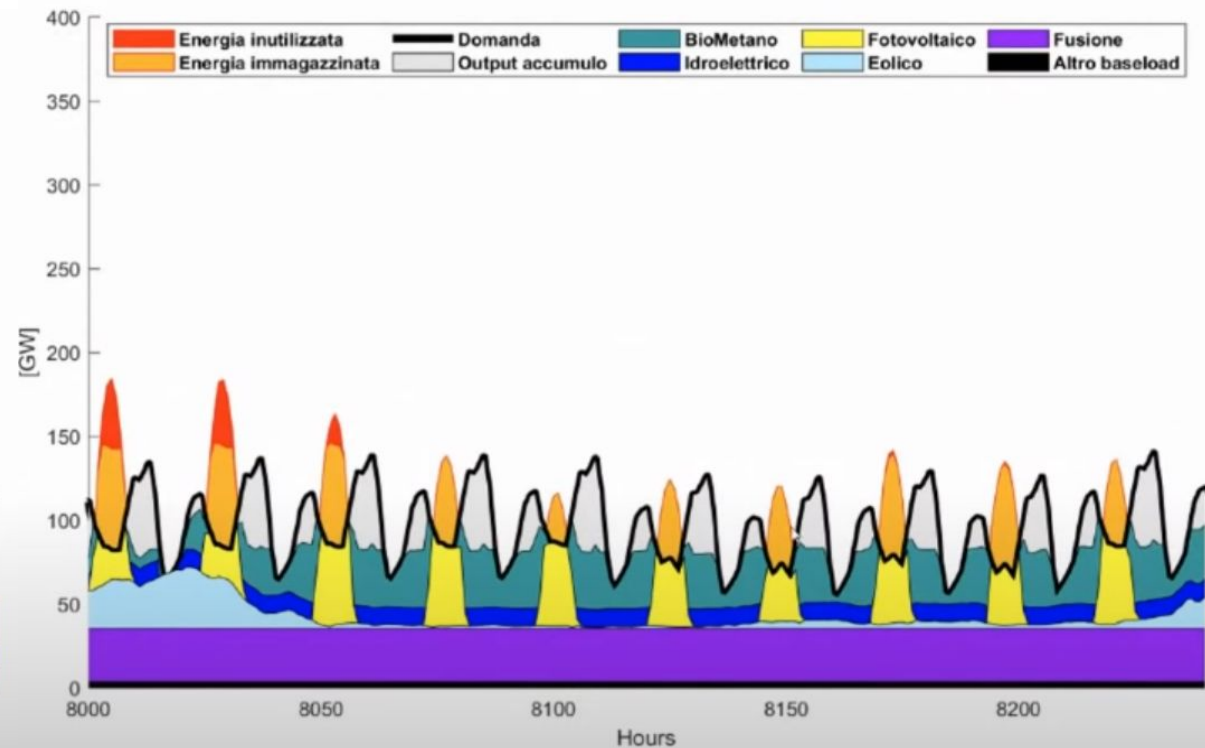
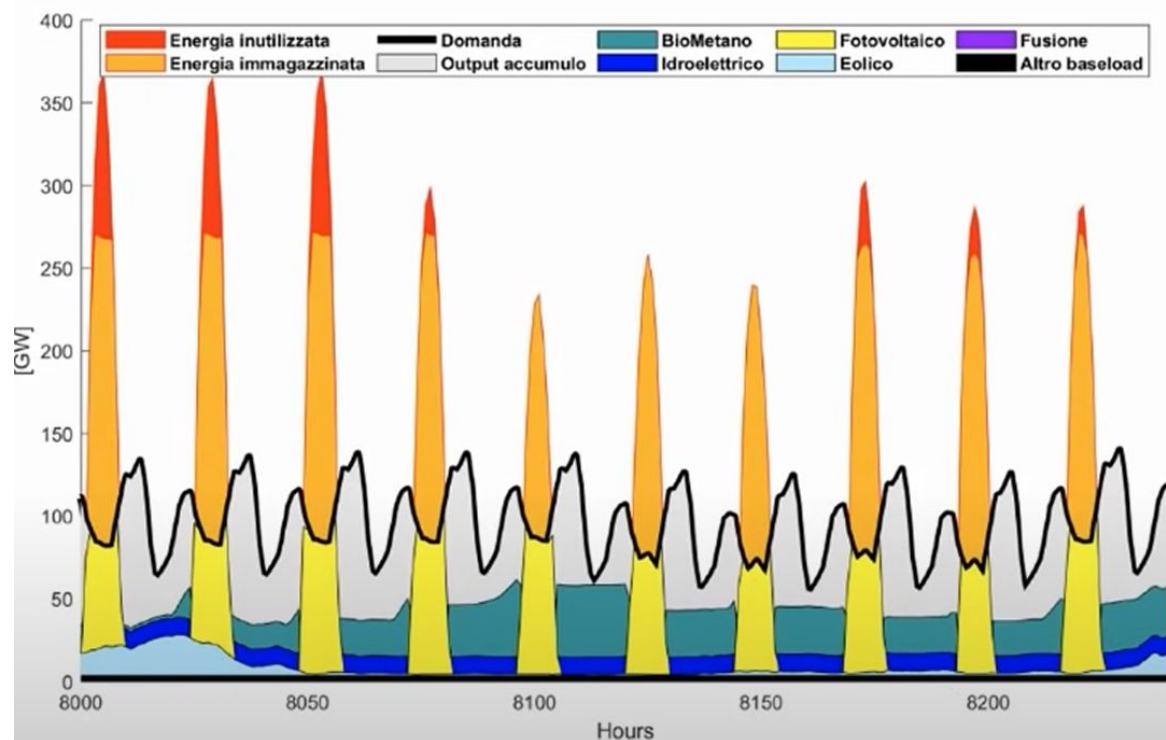
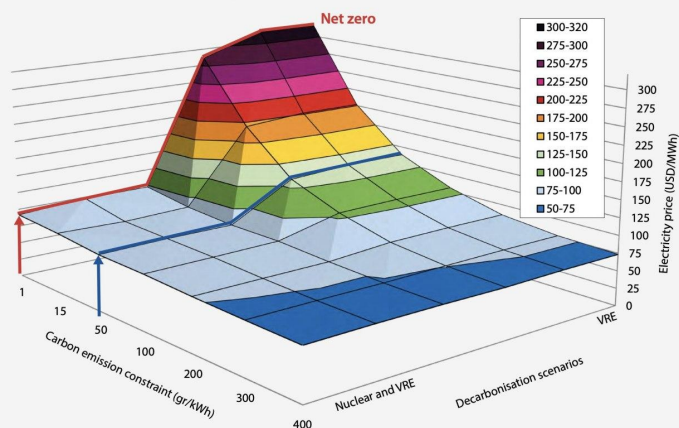


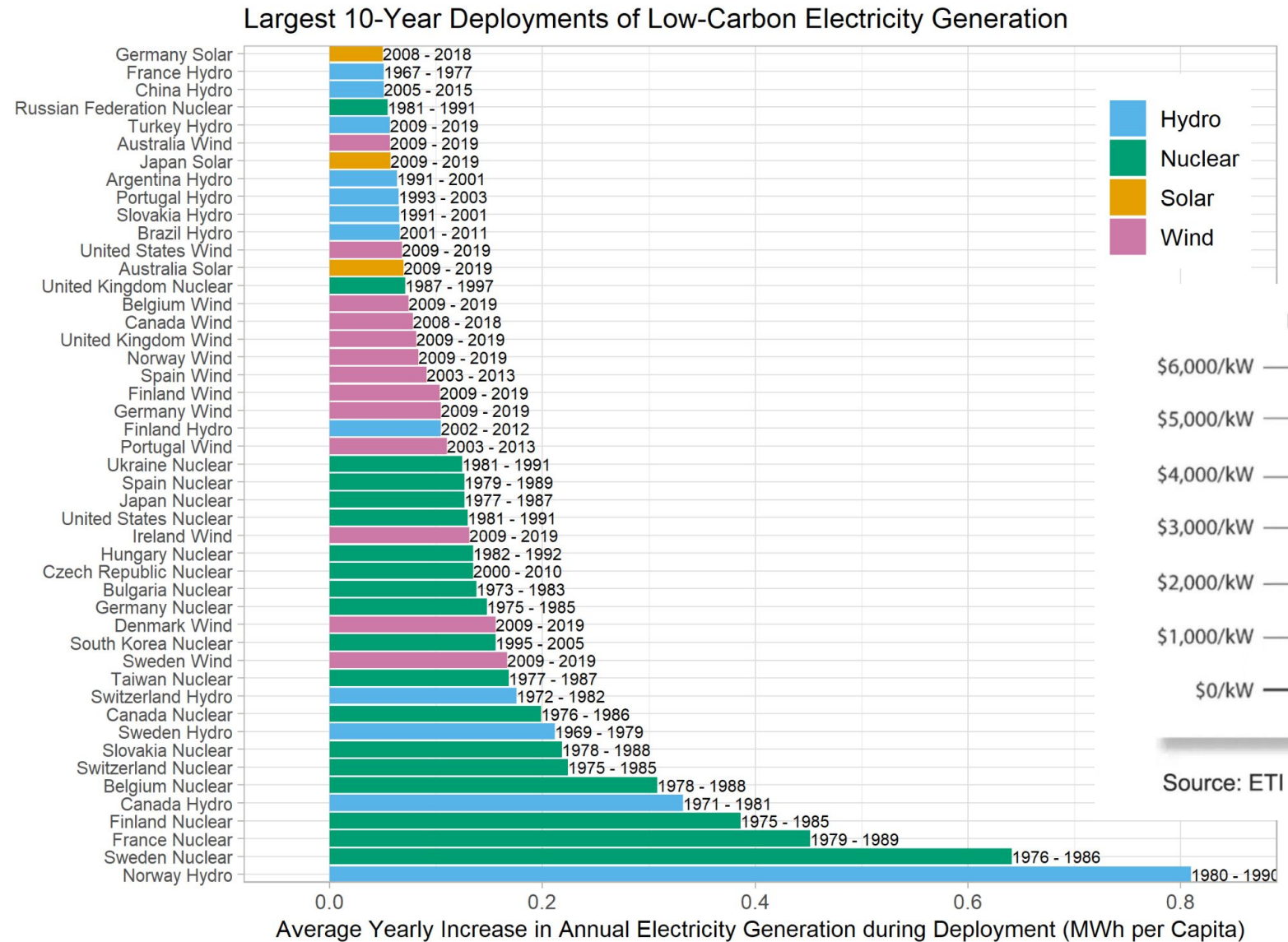
Figure 21. Total costs for different mixes of electricity (driving to net-zero emissions)



Source: Based on Sepulveda (2016).

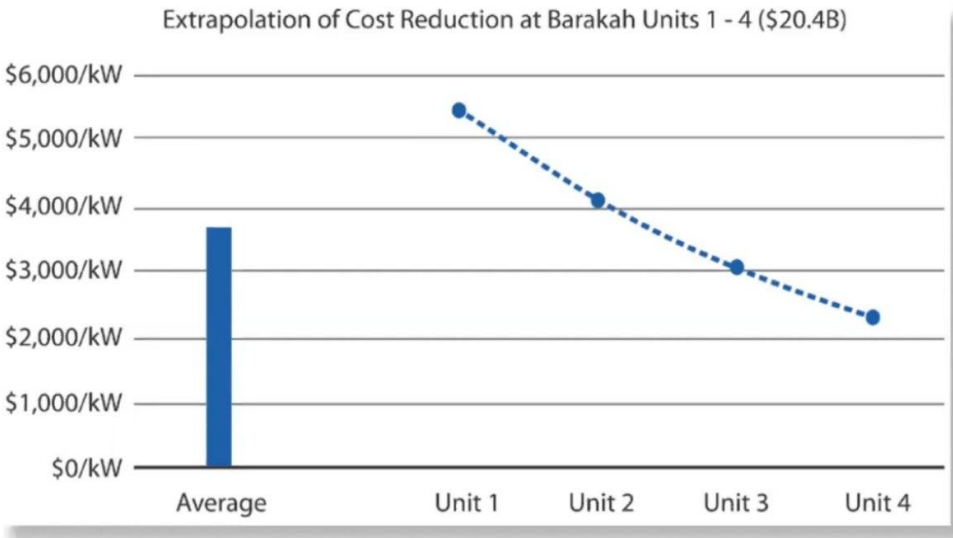
Una fonte low carbon che copre il baseload contribuisce a limitare gli sprechi e gli accumuli necessari

La soluzione?
Un mix di fonti a basse emissioni



Source: @GrantChalmers | BP Statistical Review of World Energy June 2020 | World Bank

Siamo sicuri
che sia
lento?



Source: ETI Nuclear Cost Drivers Study, LucidCatalyst

Parte II

I PROBLEMI DEL NUCLEARE

- ~~1. Il nucleare è pericoloso~~
- ~~2. Non sappiamo come gestire le scorie~~
- ~~3. Le riserve di uranio potrebbero esaurirsi~~
- ~~4. Impatto ambientale dell'estrazione e
—della lavorazione~~
- ~~5. Può essere usato per la proliferazione militare~~
- ~~6. I costi ed i tempi~~
- 7. Le persone temono ciò che non conoscono**

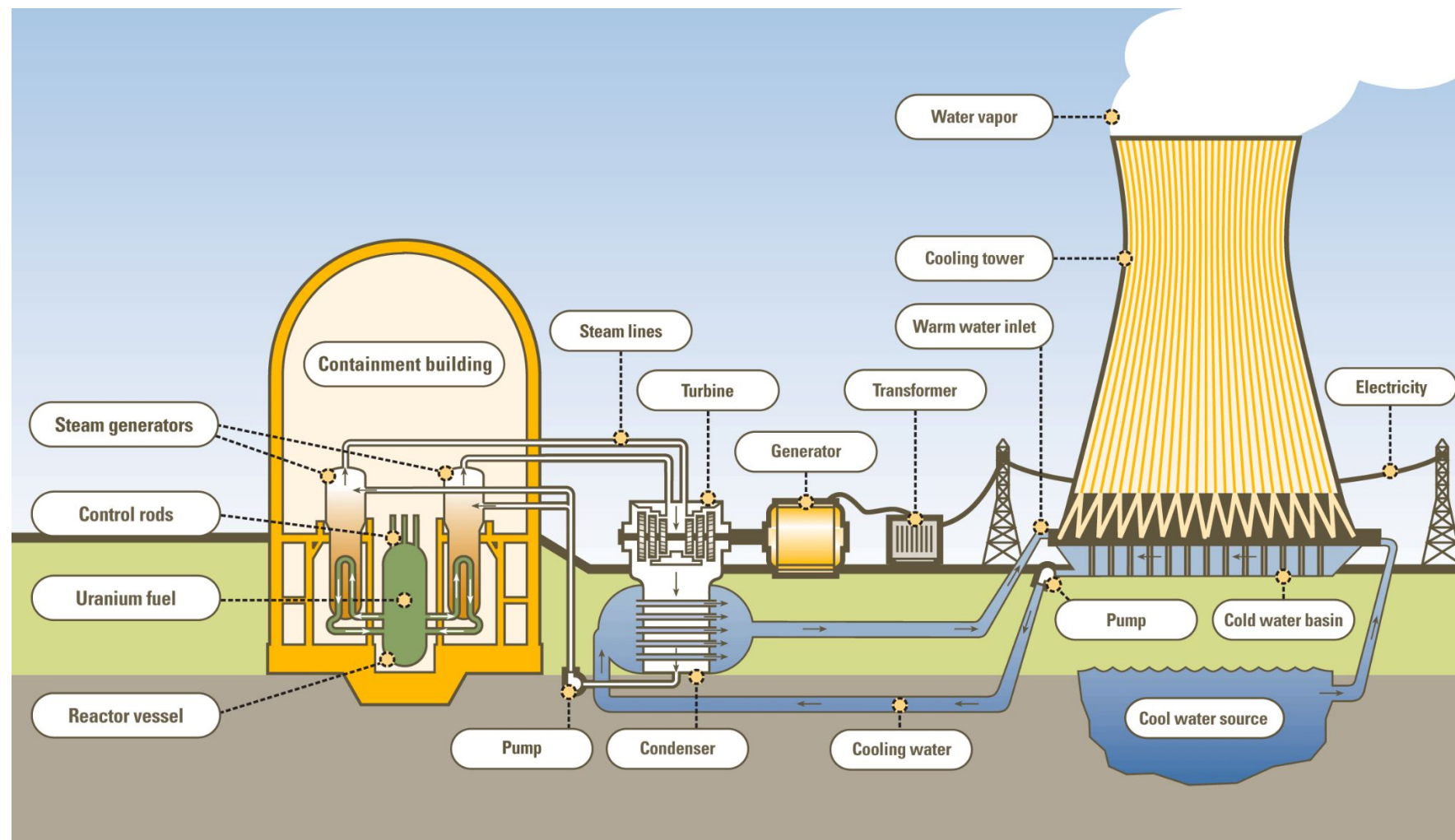
Parte III

REATTORI NUCLEARI DI OGGI (E DEL DOMANI)



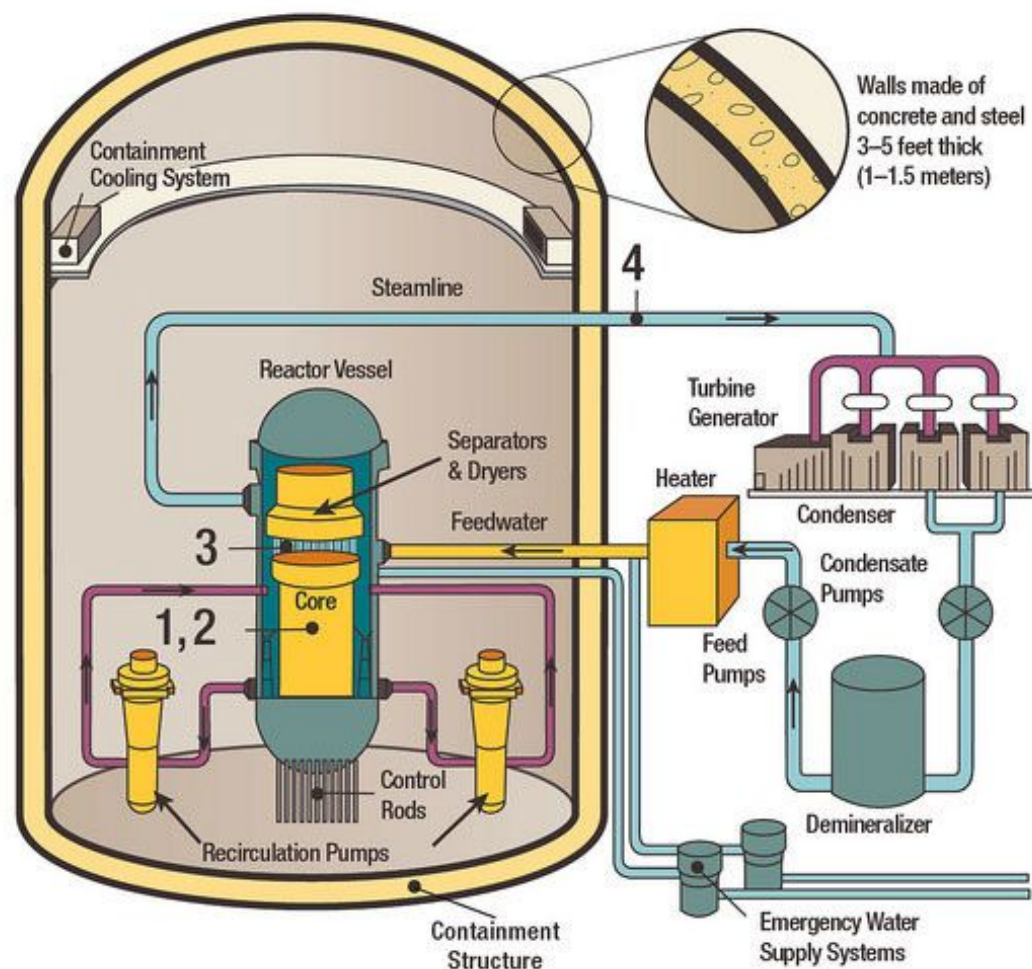
Impianti nucleari for dummies: il PWR

Nel mondo abbiamo al momento in totale **417** reattori nucleari in funzione. Di questi **il 73% è del tipo ad acqua pressurizzata**



Impianti nucleari for dummies: il BWR

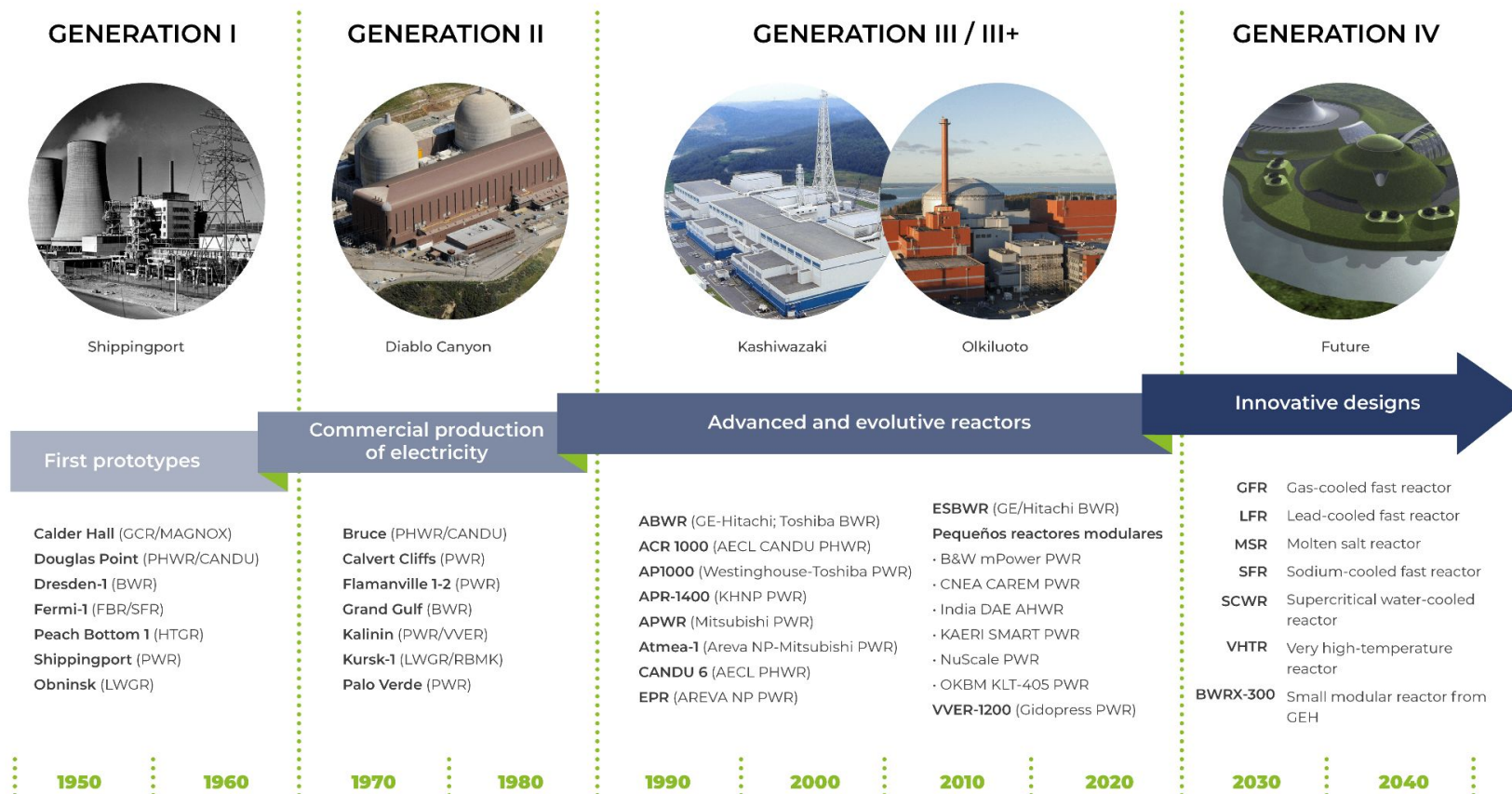
Assieme ai PWR, i BWR fanno parte della famiglia dei LWR. Assieme, compongono l' **84% del totale dei reattori**



La differenza principale dai PWR è che non c'è separazione tra circuito primario e secondario

Le generazioni di reattori

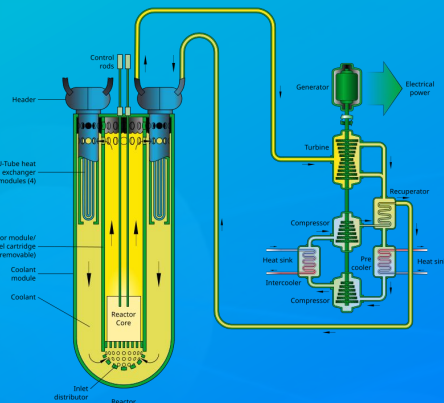
I LWR hanno sino ad ora dominato l'industria dell'energia nucleare, ma negli ultimi anni si sta parlando di nuove tecnologie, definite di **quarta generazione**



Ma cos'è la quarta generazione?

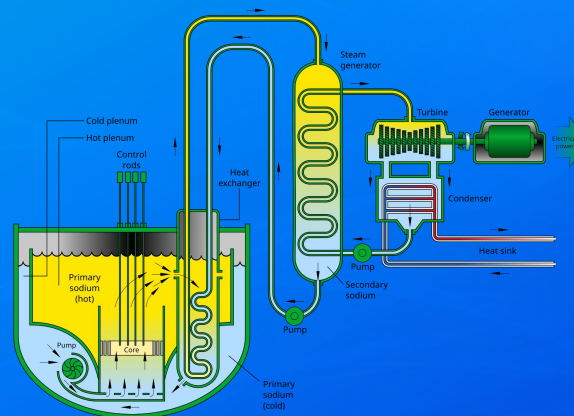
LFR

Lead
Fast
Reactor



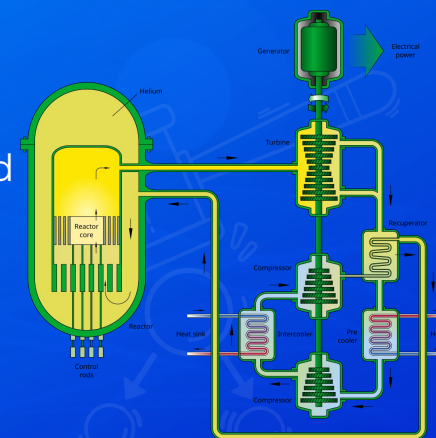
SFR

Sodium
cooled
Fast
Reactor



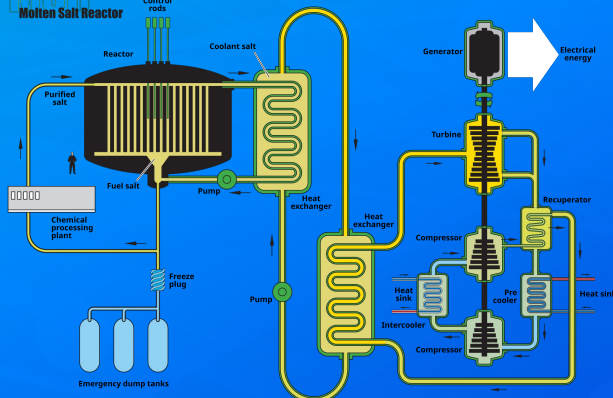
GFR

Gas cooled
Fast
Reactor



MSR

Molten Salt Reactor

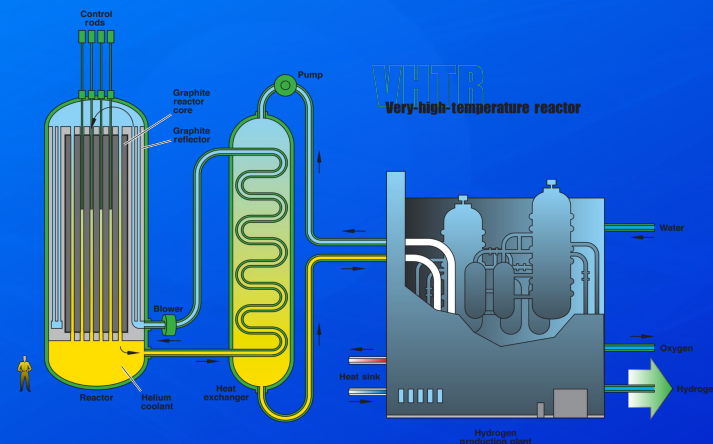


MSR

Molten
Salt
Reactor

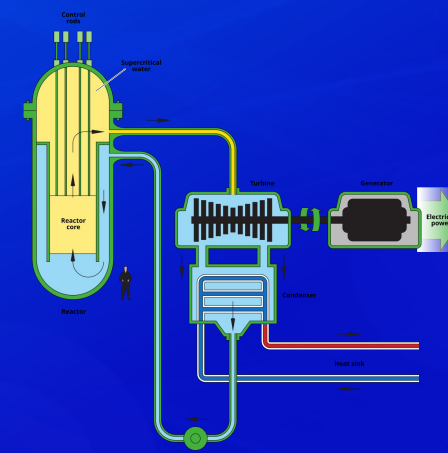
VHTR

Very High
Temperature
Reactor



SCWR

SuperCritical
Water cooled
Reactor



E che cosa ha di così speciale?

	LFR	SFR	VHTR	MSR	SCWR	GFR
Alta temperatura	✓	✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓ ✓
Riciclo delle scorie	✓ ✓ ✓	✓ ✓		✓ ✓ ✓		✓ ✓
Sicurezza passiva	✓ ✓	✓ ✓		✓ ✓ ✓		
Economicità	✓	✓		✓	✓	
Maturità tecnologica	✓	✓ ✓	✓			

E gli SMR?

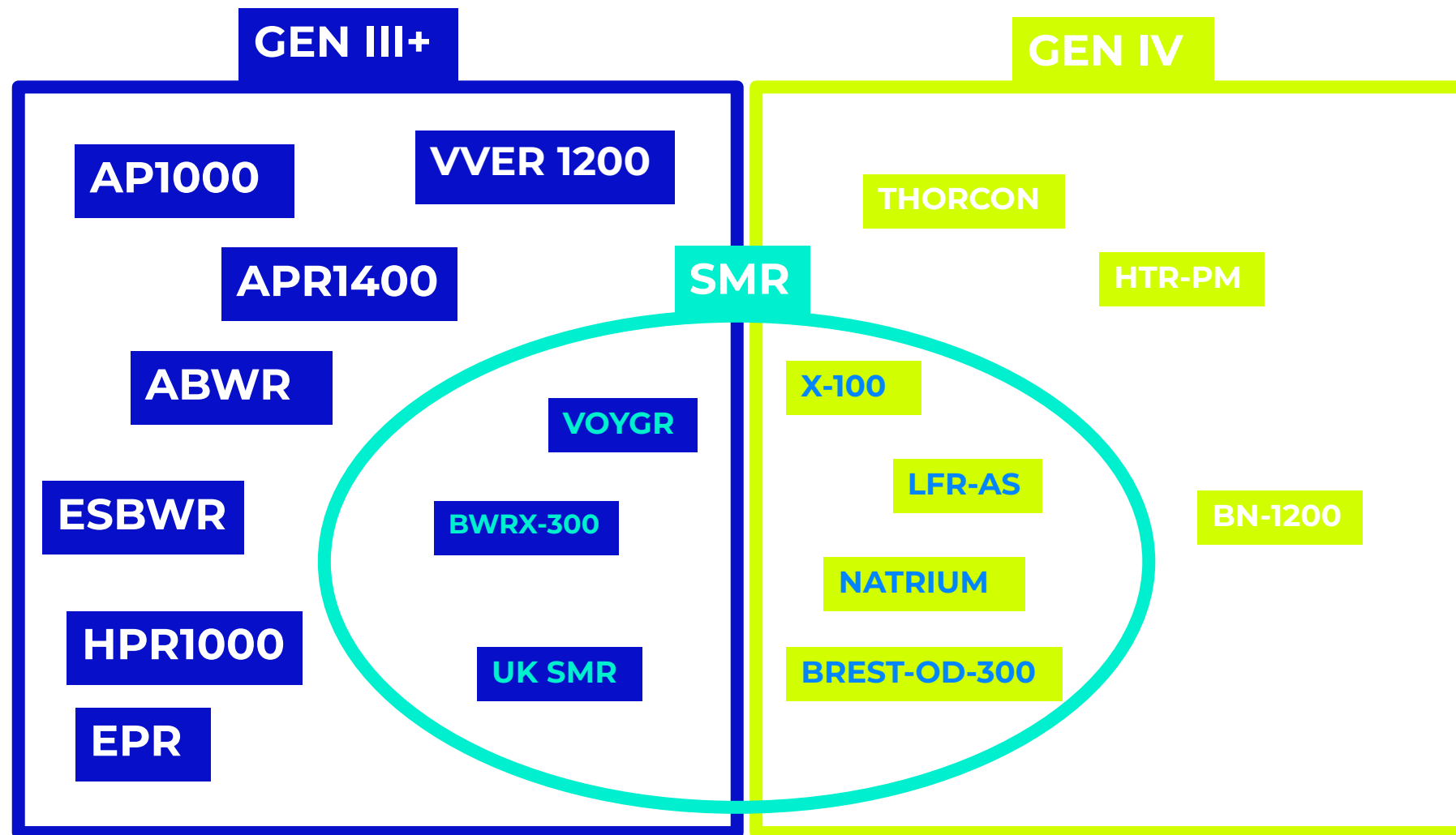
SMR sta per

Small

Modular

Reactor

ed è definito dalla IAEA
come un “reattore
avanzato che produce fino
a **300 MWe di potenza**”



GRAZIE!