

TRANSIZIONE ENERGETICA: QUALE NUCLEARE OGGI E POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

A.Clerici

Presidente onorario di WEC Italia & FAST-Ex Presidente AEIT

CONVEGNO « NUCLEARE PRESENTE E FUTURO » 15 DICEMBRE 2022



SEZIONE di PALERMO



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PALERMO



Society AEIT
per l'Energia Elettrica

**BREVE PREMESSA PER NON
ADDETTI AI LAVORI**

POTENZE

1kW=1000 W -1MW=1000kW- 1GW =1000MW-1TW=1 miliardo di kW

Contatore casa 3 kW --Potenza di generazione elettrica Italia 60 GW

1 phon 2,5 kW Panda 1200-50kW 1 reattore nucleare 1000MW

ENERGIA

Consumo medio /anno di 1 famiglia Italiana 2700 kWh=2,7MWh

Totale produzione di elettricità in Italia circa 300 TWh/anno

Produzione annua di un reattore nucleare da 1000MW = 8 TWh

1MTEP =1 milione tonnellate equivalenti di petrolio=11,7 TWh

FER/RES fonti energetiche rinnovabili --- **FV/PV** fotovoltaico

GREEN DEAL:POLITICA DI UE :0% USO DI FONTI FOSSILI NEL 2050

PNIEC:PIANO NAZIONALE INTEGRATO ENERGIA E CLIMA per adeguamento ad obiettivi UE

Capacity factor di una centrale CF (ore equivalenti alla potenza nominale)

Il *capacity factor* (fattore di capacità) è il rapporto tra l'energia elettrica effettivamente prodotta in un determinato periodo di tempo (generalmente 1 anno) e la potenza di generazione nominale dell'impianto.

Il CF attuale in ore /anno in UE per i diversi tipi di centrale è circa:

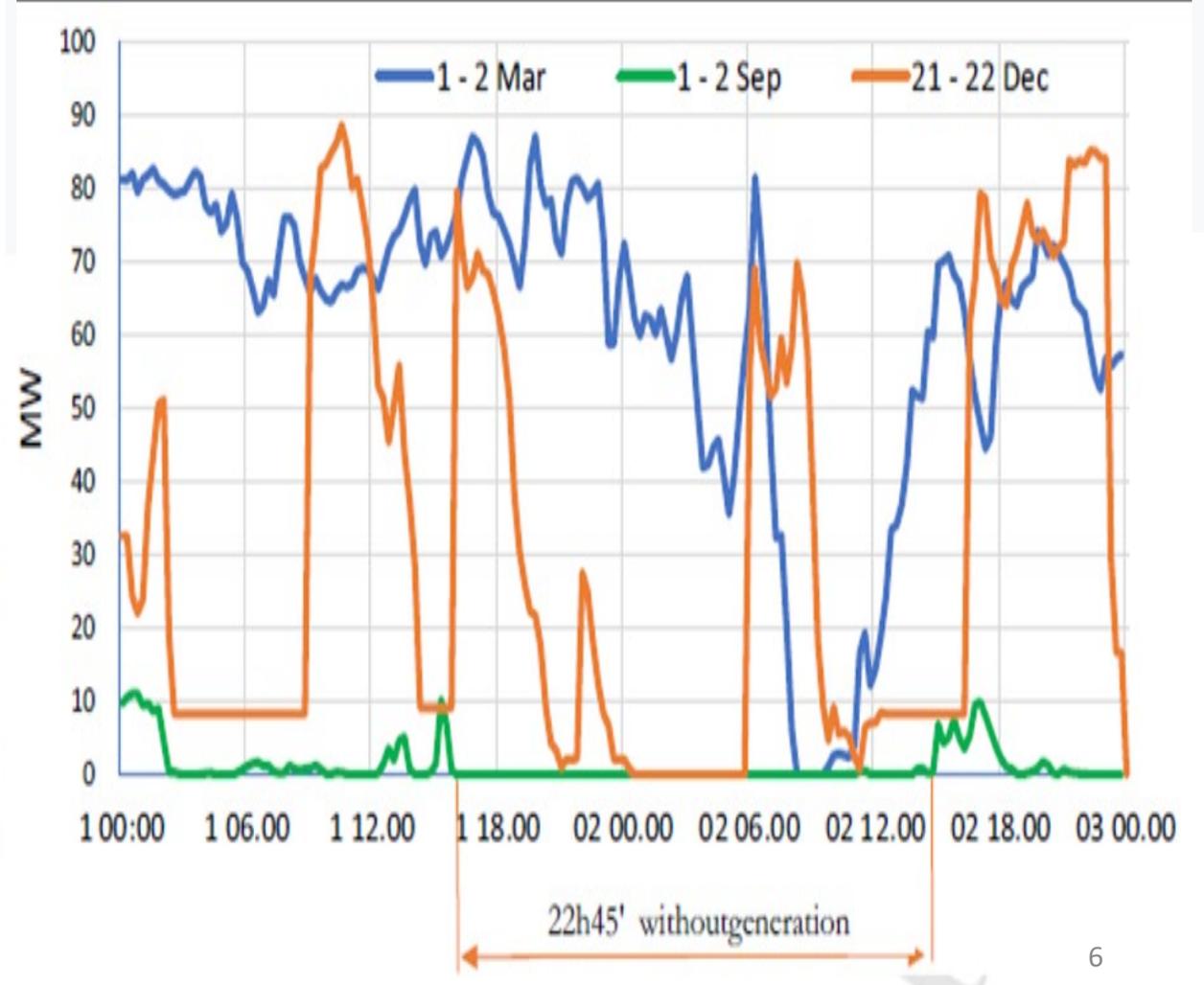
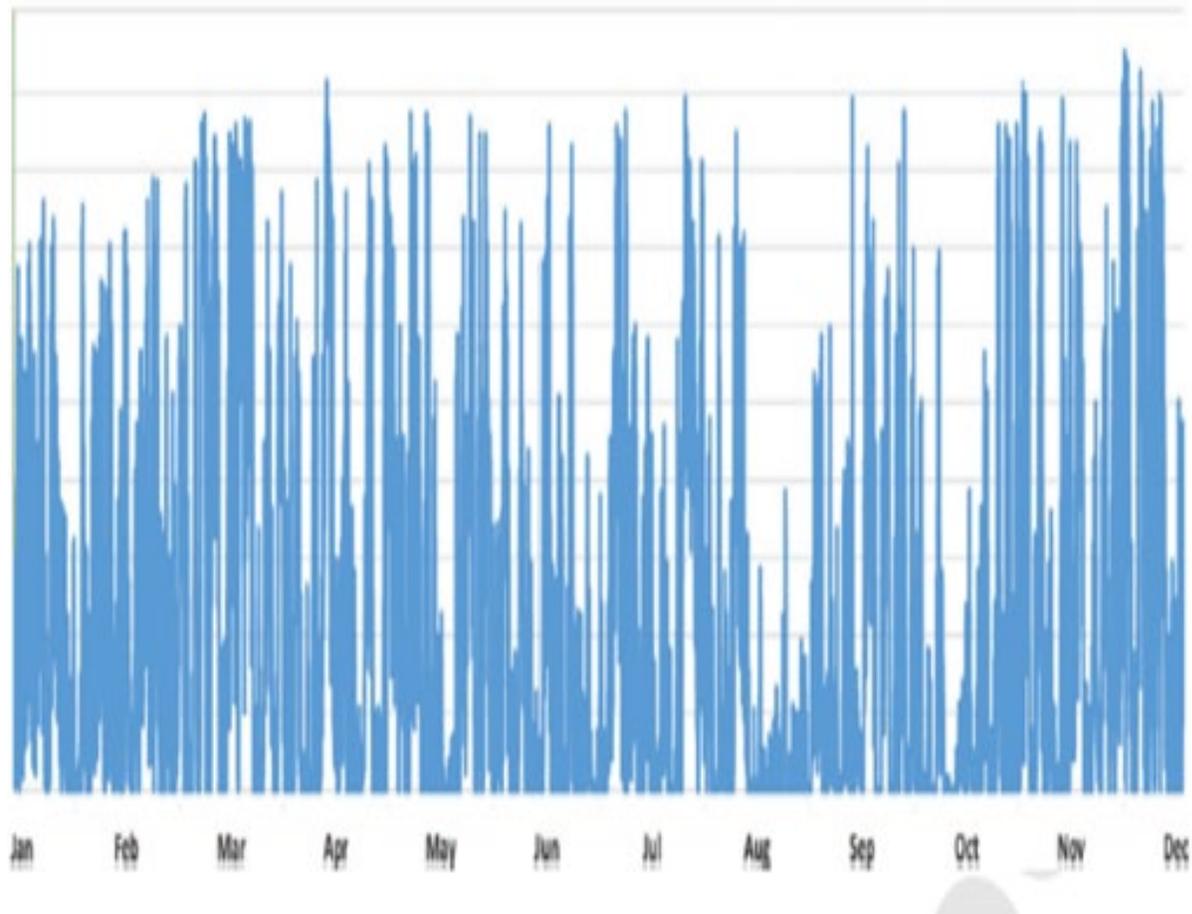
Nucleare	8000	Carbone	5000-6000	Gas	3000-5000
		FV	1000- 1600	Eolico	1800-3800

Valori medi attuali in Italia FV 1150 ore Eolico 2000 e per produrre gli 8TWh/anno di 1000 MW di nucleare occorrono

7000 MW di FV e circa 4000 MW di eolico

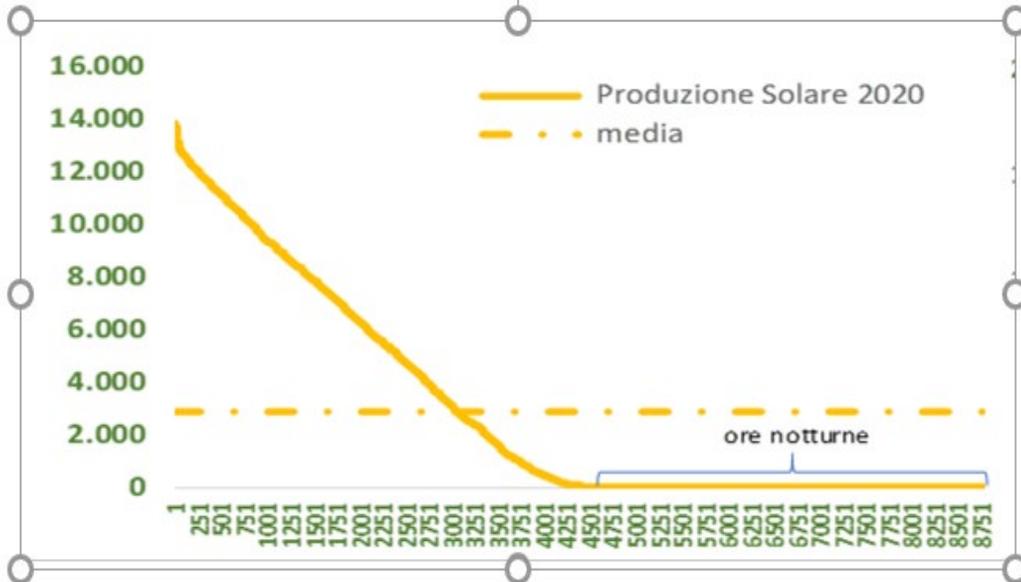
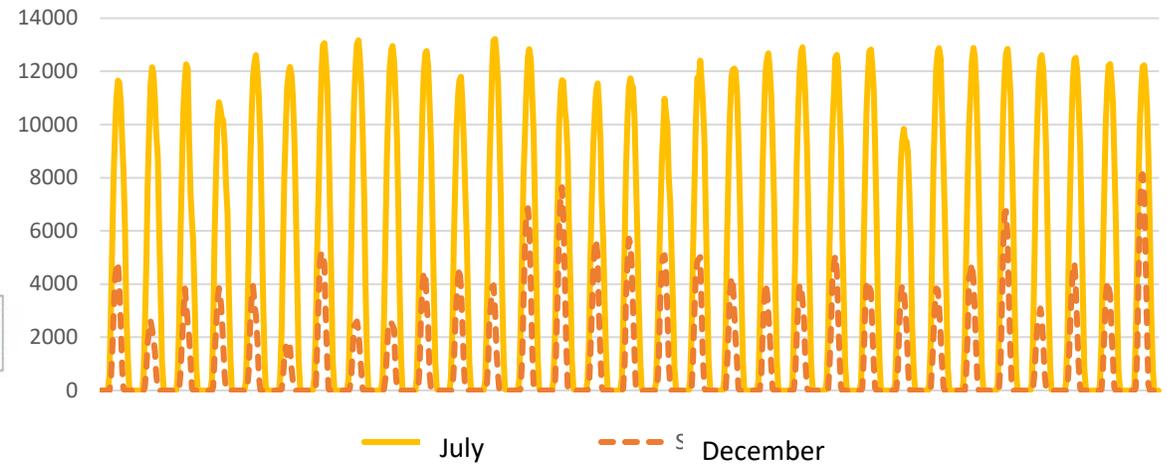
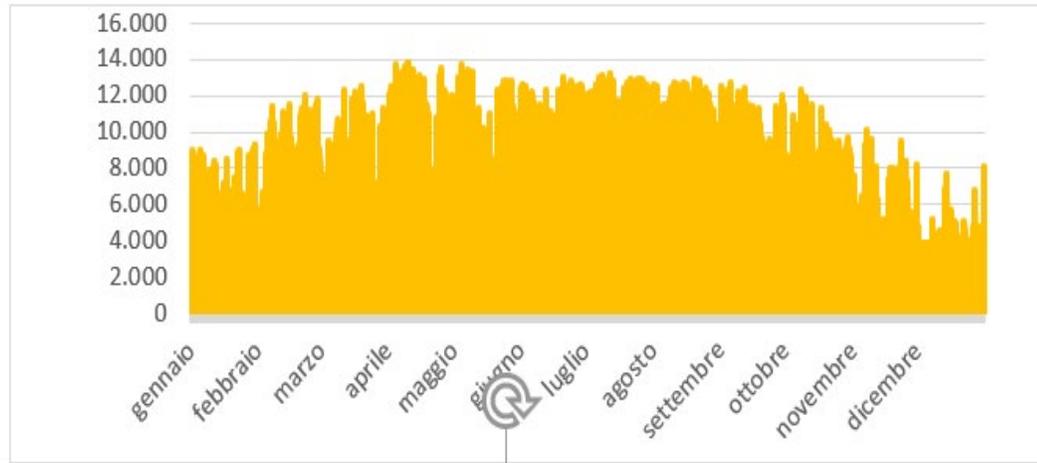
Variabilità e non programmabilità di eolico e fotovoltaico

Centrale eolica da 125 MW nel sud d'Italia- 1500 hours nel 2019 con zero potenza immessa in rete-Produzione annuale (sinistra) e produzione in 2 giornate consecutive di marzo-settembre e dicembre a destra (forti variazioni e rampe in salita e discesa e prolungate ore di assenza di vento in giorni consecutivi)

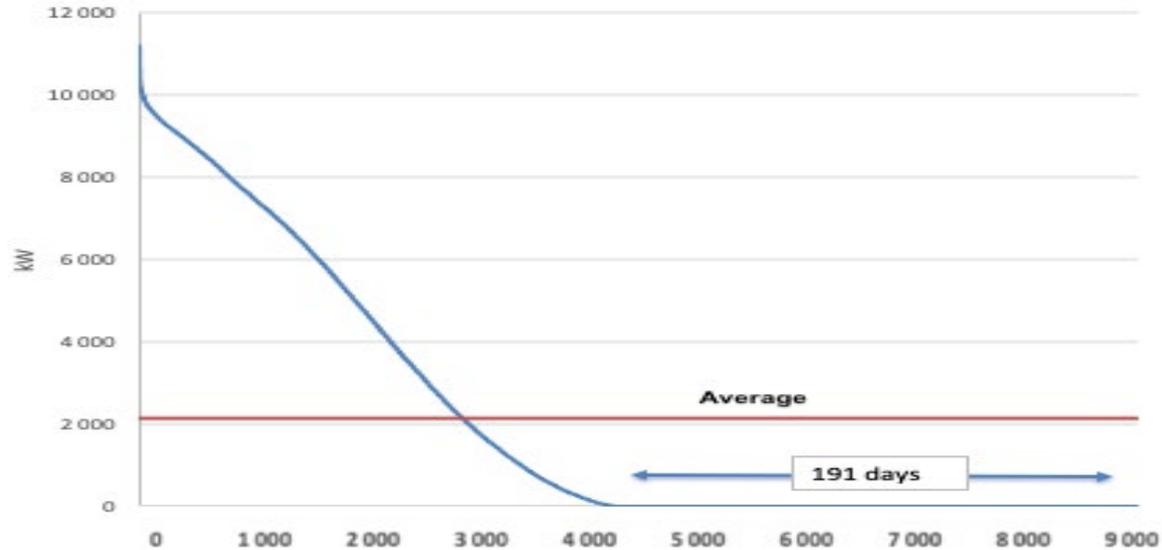


Terna, fotovoltaico iniettato in rete nel 2020 da tutti gli impianti (totale potenza 20850 MW AL 1/1 e 21200 MW AL 31/12- 25,55 TWh)

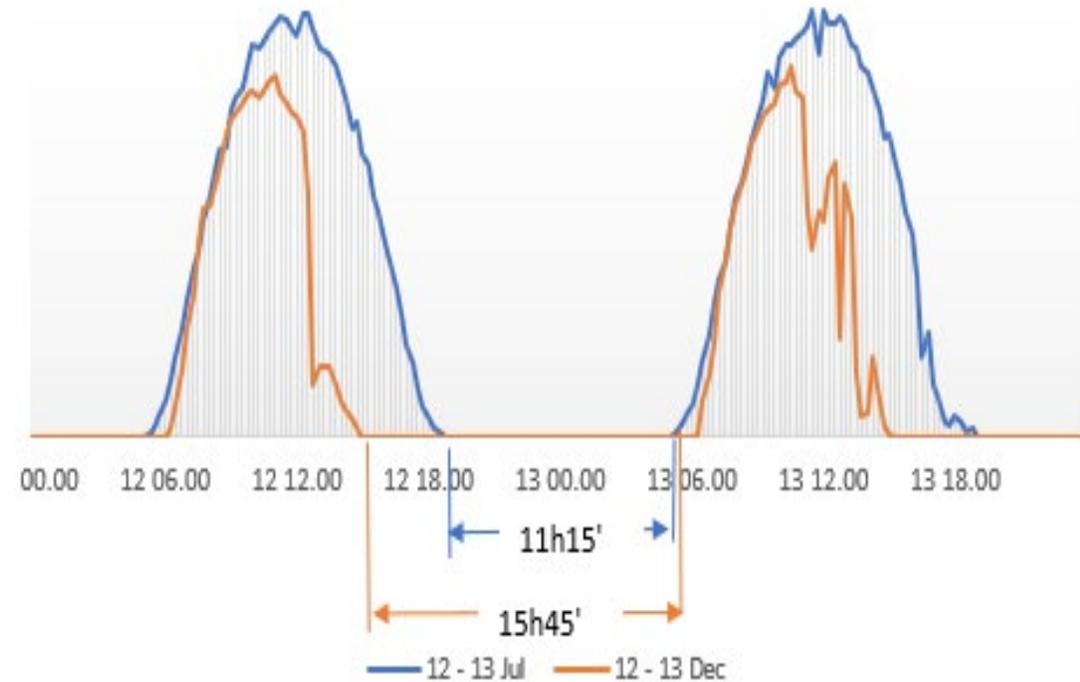
1200 ore equivalenti/anno



Centrale fotovoltaica da 12.5MW in Sicilia (2019)

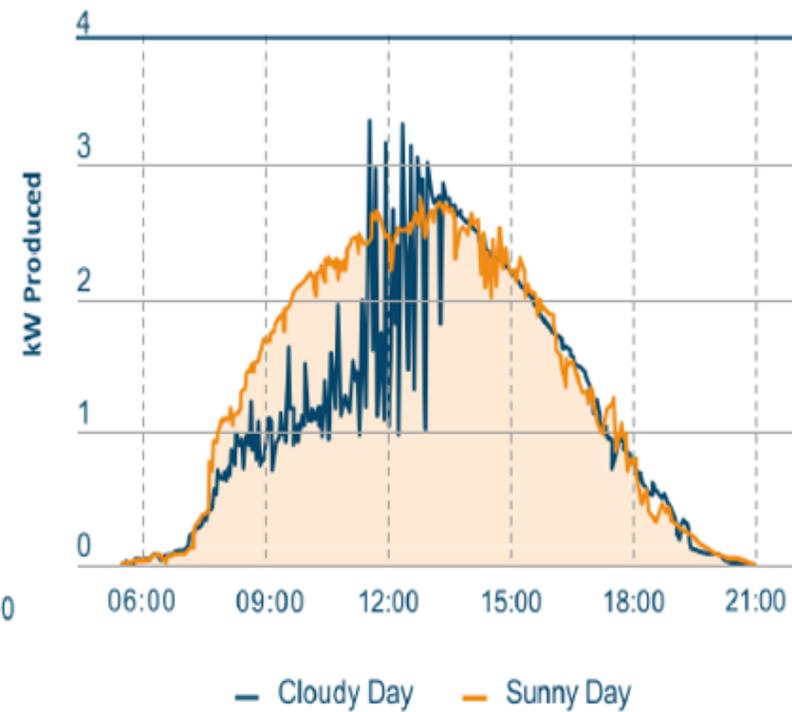
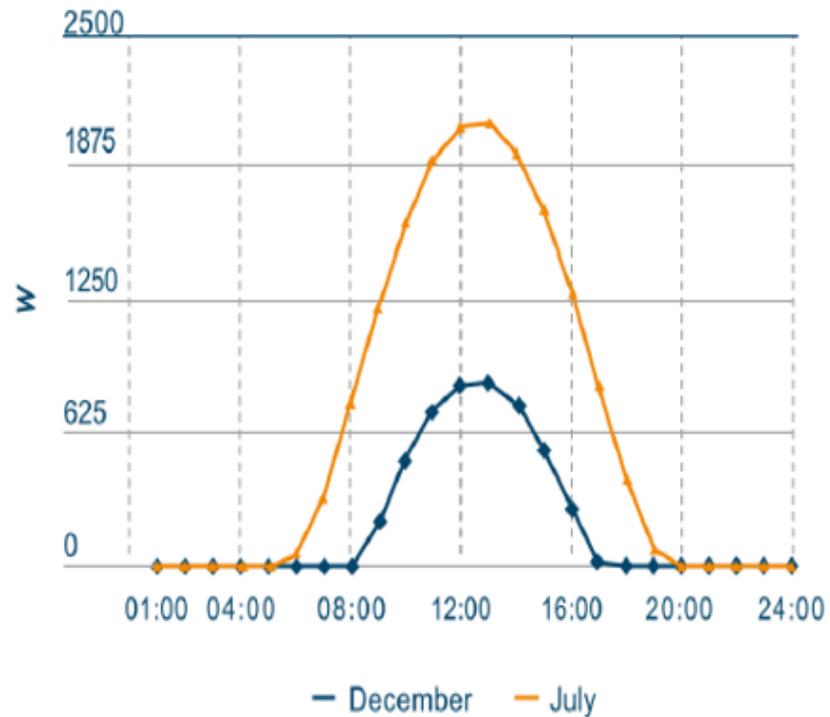


Curva di durata della potenza dall'impianto :per 191 giorni equivalenti non ha prodotto energia .Il capacity factor(in ore equivalenti annuali) pari a 1.500



Potenza immessa in rete durante 2 consecutivi giorni soleggiati rispettivamente in luglio e dicembre e con un periodo notturno di 11 e quasi 16 ore senza produzione di energia. Notare lo sfasamento di 1 ora tra luglio e dicembre dovuto all'ora legale.

Fotovoltaico



Variabilità stagionale e giornaliera della generazione FV nella zona di Firenze di un piccolo impianto fotovoltaico come da rapporto WEC RES Integration

In una giornata soleggiata di dicembre si ha 1/3 di energia immessa in rete rispetto a quella in una giornata soleggiata di luglio come da diagramma a sinistra-

Da figura a destra si vede l'effetto di nubi passeggere

INTRODUZIONE

Le politiche energia-clima avevano riportato un'attenzione al nucleare privo di emissioni di gas ad effetto serra anche se il timore di nuovi possibili incidenti ed il problema della lunga vita di scorie altamente radioattive permanevano nell'accettazione da parte delle popolazioni di varie nazioni, tra le quali l'Italia in prima fila.

La crisi energetica iniziata nel secondo semestre 2021, con prezzi alle stelle dei combustibili fossili specie in UE e in particolare del gas, e aggravata a livello geopolitico con l'invasione russa dell'Ucraina, ha portato in diverse nazioni e anche in Italia a vari pronunciamenti a favore di un nucleare spesso non ben definito; ciò abbinato a spinte a un'indipendenza energetica e ad un'accurata diversificazione di approvvigionamenti di energie per fonte e provenienza

Tale possibile “rinascimento” va inquadrato nel sistema energetico globale e della UE.

Si riportano risorse energetiche primarie ,loro consumi e produzione di elettricità a livello mondo ed UE con dati consolidati al 2021

Si riassume brevemente la storia dalle origini del nucleare e si riporta la situazione annuale del 2021 e dettagli sulla situazione al 2/12/2022

Risorse ,consumi e costi dell'uranio e LCO del MWh da nucleare in UE

Si passano in rassegna sviluppi futuri con piccoli reattori nucleari(SMR),Generation IV Reactors e fusione.

Cenni sulla posizione dominante della Russia nel nucleare mondiale

RISORSE ENERGETICHE

CONSUMI DI ENERGIE PRIMARIE E PRODUZIONE DI ELETTRICITA' NEL MONDO ED IN EU

- **L'energia** è stata ed è sempre più **il fattore dominante per lo sviluppo sociale ed economico delle popolazioni : legame diretto tra energia e sviluppo .**
- **Il legame tra energia ed ambiente sempre più stretto ;** politica energetica connessa a quella ambientale e viceversa
- **La popolazione mondiale nel novembre 2022 ha superato i 9 miliardi (360.000 nati/giorno e 120.000 abitanti in più ogni giorno)**
 - **Nei 10 anni dal 2011 al 2021(anno recupero post pandemia)**
- **la popolazione** è aumentata del **12%(0,094% 2021/2020)**
- **i consumi di energia primaria +14% (+5,8% 2021/2020)**
- **le emissioni di CO2 + 6%(+5,9% 2021/2020)**
- **la produzione di elettricità + 28%(+6,2% 2021/2020)**

Il settore elettrico ha e avrà un ruolo sempre più importante

RISERVE DI ENERGIE PRIMARIE FOSSILI (da WEC 2018)

Le risorse (R) comprovate ed i loro consumi (C) hanno ancora un rapporto R/C:

petrolio ~ 50 anni

gas ~ 55 anni

carbone ~ 150 years

“Proven resources for oil and gas are in 2018 around 50% larger than 20 years ago even with the substantial consumptions in the last 2 decades. **Predictable resources for unconventional oil and gas are very large** **Real problem is not the lack of possible fossil fuel resources** (peak oil production is out of fashion with respect to a peak oil demand) **but :their uneven distribution** between production and consumption areas (mainly oil and gas) **and the geopolitical effects** and **mainly how to burn them without impact on the environment**”

L'ostracismo negli ultimi anni a tutte le risorse non rinnovabili ha ridotto drasticamente gli investimenti in nuove localizzazioni e /o sviluppi di energie fossili creando problemi di sicurezza degli approvvigionamenti a livello globale.

L'Italia ed anche l'Unione Europea stanno attraversando un particolare periodo caratterizzato dall'influenza su economia e sviluppo da 4 principali eventi:

1) Gli obiettivi UE di decarbonizzazione e per l'idrogeno verde

2) Aumento dei costi di materie prime energetiche e non, dal secondo semestre 2021

3) Invasione dell'Ucraina da parte della Russia: sicurezza e costi di approvvigionamento specie di gas dal principale fornitore e forti impatti sul futuro geopolitico mondiale

4) Strascichi degli effetti di pandemia, con timori di recrudescenze/varianti, già costati svariati miliardi di debiti statali

CONSUMI DI ENERGIA PRIMARIA ED EMISSIONI DI CO2 NEL 2021

45% industria(cica 2/3 per produrre elettricità)- 30% edifici- 20%trasporti - 5% altro

Consumi di energie primarie (globale 595 Exa Joules =14.212 MTEP) e produzione di energia elettrica (globale 28.466 TWh) nel **2021** in vari raggruppamenti di nazioni in % dei valori mondali ed **emissioni di CO2 in rosso** (Fonte: BP[]))

	Domanda En.primarie Emissioni	Produzione elettricità	Domanda En.primarie Emissioni	Produzione elettricità	Domanda En.primarie Emissioni	Produzione elettricità
	% MONDO		CRESCITA MEDIA ANNUA % 2011-2021		CRESCITA % 2021 SU 2020	
Mondo	100 100	100	1,3 0,6	2,5	1,3 5,9	6,2
Paesi non OCSE	61,4 66,7	60,6	2,4 1,7	4,4	2,4 6,2	8,2
Paesi OCSE	38,6 33,3	39,4	-0,2 -1,3	0,2	-0,2 5,4	3,1
EU	10,1 8,1	10,2	-0,6 -1,9	-0,1	-0,6 6,7	4,5
Italia	1,1 0,9	1,0	-1,2 -1,2	-0,5	-1,2 9,9	2,7

Consumo di energie primarie e produzione lorda di energia elettrica nel 2021:

Percentuale locale delle principali categorie di fonti rispetto al totale consumo/produzione per ogni gruppo di paesi .In blu la prima fonte di energie primarie ed in rosso quella per produzione di energia elettrica (Fonte BP)

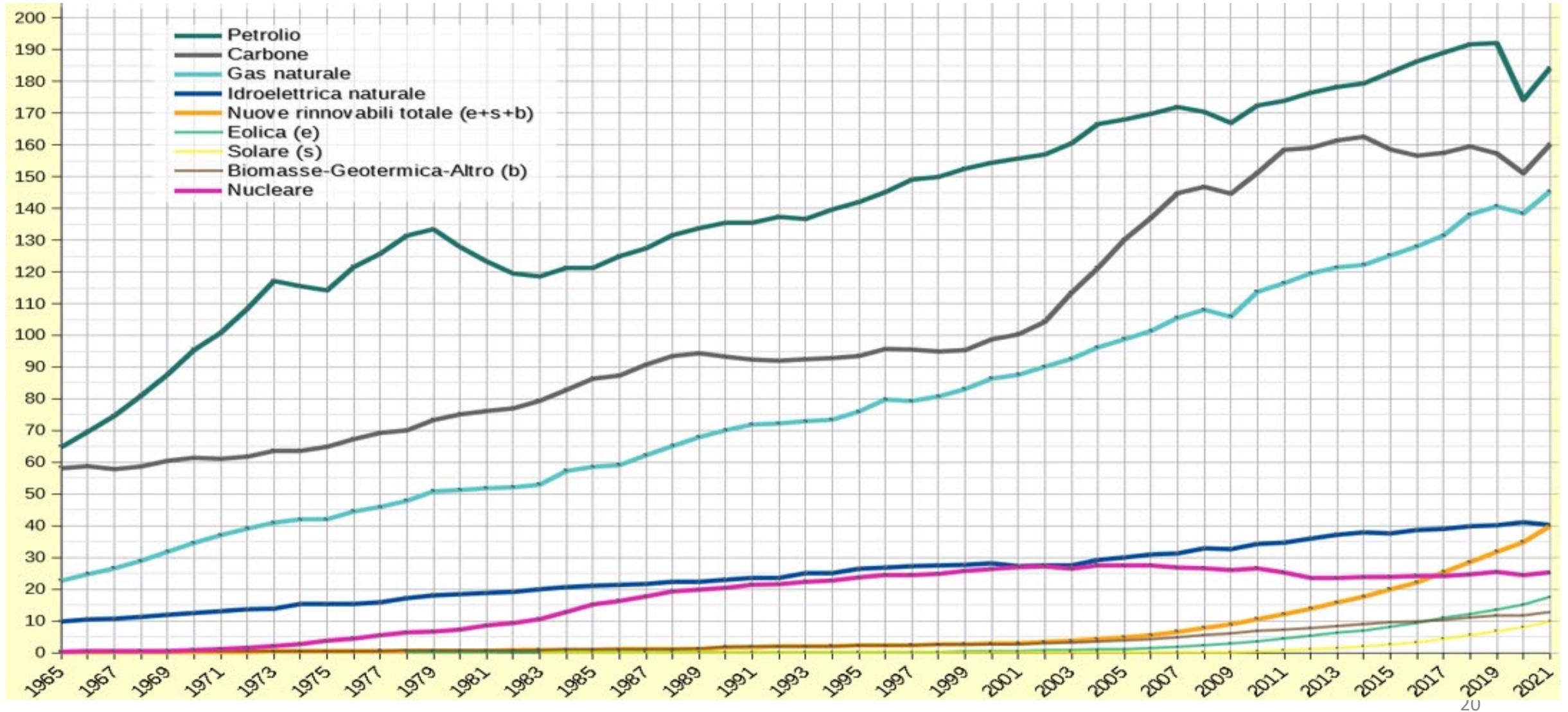
	Energie Primarie	Produzione Elettricità										
	PETROLIO		GAS		CARBONE		NUCLEARE		IDROELETTRICO		ALTRE FER	
Mondo	30,9	2,5	24,4	22,9	26,9	36,0	4,3	9,8	6,8	15,0	6,7	12,8
Paesi non OCSE	27,5	3,3	22,1	18,2	35,7	46,3	2,2	5,1	7,3	16,4	5,1	10,1
Paesi OCSE	36,3	1,3	28,1	30,1	11,6	20,1	7,5	17,0	5,9	12,8	9,2	17
EU	35,5	1,5	23,8	18,9	11,2	15,2	11,0	25,3	5,4	11,9	13,2	25,2
Italia	36,9	2,9	41,0	50,9	3,6	5,0	0	0	6,4	15,0	11,9	25

%	Energia primaria	Produzione di elettricità (con quota % nucleare)	Emissioni di CO ₂	Popolazione
Cina	26	28 (5)	29	18
USA	16	16 (20)	15	4,2
UE	12	12 (26)	10	5,7
India	6	6 (3)	7	17,5
Africa	3	3 (1,5)	1	16

Per consumi di energie primarie (e quindi emissioni) **saranno i paesi non OCSE ed emergenti** (con la loro necessità di aumentare notevolmente i consumi per lo sviluppo delle loro popolazioni) **a condizionare la transizione ecologica.**

La UE conterà meno del 6% nelle emissioni nel 2030 ed il suo azzeramento per il 2050 porterà un contributo insignificante alla soluzione del problema globale se non cambierà indirizzo spostando gli sforzi da una visione eurocentrica (che porta a non competitività oltre a non soluzione del problema climatico) a investimenti con le BAT (Best Available Technologies) in paesi emergenti con enorme bisogno di energia.

Consumo Mondiale di energia primaria per fonte in EJ dal 1965 al 2021 (da luca_p@gmx.com- grafici.altervista.org basati su dati BP) -1 EJ =24MTEP



A livello mondiale il petrolio dal 1965 in poi la principale fonte primaria, seguito dal carbone e dal gas; **le 3 fonti fossili complessivamente presentano una quota dell'82,2 % nel 1965, dell'85% nel 2000 e dell'82,3% nel 2021 del totale consumo di energie primarie**, mostrando come il processo di decarbonizzazione sia lento

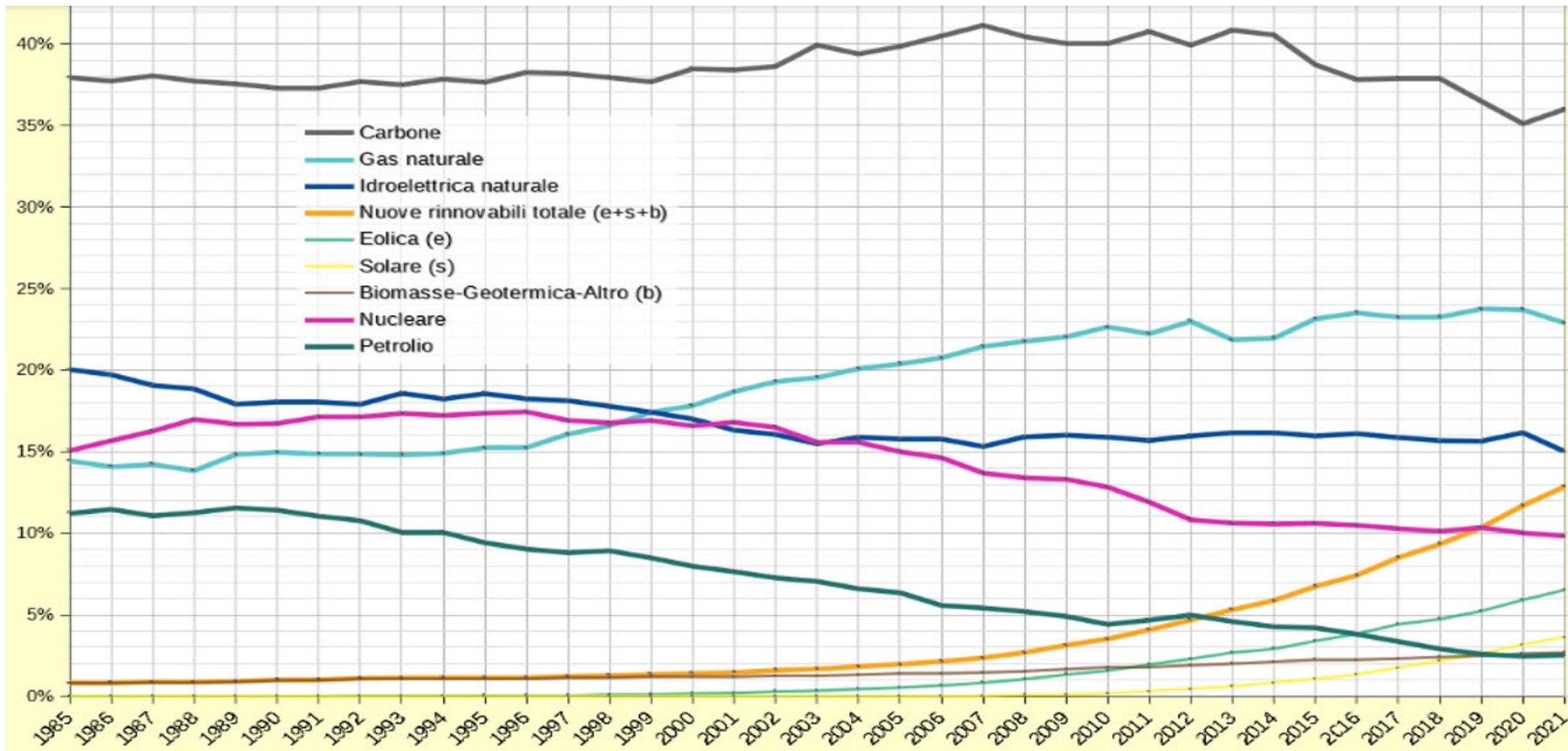
. Occorre notare che il **carbone** ha avuto una forte impennata nel decennio 2010-2020 da una quota del 25% a circa il 31% per il forte sviluppo in Cina

. **L'idroelettrico** risulta la quarta fonte primaria al 2021 con una quota praticamente costante intorno al 7% ed è stato raggiunto nel 2021 dalle **altre rinnovabili** (eolico, solare, biomasse ed altro) con eolico e fotovoltaico intorno al 3% e 2% rispettivamente

-**Il nucleare** è salito da una quota praticamente 0% nel 1965 ad un 5% nel 1985 (anno precedente al disastro di Chernobyl) salendo poi lentamente con una quota del 7% al 2002 per iniziare una ridiscesa al 5% nel 2021, accelerata nel 2011 dall'evento di Fukushima; con il loro prorompente sviluppo, la produzione di energia primaria dalle altre rinnovabili rispetto all'idroelettrico ha superato in quota quella dal nucleare nel 2017/18.

Occorre notare che i consumi globali di energie primarie hanno avuto nel 2020 un forte crollo in 1 anno dovuto al COVID 19, crollo mai registrato come entità e come percentuale dai dati dal 1965 in poi e fondamentalmente relativo al petrolio (crollo quasi del 10%) ed in parte a carbone e gas.

Produzione mondiale di elettricità per fonte in % della totale produzione dal 1985 al 2021 (da luca_p@gmx.com- grafici.altervista.org basati su dati BP)



Nel settore produzione di elettricità il **carbone domina a livello mondiale** con una quota al 2021 del 36% dopo aver raggiunto il 41% nel periodo 2007-2013 -**E' seguito dal gas** che è salito da una quota del 15% nel periodo 1985-96 al 23% del 2021 diventando la seconda fonte nel 2019.

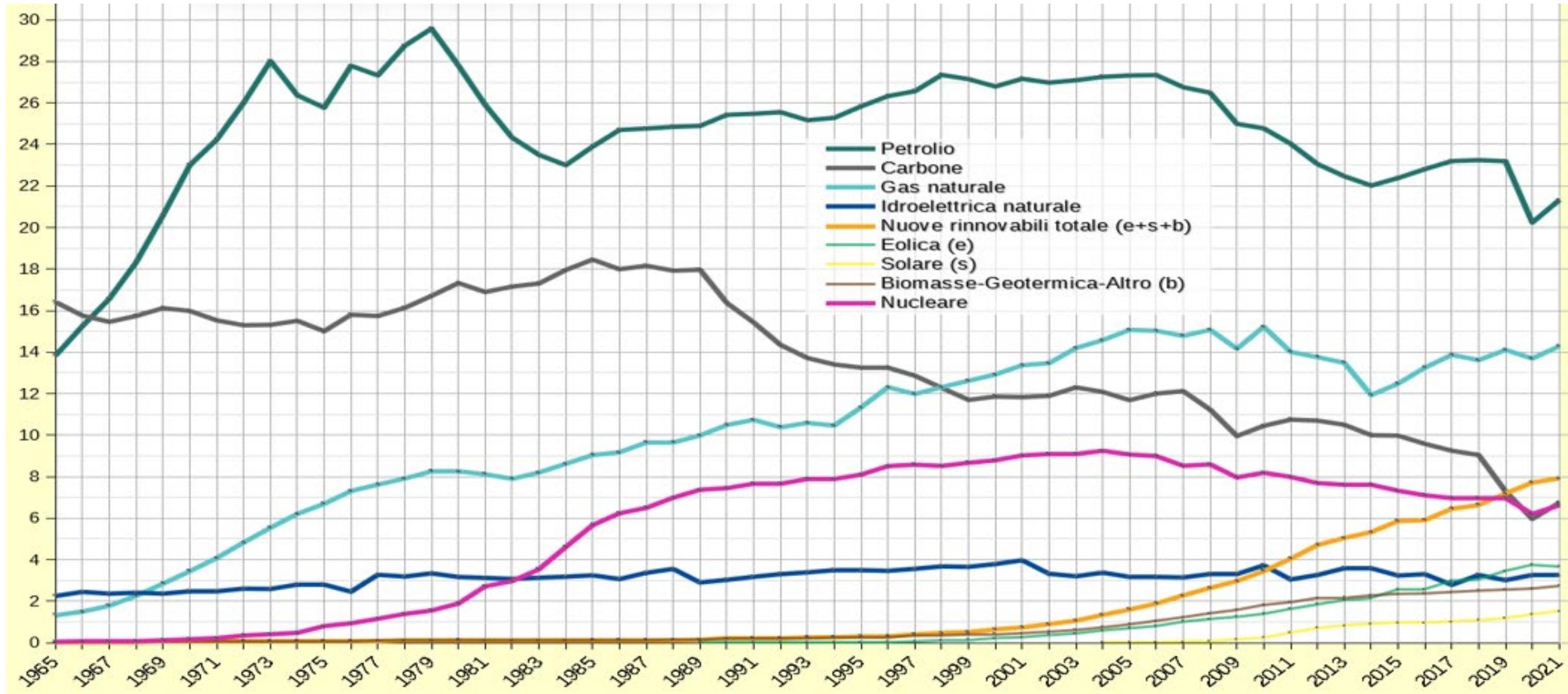
L'**idroelettrico** dal 20% del 1985 e seconda fonte fino al 2000 circa e' sceso al 15% del 2021 seguito dalle **altre rinnovabili** al 13% (con **eolico al 6,5% e solare a circa il 4%**) che hanno avuto dal 2% del 2000 un incremento esponenziale.

Il nucleare, terza fonte di produzione elettrica fino al 1998 con quote fino a circa il 17% è sceso al 10% nel 2021 e dal 2019 ha prodotto meno elettricità delle altre rinnovabili

Il **petrolio** è crollato ad una quota a poco meno del 3% rispetto all'11% del 1985

Complessivamente **le fonti fossili vedono una quota del 64% nel 1985, del 65,3% nel 2000 e del 62% nel 2021;** dal 2000 al 2021 eolico + solare hanno compensato la perdita in quota del **nucleare+petrolio**

Consumi di energia primaria per fonte in UE in EJ dal 1965 al 2021 (da luca_p@gmx.com- grafici.altervista.org basati su dati BP)



Nei consumi di energie primarie il **petrolio** è di gran lunga la fonte dominante in UE con una quota salita dal 41% del 1965 al 54% del 1973 per poi scendere al **35,5% del 2021**

Il **carbone** dominante con una quota del 53,5% nel 1965 ha avuto una rapida perdita fino al 30% nel 1973, venendo superato dal petrolio nel 1966-67 ; è seguita una progressiva discesa in quota fino al 19% del 1999 quando è stato superato dal gas ed ha raggiunto nel 2021 una quota dell'11% pari a quella del nucleare ed inferiore di 2 punti percentuali rispetto alle nuove rinnovabili alternative all'idroelettrico diventando praticamente la quarta fonte.

Il **gas** è salito rapidamente dal 4% in quota del 1965 all'8% del 1975 per salire poi progressivamente al 24% del 2021 diventando la seconda fonte di energia primaria a partire dal 1999.

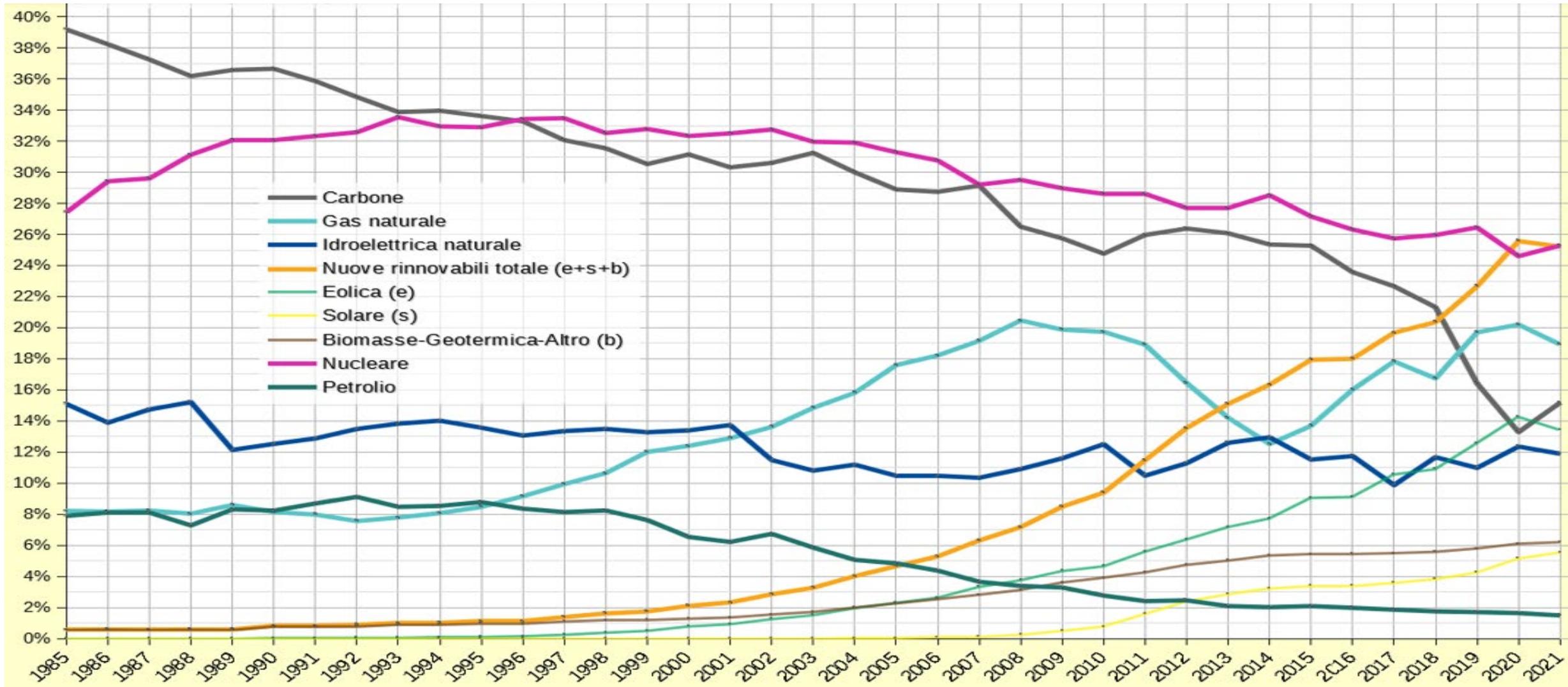
Il **nucleare** salito rapidamente in quota al 13 % fino al 1995 ha oscillato intorno ad una quota del 13-14% scendendo poi all'11% nel 2021.

L'**idroelettrico** è rimasto praticamente intorno al 7-5% in quota dal 1965 e nel 2021 ha terminato con un 5,5%.

Le **nuove rinnovabili alternative** hanno avuto dal 2000 circa un rapidissimo sviluppo passando da una quota dell'1 % a quella del 13% diventando nel 2021 la terza fonte primaria con **eolico al 6%, biomasse + geotermico al 4,5% e solare al 2,5%**

Produzione di energia elettrica per fonte in UE in % della sua totale produzione dal 1985 al 2021 (da luca_p@gmx.com- grafici.altervista.org] su dati BP)

La UE dei 27 nel 2021 ha prodotto 2890TWh



In Ue il settore elettrico mostra una situazione ben più dinamica rispetto a quella globale per quanto riguarda la decarbonizzazione con una **quota percentuale delle fonti fossili calata dal 55% del 1965 al 36% del 2021 rispetto ad una quota di tutte le rinnovabili salita dal 17% al 37%** (sorpasso tra il 2019 e 2020 delle fossili).

Il carbone aveva la maggior quota dal 1965 pari al 39% ed è stato superato dal 1996 con una quota del 33% dal nucleare per scendere poi nel 2020 al 13% e per risalire nel 2021 al 15%

Il nucleare ha avuto **uno sviluppo nelle quote dal 27% del 1965** (quando era la seconda fonte per produzione di elettricità) **al 33% del 1996 diventando la prima fonte di produzione dell'elettricità ma iniziando una lenta discesa fino al 25% del 2021** quando è stato in quota pari alle nuove rinnovabili differenti dall'idroelettrico che lo avevano di poco superato nel 2020.

Il gas ha avuto una bassa quota intorno all'8% fino al 1996 quando è iniziato un rapido aumento dei suoi consumi che lo hanno portato ad una quota vicino al 21% nel 2008; ne è seguito un declino fino al 13% in quota nel 2014 a seguito di un forte sviluppo specie di eolico, biomasse e solare e poi una risalita al 20% nel 2020 e 19% nel 2021, confermandosi come 3° fonte dopo nucleare e altre rinnovabili diverse dall'idroelettrico.

L'idroelettrico con una quota del 15% nel 1985 ha avuto in seguito oscillazioni in quota tra il 10 e il 14% arrivando al 12% nel 2021.

Le altre rinnovabili diverse dall'idroelettrico sono la fonte che ha visto uno sviluppo esponenziale dall'1% in quota nel 1995 fino a circa il 26% del 2020 e 25,2% nel 2021 diventando la prima fonte unitamente al nucleare e con una quota circa doppia di quella a livello mondiale; ciò con quote del 13,5% di eolico, 6,2% di biomasse e 5,5 % di solare.

Il petrolio è praticamente scomparso come fonte primaria scendendo dall'8% del 1985 all'1,5 % del 2021. ²⁷

LA NASCITA E LO SVILUPPO DEL NUCLEARE PER USI CIVILI

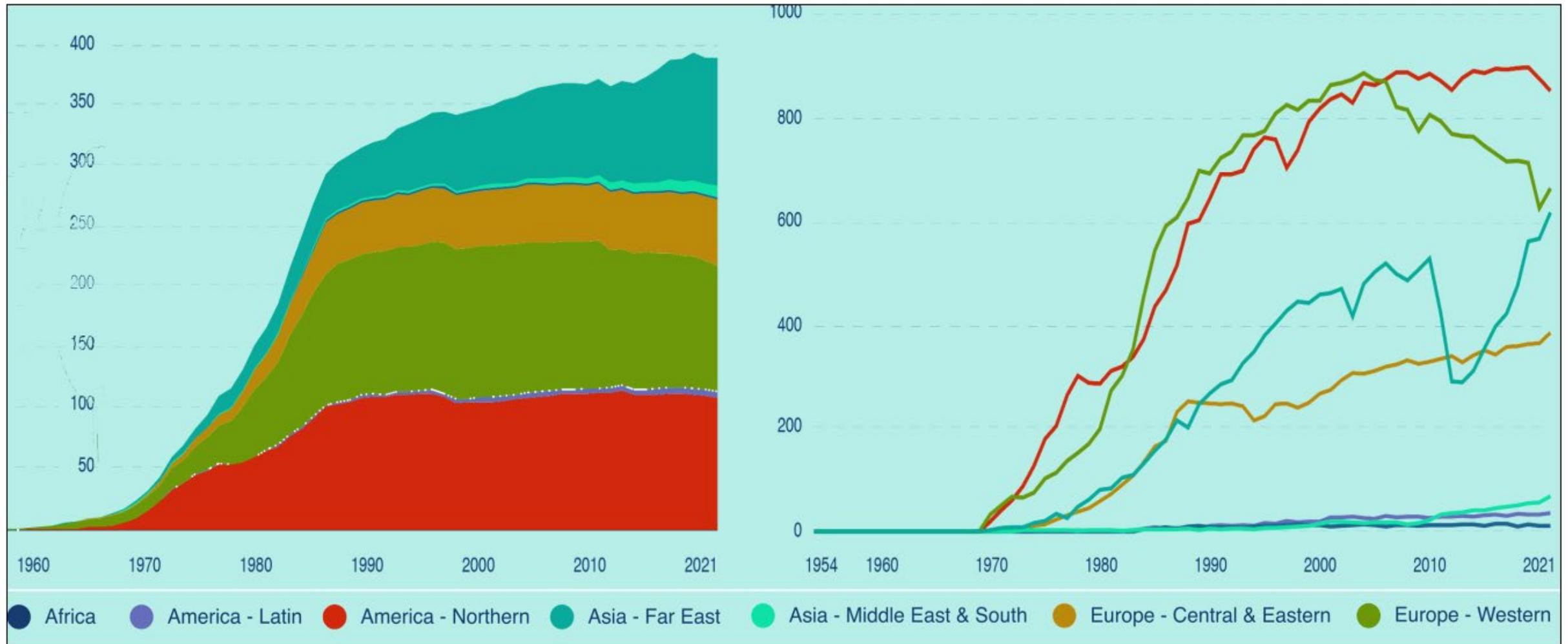
Lo sviluppo del nucleare per usi civili iniziato negli anni '50 in 4 principali paesi (Russia, Stati Uniti, Francia ed Inghilterra) si è basato su ricerche ed impianti militari.

La centrale di Obninsk in Russia nel 1954 con un reattore del tipo LWGR (moderato a grafite e raffreddato ad acqua leggera) è stata la prima centrale nucleare al mondo ad alimentare, collegata alla rete, utenti civili con 2 MW tramite una turbina aggiunta; utilizzava la tecnologia madre dei futuri reattori RBMK 1000 MW sviluppati in Russia e diventati famosi con l'incidente di Chernobyl del 1986

È stata seguita nel 1955 dalla centrale da 2 MW del National Laboratory Argonne in Idaho negli Stati Uniti con reattore non per usi militari e moderato ad acqua leggera bollente (BWR)

Dal 1956 in Francia ed in UK partendo da siti militari sono stati messi in servizio reattori raffreddati a gas (GCR) moderati con grafite ed alimentati da uranio naturale in 2 versioni. In particolare sono entrati in servizio dal 1956 al '60 a Marcoule in Francia 1 reattore da 46 MW termici per solo scopi militari e 2 reattori da 260 MW termici per usi civili e dal 1956 al 1959 a Calder Hall in Inghilterra 4 reattori da 60 MW elettrici.

Potenza nucleare in servizio nelle varie regioni in GW(a sinistra) e produzione di elettricità in TWh(a destra) dal 1954 al 2021(Fonte"PRIS-Power Reactor Information Sytem-www.iaea.org/pris,2022© IAEA")



Come tutte le altre fonti energetiche **il nucleare per usi civili** ha avuto sviluppi tecnologici importanti ed **ha visto 3 “generazioni” di reattori** per poter competere **ed ha risentito delle varie crisi geopolitiche /economiche/energetiche; più di tutto è stato però influenzato dagli incidenti ai reattori di Three Miles Island in US nel 1976, di Chernobyl in Ucraina nel 1986 e di Fukushima in Giappone nel 2011.**

Dal **1954 al 1986 il grande sviluppo del nucleare nel settore elettrico** a livello mondiale con una **quota nella produzione di elettricità passata dallo 0 % del 1954 al 15% del 1986** diventando la **terza fonte** dopo carbone ed idroelettrico e rimanendovi **fino al 1998**.

Anche **l'Italia è entrata nel 1965 nella produzione civile da nucleare** mettendo **in servizio 3 reattori di prima generazione di differenti tecnologie nel 1964-65 ;nel 1981 entrava in servizio la centrale di Caorso di seconda generazione.**

Nel 1982 iniziavano i lavori di costruzione della centrale di Montalto di Castro con 2 reattori BWR di circa 1000 MW ciascuno con costruzione poi sospesa nel 1988 a seguito di Chernobyl con costi arrivati ad oltre 7000 miliardi di lire.

Dal 1986 il tasso di incremento dell'energia elettrica dal nucleare nel mondo è fortemente diminuito raggiungendo una quota del 17% negli anni 90

Dal 2000 l'energia prodotta dal nucleare pur rimando praticamente costante in valore ha seguito una perdita della propria quota stabilendosi intorno al 10% fino al 2021.

Intorno al 2000 essendosi allentato il ricordo di Chernobyl e nella prospettiva dell'introduzione di reattori della terza generazione + che promettevano maggior efficienza e sicurezza e miglior competitività per il costo del kWh prodotto (vedi ad esempio i reattori EPR in Europa e AP 1000 in US) si è assistito ad un rinnovato interesse per il nucleare; anche l'Italia si è attivata con gli accordi del Febbraio 2009 tra ENEL ed EdF per una reintroduzione del nucleare dopo la sua chiusura susseguente al referendum del 1987 che in realtà non la imponeva. Erano previsti tra l'altro in Italia 4 reattori francesi EPR con il primo reattore in servizio nel 2020-

Ma l'effetto del disastro di Fukushima è stato devastante a livello mondiale specie in Giappone ed in UE ; in Italia il referendum del novembre 2011 ha decretato la fine del nucleare.

Come accennato all'inizio, la crisi energetica iniziata nel secondo semestre 2021, e aggravata a livello geopolitico con l'invasione russa dell'Ucraina, ha portato in diverse nazioni ed anche in Italia a vari pronunciamenti a favore di un nucleare spesso non ben definito

Anche la Commissione Europea, paladina per una sua decarbonizzazione al 2050, è arrivata a poter considerare il gas naturale ed il nucleare nella tassonomia degli investimenti sostenibili-

Tale "rinascimento" di un nucleare, non ben identificato anche in Italia da varie parti, va meglio inquadrato nel sistema energetico nazionale tenendo conto dei passati referendum e del notevole effetto NIMBY (non nel mio cortile) per qualunque tipo di impianto, anche rinnovabile. Occorrerà tenere presente tempi e costi per una sua effettiva possibile reintroduzione **e un'adeguata comunicazione e coinvolgimento della popolazione**

IL NUCLEARE CON I VALORI ANNUALI CONSOLIDATI DEL 2021

La **produzione di energia elettrica dal nucleare nel 2021 è stata pari a 2653 TWh**, superiore del 4% a quella del 2020

437(°) reattori in servizio al 31/12 in 33 nazioni per totali 389,5 GW elettrici netti

56 reattori in costruzione al 31/12 in 18 paesi per totali 51,1 GW elettrici netti

-connessi alla rete 6 nuovi reattori per 5,2 GW (3 in Cina, 1 in Pakistan, 1 in India ed 1 negli Emirati Arabi)

-permanentemente chiusi 10 reattori per 8,7GW (3 in Germania, 3 in UK, 1 in Pakistan, 1 in Russia, 1 in Taiwan ed 1 in US)

-iniziata la costruzione di 10 reattori per totali 8,8 GW e dei quali **9 PWR**(6 in Cina, 2 in India, 1 in Turchia) ed **1 FBR**(Fast Breeder Reactor) in Russia da 300 MW

(°)NB. Da rivedere in base nuove definizioni IAEA per reattori in servizio

Con riferimento alla **tecnologia dei reattori in servizio al 31/12/2021** vi erano **su 437 reattori**

303 PWR(ad acqua pressurizzata per ben il 74% della totale potenza in servizio)

61 BWR (ad acqua bollente)

47 PHWR (ad acqua pesante pressurizzata),

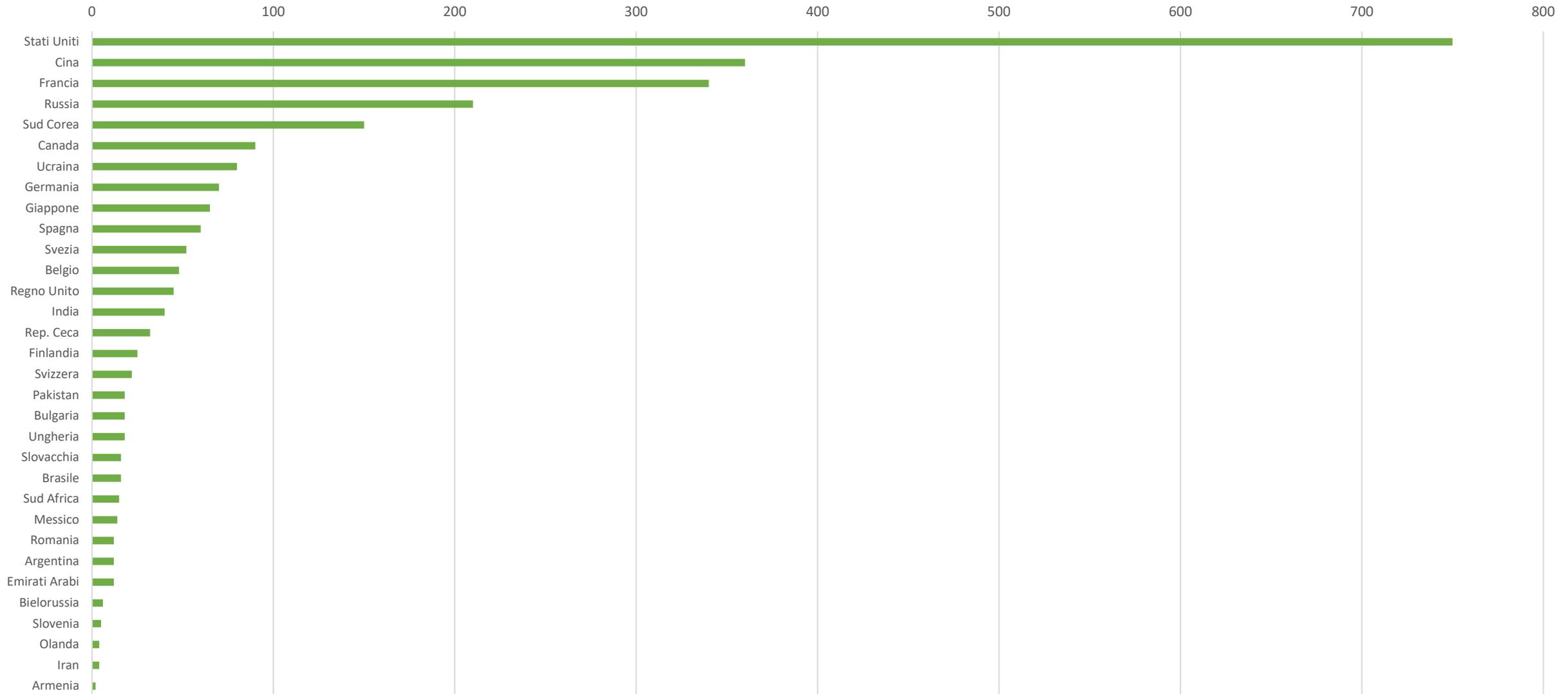
11 LWGR (moderati a grafite e raffreddati ad acqua leggera)

11 GCR(moderati a grafite e raffreddati a gas)

1 HTGR (in Cina moderato a grafite e raffreddato a gas ad alta temperatura).

Sono in servizio anche **3 reattori** (1 in Cina e 2 in Russia) **del tipo FBR** Fast Breeder Reactors (nucleari veloci autofertilizzanti senza moderatore e raffreddati a metallo liquido).

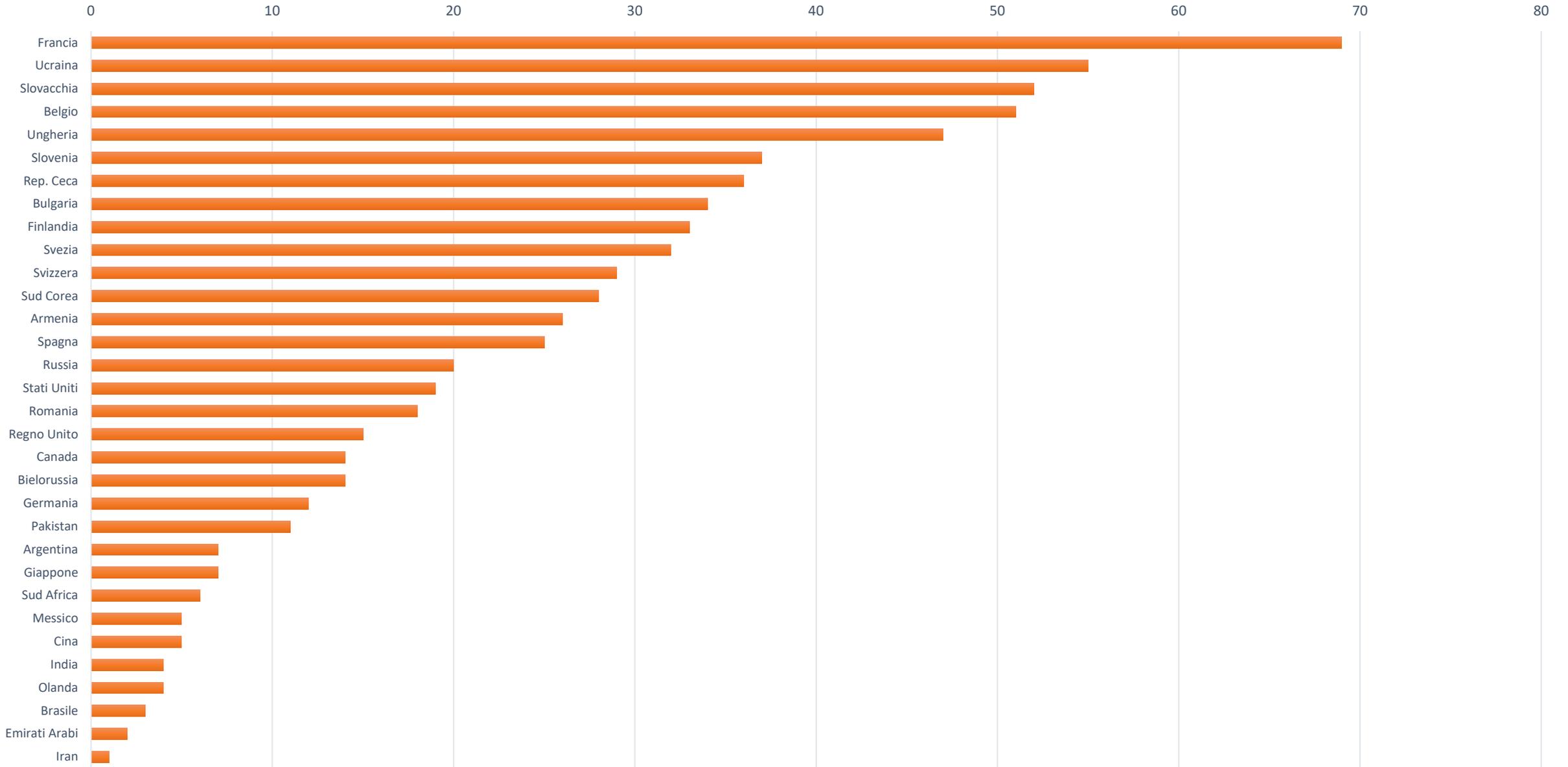
Produzione di energia nucleare nel 2021 [TWh]



Si può notare come gli Stati Uniti abbiano prodotto 772 TWh nel 2021 pari al 29% della totale energia elettrica nucleare prodotta nel mondo (2653 TWh) i primi 3 paesi (Stati Uniti, Cina e Francia) ne abbiano prodotto il 51%

ed i primi 5 (Stati Uniti, Cina, Francia, Russia e Sud Corea) il 71%

2021-Percentuale di produzione elettrica da nucleare



Degna di attenzione la attuale critica situazione dell'Ucraina con suoi reattori(tutti russi) dichiarati operabili (15 per 13 GW nel 2021) hanno fornito il 55% della totale elettricità prodotta nel paese ponendosi a livello mondiale dopo la Francia (69%) e prima di Slovacchia(52%) ,Belgio (51%) ed Ungheria (47%) seguita da vari paesi con percentuali dal 37% della Slovenia fino a circa l'1% dell'Iran – Non sarà chiaramente pensabile di mantenere per loro nel 2022 la percentuale del 2021 ed anche in Francia, dati i vari reattori fuori servizio per manutenzione

Ben 9 nazioni della UE rientrano nei primi 10 posti mondiali per % di elettricità dal nucleare e superiore al 32%.

Vale la pena di ricordare che la Cina con solo una quota del 5% di elettricità dal nucleare è diventata, superando la Francia nel 2021, il secondo paese dopo gli Stati Uniti per totali TWh prodotti.

LIFE TIME CAPABILITY FACTOR CF

Per quanto riguarda il **lifetime unit capability factor CF (ore annue di utilizzo in %) per ogni nazione**, come media pesata di tutti i suoi reattori che sono stati in servizio dall'inizio del nucleare al 2/12/2022 (inclusi i permanentemente chiusi), **varia dal 92% di Romania e Finlandia al 62% del Giappone** penalizzato dal disastro di Fukushima -Tra le nazioni di interesse si possono notare i reattori della **Cina con un CF all '89%**, **Ungheria 87%**, **Stati Uniti , Germania e Sud Corea 83%**, **Canada e Francia 78%**, **Russia 76%** , **UK 72%** ed **Italia 68%-**

La media mondiale per i circa 600 reattori considerati dà un CF del 78,7%.

La forte penetrazione di rinnovabili in alcuni paesi che hanno reattori in servizio ed un mercato elettrico ne ha ridotto negli ultimi anni il capability factor.

IL NUCLEARE A LIVELLO GLOBALE AL 2/12/2022

33 Nazioni con reattori in servizio

18 nazioni con reattori in costruzione

CURRENT STATUS

422 NUCLEAR POWER REACTORS
IN OPERATION

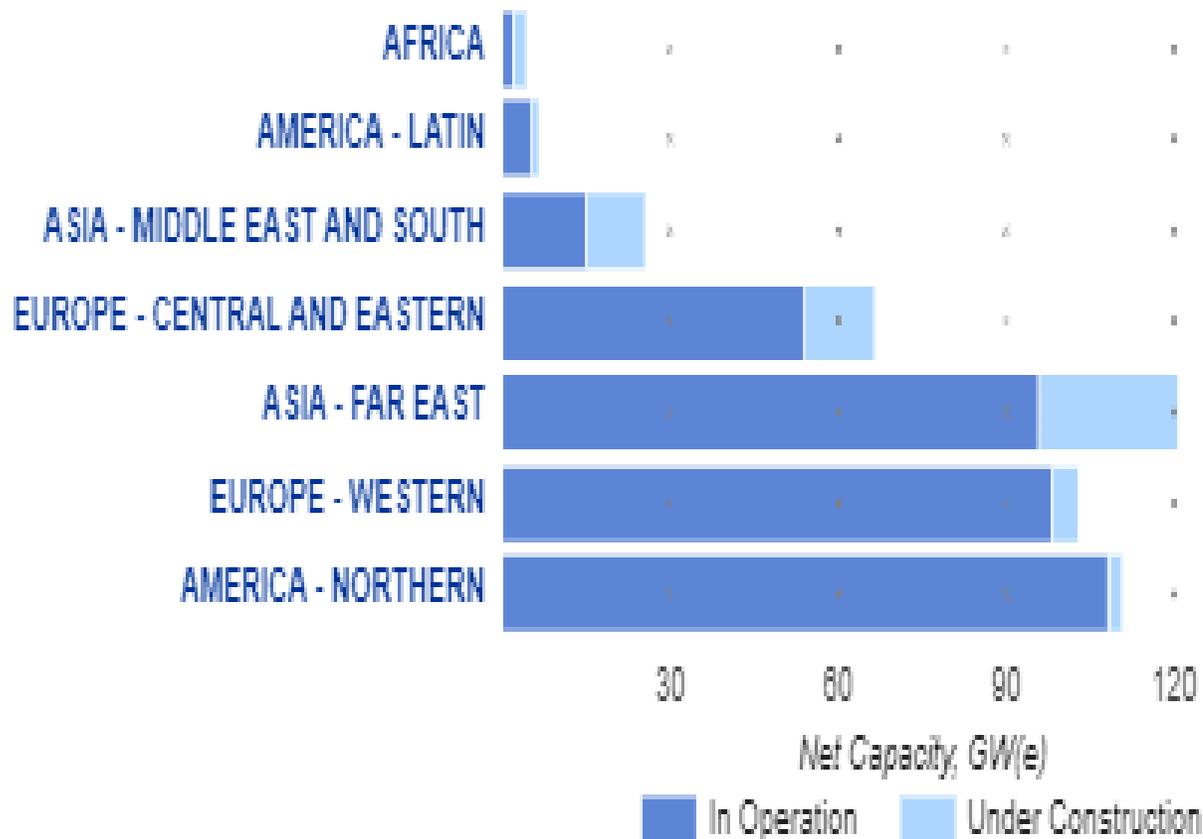
378 314 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

57 NUCLEAR POWER REACTORS
UNDER CONSTRUCTION

58 858 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

19 362 REACTOR-YEARS OF
OPERATION

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



Il Nord America trainato dagli Stati Uniti è la regione con il massimo numero e la massima potenza dei reattori in servizio(108,3 GW) seguita da Asia-Far East che, con gli sviluppi della Cina, ha di poco superato per potenza installata con 99,3 GW l'Europa occidentale (99,1GW).

La situazione del nucleare nell'America del nord è praticamente poco variata da qualche anno come quella in Europa occidentale, America Latina e Africa.

Grande sviluppo in percentuale in Asia-Medio Orientale e del Sud con 10,5 GW in costruzione rispetto ai 15 GW in servizio

L'Europa centrale e dell'est è la seconda regione geografica per nucleare in costruzione(12,3GW) rispetto ai 25,2 GW dell'Asia Far East .

DA 1/1 A 2/12/2022 (IAEA)

7 NUOVI REATTORI CONNESSI ALLA RETE –
5 REATTORI CHIUSI PERMANENTEMENTE

New connections to the grid

BARAKAH-3	(1345 MW(e), PWR, UAE) on 8 October
FUQING-6	(1000 MW(e), PWR, CHINA) on 1 January
HONGYANHE-6	(1061 MW(e), PWR, CHINA) on 2 May
KANUPP-3	(1014 MW(e), PWR, PAKISTAN) on 4 March
OLKILUOTO-3	(1600 MW(e), PWR, FINLAND) on 12 March
SHIN-HANUL-1	(1340 MW(e), PWR, KOREA, REP. OF) on 9 June

Permanent shutdowns

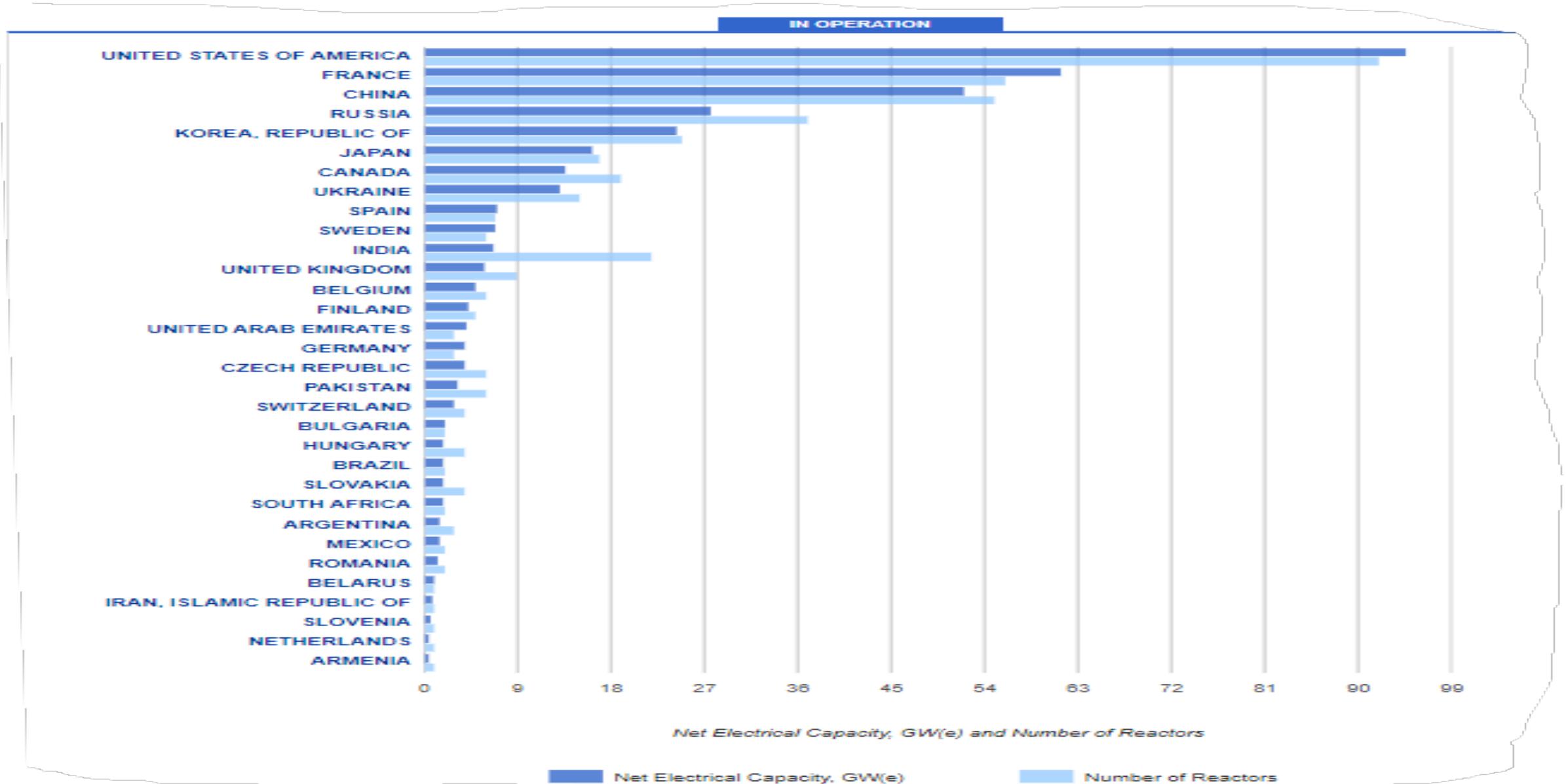
DOEL-3	(1006 MW(e), PWR, BELGIUM) on 23 September
HINKLEY POINT B-1	(485 MW(e), GCR, UK) on 1 August
HINKLEY POINT B-2	(480 MW(e), GCR, UK) on 6 July
HUNTERSTON B-2	(495 MW(e), GCR, UK) on 7 January
PALISADES	(805 MW(e), PWR, USA) on 20 May

DA 1/1 a 2/12/2022 INIZIO COSTRUZIONE DI 7 NUOVI REATTORI (DA IAEA)

Construction starts

AKKUYU-4	(1114 MW(e), PWR, TÜRKIYE) on 21 July
EL DABAA-2	(1194 MW(e), PHWR, EGYPT) on 19 November
ELDABAA-1	(1194 MW(e), PWR, EGYPT) on 20 July
HAIYANG-3	(1161 MW(e), PWR, CHINA) on 7 July
SANMEN-3	(1163 MW(e), PWR, CHINA) on 28 June
TIANWAN-8	(1171 MW(e), PWR, CHINA) on 25 February
XUDABU-4	(1200 MW(e), PWR, CHINA) on 19 May

2/12/2022 reattori in funzione 422 per totali 2859 GW (inclusi 3 reattori a Taiwan)



Reattori tolti da quelli dichiarati precedentemente in operation e considerati come suspended (in realtà erano solo teoricamente operabili-il Giappone dopo Fukushima aveva dichiarato operabili=in funzione molti reattori in realtà non funzionanti e fermi per futuro decommissioning o adeguamento a nuove normative di sicurezza)

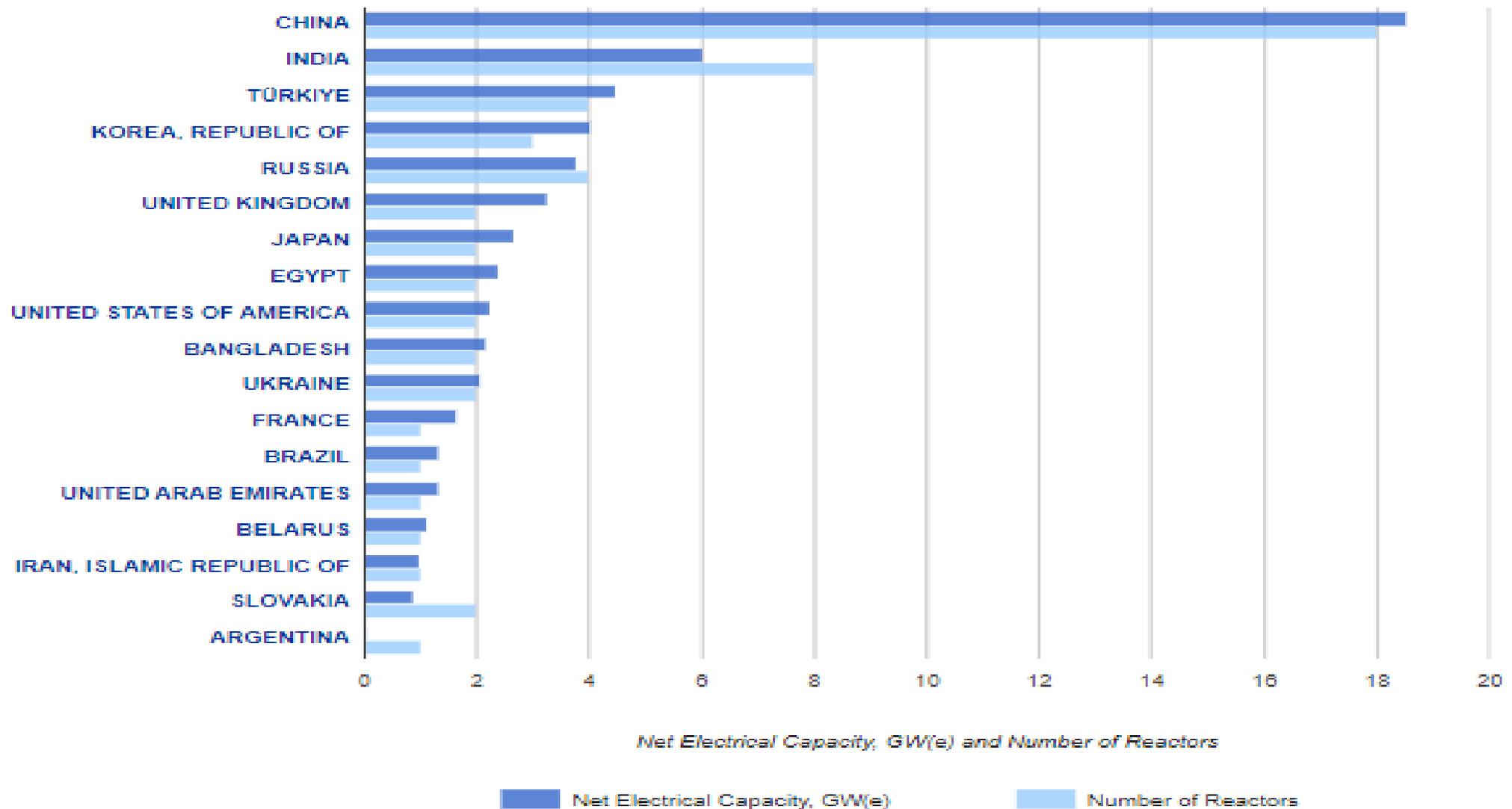
SUSPENDED OPERATION

Country ▲	Total Net Electrical Capacity [MW]	Number of Reactors	
INDIA	90	1	
JAPAN	15358	16	
Total	15448	17	

Above data generated by the PRIS database. Last update on 2022-12-02

18 NAZIONI CON 57 REATTORI IN COSTRUZIONE AL 2/12/2022 (FONTE IAEA)

UNDER CONSTRUCTION



57 REATTORI IN COSTRUZIONE AL 2/12/2022 (FONTE IAEA)

Country ▲	Total Net Electrical Capacity [MW]	Number of Reactors
ARGENTINA	25	1
BANGLADESH	2160	2
BELARUS	1110	1
BRAZIL	1340	1
CHINA	18528	18
EGYPT	2388	2
FRANCE	1630	1
INDIA	6028	8
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	974	1
JAPAN	2653	2
KOREA, REPUBLIC OF	4020	3
RUSSIA	3759	4
SLOVAKIA	880	2
TÜRKIYE	4456	4
UKRAINE	2070	2
UNITED ARAB EMIRATES	1345	1
UNITED KINGDOM	3260	2
UNITED STATES OF AMERICA	2234	2
Total	58858	57

Data sourced by the PRIS database. Last update on 2022-12-02

Per i 57 reattori in costruzione al 2/12/2022,

la Cina domina con 18 (4 forniti dalla Russia)

seguita dall' India con 8 (4 forniti dalla Russia)

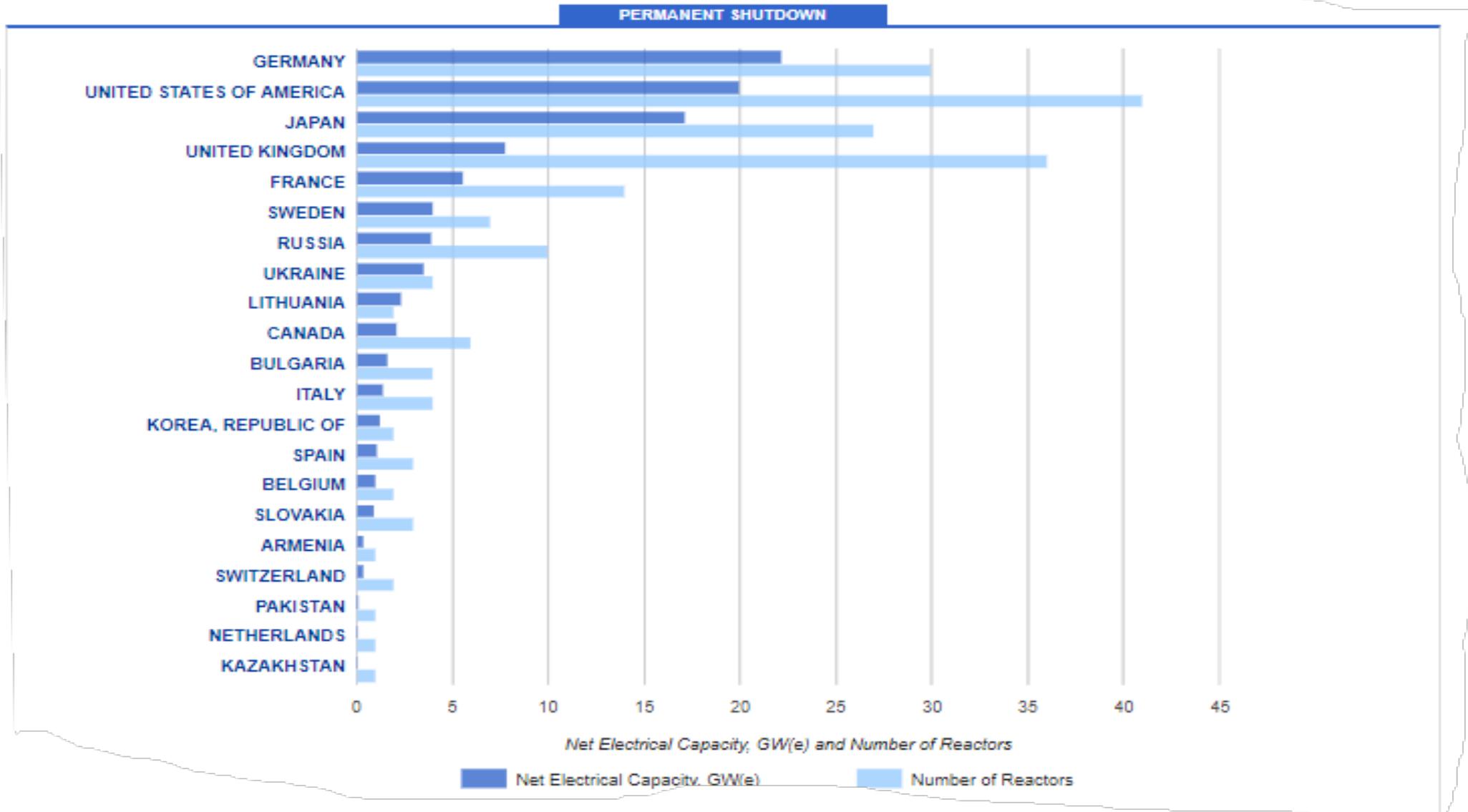
e dalla Russia e Turchia con 4 reattori ciascuna (e i 4 reattori in Turchia forniti dalla Russia)

Considerando i reattori russi in costruzione in Bangladesh ,Ucraina ,Egitto, Bielorussia, Iran e Slovacchia **i reattori di origine russa in costruzione nel mondo (inclusi 4 in Russia) sono ben 25 pari ad oltre il 40% dei totali e ciò dovuto a 2 principali fattori:**

-alta tecnologia e provata affidabilità dei reattori

-allettanti finanziamenti e condizioni generali per reattori all'estero .

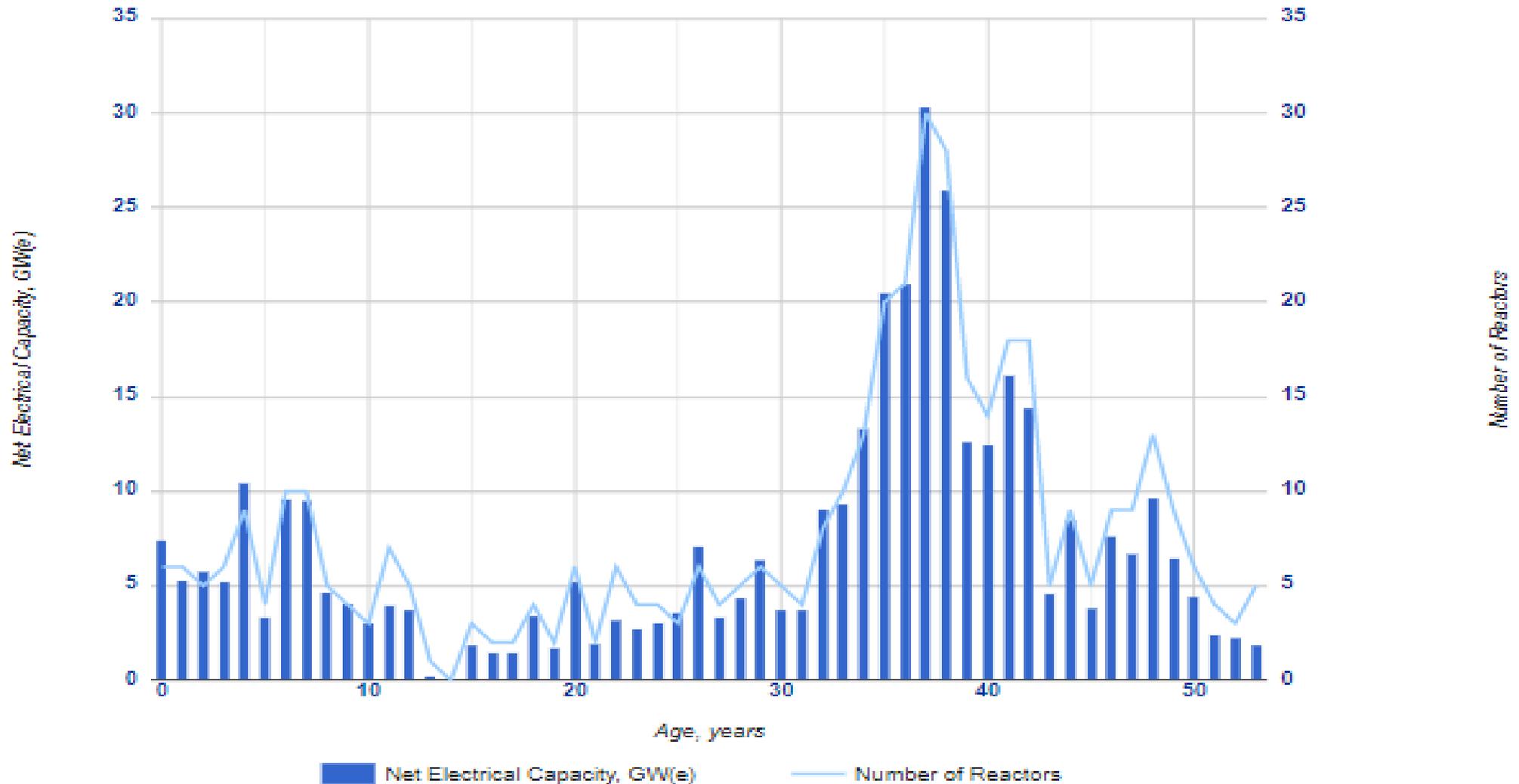
204 Reattori permanentemente chiusi per totali 99 GW in 22 nazioni (inclusa Taiwan con 3 reattori per 2,2 GW) DA IAEA-ENORME MERCATO PER DECOMMISSIONING



NB 511 reattori di ricerca in decommissioning/decommissionati -223 in funzione -11 in costruzione

ETA' DEI REATTORI IN FUNZIONE ENTRATI IN SERVIZIO OGNI ANNO FINO AL 2/12/22 (DA IAEA)

AGE DISTRIBUTION



Negli anni d'oro per il nucleare dal 1978 al 1987 sono stati messi in servizio da 13 a 30 reattori ogni anno con una potenza annuale da 12 a 30 GW.

112 reattori hanno una anzianità di servizio superiore ai 40 anni per una potenza totale di quasi 90 GW ;un enorme mercato per investimenti di refurbishing ed estensione della vita.

Negli ultimi 10 anni solo nel 2017-2015 e 2014 sono stati installati reattori per circa 10 GW/ anno ;negli altri 7 anni la potenza è stata tra i 3 ed i 6 GW/anno –

Nei primi 11 mesi del 2022 entrati in servizio 7 reattori

TECNOLOGIA REATTORI IN SERVIZIO AL 2/12/2022- PRINCIPALI ATTUALI FORNITORI

A parte i reattori della 1° generazione messi in servizio dagli anni '50 fino ad inizi dei '70, i reattori di 2° generazione sono attualmente la grande maggioranza dei 422 reattori in funzione e con l'estensione della loro vita in discussione (si parla di oltre 100 reattori) fino a circa 80 anni per alcuni di loro in alcune nazioni, saranno presenti nel parco nucleare fino a circa il 2030-

Per i reattori in costruzione la gran parte sono della 3° generazione o della "3° generazione +"

I reattori di 3° generazione sono nati da un'evoluzione di alcune filiere della 2° generazione e i più evoluti per sicurezza, costi del kWh prodotto, potenza unitaria e riduzione delle scorie, sono stati catalogati come "3° generazione +"

Il primo reattore nucleare di 3° generazione in servizio in Giappone nel 1996 dalla [General Electric](#) in consorzio con la Hitachi a partire dai BWR è classificato come [ABWR](#) (*Advanced Boiling Water Reactor*) e si è poi evoluto in "3° generazione +" classificato come [ESBWR](#) ([Economic Simplified Boiling Water Reactor](#))-In totale 5 reattori di questo tipo sono entrati in servizio in Giappone dal 1996 al 2016 e 2 a Taiwan e 2 sono in costruzione in Giappone

Anche in Russia nel 1986 in servizio una **nuova versione di terza generazione dei loro reattori VVER** derivati da tecnologia PWR e via via migliorati e in funzionamento o in fase di costruzione in vari paesi ;nuovi reattori erano in fase di definizione di inizio costruzione, prima dell'invasione dell'Ucraina, in Ungheria e Finlandia la quale ha rescisso il contratto a seguito della invasione della Russia .

Gli altri principali reattori di 3° generazione o "3° generazione +" sviluppati o in fase di sviluppo

-Derivati dalla filiera PWR:

AP1000 -1170 MW(Westinghouse/Toshiba) operativi in Cina e 2 in costruzione in US

EPR- 1650 MW(AREVA-EdF) operativi in Cina e Finlandia e 1 in costruzione in Francia e 2 in UK

AP 1400-1400 MW(KEPCO)-Operativi ed in costruzione in Sud Corea e in UAE

ATMEA 1000-1200MW (AREVA-Mitsubishi) e poi(EdF Mitsubishi dal 2016);varie proposte senza successo in vari paesi-**Abbandonato nel 2019**

ACE 1000 MW(EdF -CGNPC) sviluppo di un reattore derivato da ATMEA

Hualong one(HPR 1000 versione export di CNNC e CGN) in funzione in Cina e proposto all'estero

APWR 1700 MW (Mitsubishi)-Piani sospesi in Stati Uniti e Giappone

-Derivati dalla filiera PHWR

ACR 1000- 1000MW (Lavalin Canada che ha acquisito la tecnologia Candu di ACEL)-Piani sospesi in Canada-

-Derivati dalla filiera HWR

AHWR 300 MW(BARC India) per utilizzo del torio in fase di sviluppo

Considerando i 57 reattori in costruzione al 2/12/2022 si nota che a parte 4 Fast Breeder Reactors (2 in Cina,1 in Russia ed 1 in India), 3 PHBR (in India),2 ESBWR(in Giappone) tutti gli altri sono di tecnologia derivata dai PWR tra i quali 19 VVER,11 Hualong one, 9 AP 1000,5 AP 1400 ,3 EPR.

Vale la pena di ricordare nel mondo occidentale la debacle realizzativa/ finanziaria:

- **con il fallimento di Westinghouse Nuclear con subentro di Toshiba per i loro 4 reattori AP1000 negli Stati Uniti (2 sono stati sospesi per eccesso di costi e 2 hanno ad oggi cumulato un ritardo di oltre 7 anni e quasi un raddoppio del costo previsto inizialmente)**
- **con il fallimento della Francese AREVA con il subentro di EdF per i 2 loro reattori EPR in Europa occidentale:**

IN PARTICOLARE PER IL REATTORE EPR FRANCESE

- **Olkiluoto 3 in Finlandia**, inizio costruzione nel 2005, con 13 anni di ritardi e con costi quasi triplicati è stato collegato alla rete nel marzo 2022 per le prove di funzionamento e con servizio commerciale aggiornato per il 14 dicembre 2022; tolto dal servizio a metà ottobre 2022 per i danni rilevati durante lavori di manutenzione alle pompe dell'acqua "dell'isola turbina" con possibili ritardi non ancora definiti al servizio commerciale-

Avendo la Russia sospeso la fornitura di elettricità di 1000 MW alla Finlandia e le forniture di gas alla Finlandia, ulteriori ritardi dei 1600 MW da Olkiluoto 3 creerebbero seri problemi al paese.

- **Flamanville 3 in Francia**, inizio costruzione 2007 con funzionamento commerciale previsto nel 2013, ha una storia di ritardi e costi come Olkiluoto 3; a inizi 2022 è stato previsto caricamento combustibile a metà 2023

Al di fuori dell' Europa occidentale e Stati Uniti,

in Cina

2 reattori AP1000 sono entrati in servizio a Sanmen nel 2018

2 reattori EPR sono entrati in servizio

a Taishan nel 2018 e 2019

con tempi e costi ben inferiori a quelli negli Stati Uniti ed in UE ;

l'AP 1000 è diventato un reattore cinese per nuove costruzioni in Cina ed all'estero con la nuova sigla CAP 1000.

RISORSE DI URANIO, PRODUZIONE E COSTI

Le riserve di uranio utilizzabili dipendono dai prezzi di mercato, dai costi di estrazione e dalla concentrazione di uranio nel materiale estraibile .

Le principali risorse economicamente utilizzabili con prezzo dell'Uranio fino a 120\$/kg assicurano 85 anni di forniture per consumi come i presenti di 62000 t/anno e sono per i due terzi in Australia(28%) ,Kazakistan(15%) ,Canada(9%), Russia (8%) e Namibia (7%).

Le recenti produzioni sono in miniere attive in 20 Paesi.

I maggiori produttori sono Kazakistan(41%), Canada (13%) e Australia (12%) che insieme contribuiscono per i due terzi della produzione globale. Seguono Namibia, Russia, Niger, Uzbekistan e Stati Uniti.

PREZZO DELL'URANIO IN \$/Libbra DAL 2013(NB 1 libbra=0,454 kg)

(fonte TRADING ECONOMICS)



L'uranio come le fonti fossili ha visto con gli obiettivi di decarbonizzazione **un crescente ostracismo per il suo uso** causando un **crollò negli investimenti di ricerca e sviluppo di nuovi giacimenti** specie a partire **dal 2011 dopo Fukushima con prezzi in lenta discesa fino ai 20\$/Libbra (44\$/kg) del 2018**

Lenta risalita fino circa 30\$/Libbra del primo semestre 2021 fino a 50 (110\$/kg) negli ultimi mesi 2021 con un picco isolato di 65 \$/Libbra (143 /kg) ad Aprile 2022 per riscendere a 50\$/Libbra nell'ultima parte del 2022

In UE per nuovi reattori anche un Uranio a 300\$/kg (136 \$/Libbra) inciderebbe solo per il 7% circa sul costo di produzione del MWh; un forte impatto si avrebbe per reattori completamente ammortati.

LCOE DEL MWH IN UE PRODOTTO DA POSSIBILI REATTORI OGGI SUL MERCATO E TEMPISTICHE.

Per un investitore **per calcolare il cosiddetto LCOE** (il livellato costo per l'energia prodotta è il prezzo minimo al quale l'investitore deve vendere il MWh prodotto per recuperare tutti i costi per la realizzazione ed esercizio della centrale durante la sua vita utile considerata) è **necessario considerare in dettaglio**

- A) tutti i costi prima della realizzazione della centrale**(ingegneria preliminare ,scelta del sito ,permessi ,indennizzi a comunità locali, qualifica dei possibili fornitori ,emissione bandi di gara, scelta/ ed ordini ai fornitori ecc)
- B)tutti i costi per la realizzazione della centrale** inclusi i costi di supervisione diretta od indiretta
- C)il costo del combustibile**
- D)i costi per l'esercizio e manutenzione della centrale e il trattamento locale delle scorie**
- E)gli accantonamenti per il decommissioning** della centrale **che vengono addebitati ad ogni MWh prodotto**
- F)gli accantonamenti per contribuire alla realizzazione e funzionamento del/dei "cimiteri" finali delle scorie**

Gli **anni di vita utile** considerati (attualmente circa 60 anni), gli **oneri finanziari** e la **valutazione dei rischi** **aspettati** giocano un ruolo importante ma **il fattore dominante per l'LCOE è la somma delle voci A e B che varia dai circa 2500- 3000 €/kW** (proclamati da cinesi ed indiani per realizzazioni locali ed includenti gli oneri finanziari) **ai circa 7000 €/kW in UE**; ciò **sulla base**

dell'ordine passato da Fennovoima in Finlandia per la fornitura di una centrale dalla Russia con 1 reattore VVER 1200 MW per entrata in servizio dopo 6 anni (ordine come già accennato annullato a seguito dell'invasione dell'Ucraina)

delle ultime valutazioni dei fornitori della centrale di Hinkley Point C in costruzione in Inghilterra e di altre centrali in definizione nel Regno Unito con 2 reattori per centrale

altre info confidenziali da ex membri di un gruppo mondiale di lavoro WEC da me coordinato

Rimanendo **in Europa occidentale**, per una nuova centrale con **un WACC 9%**, **60 anni di vita**, **A+B di 7000 €/kW**, **8000 ore equivalenti di funzionamento/anno** e un **valore elevato di 300€/kg (136\$/libbra)** per il **combustibile** **si ha un LCOE di 130€/MWh** con la seguente suddivisione

A+B(CAPEX) = 70% **C (combustibile.)= 7%** **D(O&M)+[E+F](amm.per decomm. +scorie fin.) = 23%**

Componente combustibile nell'LCOE trascurabile per nuove centrali ma sensibile per centrali ammortate per le quali si parla di 30-40 \$/MWh in Francia e Stati Uniti

TEMPI DI REALIZZAZIONE IN UE DI CENTRALI NUCLEARI

Uno sviluppo del nucleare in una nazione andrebbe visto in una politica energetica nella quale non si considera solo una o qualche unità nucleare ;e ciò richiede chiaramente tempi e coinvolgimenti della popolazione specie in un paese come l'Italia reduce da 2 referendum.

Per la centrale in Finlandia(paese aperto al nucleare) ordinata alla Russia l' inizio costruzione avveniva **dopo un iter** autorizzativo ,scelta e cambio del sito scelta della composizione finanziaria dell'investitore,cambio di possibili reattori/fornitori **durato 15 anni**.

Per Hinkley Point in Inghilterra il sito era stato **annunciato dal governo inglese nel 2010** e garantita la **licenza nel 2012**.Dopo varie alternative è stato **finanziato il progetto da EDF Energy e dalla China General Nuclear Power Group(CGN) e dopo l'approvazione nel 2016 dei governi francese ed inglese è iniziata la costruzione nel 2017** e dopo vari ritardi(alcuni a causa del COVID-19) e variazioni del prezzo iniziale **l'entrata in servizio è prevista ad oggi nel 2027**

IN FRANCIA «assuming Macron's plan to build six new reactors is approved by parliament by the end of next year 2023, EDF could start preparatory earthworks to build a first pair in Penly, Normandy from June 2024, **said Gabriel Oblin, EDF director for the project. Reactor construction could then start by the end of 2027, with commissioning planned for 2035-37"-**

SI TRATTA QUINDI SE TUTTO VA BENE DA 12(SITO GIA' DISPONIBILE) A CIRCA 20 ANNI

NUOVE TECNOLOGIE

PICCOLI REATTORI MODULARI AVANZATI (SMR)

REATTORI DI IV GENERAZIONE

FUSIONE NUCLEARE

Secondo Life Cycle Assessments i reattori nucleari attuali emettono circa **10 grammi equivalenti di CO₂ per kWh prodotto** (almeno 75 e 35 volte inferiori a centrali a carbone ed a gas) e comparabili a centrali eoliche e ben inferiori a quelli da idroelettrico e fotovoltaico-

Lo spazio richiesto per kWh prodotto da grosse centrali è circa **1/10** rispetto al fotovoltaico ed **1/100** rispetto all' eolico .

La produzione di elettricità dal nucleare è programmabile e contribuisce a fornire inerzia e potenza di corto circuito al sistema, indispensabili per stabilità e qualità della fornitura oltre che a possibili affidabili contributi al capacity market per compensare non produzione di FER rinnovabili.

Nonostante tali posizioni teoriche di privilegio del nucleare si è andata sviluppando la necessità di avere reattori più sicuri ,con ridotte o nulle produzioni di scorie e costi di produzione ridotti ;3 principali tecnologie come esposte nel titolo sono da vari anni(o meglio alcuni decenni) in fase di ricerca e sviluppo e con eventuali prototipi sperimentali.

SMR:SMALL MODULAR REACTORS

Reattori di taglia inferiore a circa 300 MW e di costruzione modulare con assemblaggi effettuati nell'ambiente controllato delle fabbriche e trasporto come una singola unità al sito di installazione

-Secondo la IAEA quelli fino a 10 MW vengono chiamati microreattori-

Proposti utilizzi in siti industriali ,isole ed aree isolate ed in nazioni dove non si possono connettere inizialmente grosse potenze di 1 GW ed oltre ;si sottolinea il facile aumento nel tempo della potenza iniziale di una centrale aggiungendo moduli.

Considerando la programmabilità ed un capacity factor anche superiore alle 8000 ore/anno alcuni sottolineano i vantaggi di poter produrre vantaggiosamente idrogeno verde vicino a siti di consumo, con energia elettrica da nucleare rispetto a quella variabile ed intermittente da eolico e fotovoltaico .

Ad oggi oltre **70 tipologie in sviluppo in 17 nazioni** con reattori differenti per taglia ,installazione su terraferma o off-shore,tipo di raffreddamento ,temperatura ,pressione ,combustibili utilizzabili, ecc

2 impianti con SMR sono in funzione:

-il primo dal **2020 in Russia su chiatte ,35 MW** di derivazione PWR

-il secondo da inizi **2022 in Cina con 2 reattori da 200MW** di tecnologia HTR raffreddati a gas.

Per quanto riguarda i costi per realizzazioni commerciali e non prototipali sovvenzionate, **l'investimento in capitale con costi di installazione ridotti risulta promettente ma come sottolinea la IAEA "la loro competitività deve ancora essere verificata".**

Per i tempi non si prevedono sviluppi commerciali prima di 10-15 anni e considerando l'iter per un investitore la scelta del tipo di reattore e sito ,autorizzazioni e compensi locali, gara ed aggiudicazione ,costruzione del "modulo" e trasporto/installazione, **non vedo specie in Italia possibilità di averne in servizio prima di almeno 2 decenni ,salvo prototipi sovvenzionati.**

GENERATION IV REACTORS

GIF-Generation IV International Forum è stato avviato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti nel 2000 e ha iniziato le attività nel 2001.

Rappresentava 13 Paesi per lo sviluppo della prossima generazione di tecnologia nucleare (Argentina, Brasile, Canada, Francia, Giappone, Corea del Sud, Sud Africa, Regno Unito e Stati Uniti a cui si sono aggiunti Svizzera, Cina, Russia, Australia) e, attraverso il programma di ricerca e formazione Euratom, l'Unione Europea.

Lo scopo è condividere la ricerca e lo sviluppo piuttosto che costruire reattori.

Dopo le prime analisi di moltissime tipologie di reattori, GIF ha deciso di concentrarsi su 6 e ne ha aggiunto poi una 7[°]; I fluidi refrigeranti per le categorie scelte sono elio (sia per un reattore VHTR a 900-1000°C e sia per un reattore GFR gas fast breeder a 859°C), sodio liquido, acqua, piombo liquido e sali fusi; le potenze considerate vanno da qualche decina di MW a 1500 MWe comprendono quindi alcune tipologie degli SMR

Generation IV reactor designs under development by GIF

	Neutron spectrum (fast/thermal)	Coolant	Temperature (°C)	Pressure*	Fuel	Fuel cycle	Size (MWe)	Use
Gas-cooled fast reactors	fast	helium	850	high	U-238 +	closed, on site	1200	electricity & hydrogen
Lead-cooled fast reactors	fast	lead or Pb-Bi	480-570	low	U-238 +	closed, regional	20-180** 300-1200 600-1000	electricity & hydrogen
Molten salt fast reactors	fast	fluoride salts	700-800	low	UF in salt	closed	1000	electricity & hydrogen
Molten salt reactor - advanced high-temperature reactors	thermal	fluoride salts	750-1000		UO ₂ particles in prism	open	1000-1500	hydrogen
Sodium-cooled fast reactors	fast	sodium	500-550	low	U-238 & MOX	closed	50-150 600-1500	electricity
Supercritical water-cooled reactors	thermal or fast	water	510-625	very high	UO ₂	open (thermal) closed (fast)	300-700 1000-1500	electricity
Very high temperature gas reactors	thermal	helium	900-1000	high	UO ₂ prism or pebbles	open	250-300	hydrogen & electricity

* high = 7-15 MPa

+ = with some U-235 or Pu-239

** 'battery' model with long cassette core life (15-20 yr) or replaceable reactor module.

I vantaggi dichiarati:

- una **sicurezza operativa** notevolmente migliorata rispetto ai reattori di terza generazione.
- producono **100-300 volte più energia con la stessa quantità di combustibile** nucleare e quindi riduzione dei rifiuti nucleari
- **I rifiuti restano radioattivi per pochi secoli** invece che per millenni.
- **è possibile impiegare una più ampia gamma di combustibili** e con capacità di **riutilizzare le scorie nucleari** da produzione di elettricità **da centrali nucleari convenzionali.**

Già operativi alcuni reattori di GEN IV di medie grandi potenze e collegati alla rete:

-3 in Russia; 1 da 560 MW in servizio dal 1980, ben prima della nascita di GIF con **e 2 reattori sempre fast breeder** raffreddati a sodio liquido con l'ultimo collegato alla rete nel 2016 per oltre 800 MW.

-2 in Cina da 100 MW HTGR raffreddati ad elio e alimentanti una unica turbina da 200MW

In Cina in servizio dal 2011 un piccolo reattore sperimentale da 20 MW tipo SFR (Sodium Fast Reactor)

Diverse opinioni sulla posizione delle varie tecnologie tra ricerca pura, R&S, prototipi, tempi di sviluppo commerciale di impianti connessi alla rete e loro dimensione. **Alcune associazioni nucleari sostengono di avere per alcune tipologie uno sviluppo commerciale in questo decennio.**

Da una **dichiarazione di GIF al GEN IV International Forum - Nov. 2021** ci vorranno **“almeno due o tre decenni prima dell'implementazione di impianti completi commerciali”**.

Per un progetto specifico commerciale, tenendo conto delle varie fasi per un investitore di una grossa centrale nucleare da ingegneria preliminare, autorizzazioni a messa in servizio, **non vedo connessioni apprezzabili di GEN IV reactors alla rete UE prima del decennio 2040-50; ciò a parte progetti pilota sovvenzionati.**

LA FUSIONE NUCLEARE

Si vuole riprodurre sulla terra la reazione a milioni di gradi che sostiene la produzione del calore ad esempio sul sole

Inizi risalenti al 1950-51 in Russia per i principi di dimensionamento di una nuova "macchina" toroidale chiamata "tokamak" che contiene il plasma elevato ad altissime temperature e tenuto lontano dalle pareti tramite forti campi magnetici.

Le alte temperature consentono la fusione di atomi con produzione di energia che si tenta di produrre in continuità ed in quantità superiore a quella spesa per portare il plasma a milioni di gradi.

Il plasma è un gas ionizzato costituito da elettroni strappati da atomi che diventano ioni ed è la materia prima nell'universo per le stelle (sole compreso) e le nebulose.

Ricerche iniziate negli Stati Uniti ad inizi anni 50 soppiantati dai Tokamak negli anni 70 che hanno dominano i progetti salvo più recenti tecnologie in sviluppo negli Stati Uniti ed in Australia con laser ad alta potenza concentrati entro un contenitore di isotopi pesanti (esempio deuterio e tritio) per avviare la reazione di fusione.

Spesso enfatizzati sui giornali i risultati di vari progetti di fusione con energia record prodotta dalla fusione per qualche secondo e superiore al record precedente

Di questi giorni la notizia con grande enfasi sui media e da settori politici che in un laboratorio negli Stati Uniti si è prodotta energia superiore a quella iniettata dai sistemi laser-Se si entra nei dettagli l'energia prodotta per qualche secondo ha superato di circa il 60% (pari a circa 1kWh) gli 1,6kWh iniettati dai laser nella cella cilindrica d'oro contenente gli isotopi-A parte si trova nel comunicato che l'energia spesa per alimentare i laser sarebbe di 90 kWh da meglio definire .Risultato scientificamente importante ma come correttamente comunicato la strada per utilizzi pratici della fusione è ancora lunga.

Il progetto JET-Joint European Torus- di Euratom è il più grosso Tokamak in funzione nel mondo con gli esperimenti iniziati nel 1983;la massima produzione di energia da fusione per poco meno di 5 secondi è stata di 59 MJ pari a 17,3 kWh (16 MW circa di potenza).

Mi concentro brevemente sul più grande progetto di fusione al mondo, ITER(International Thermonuclear Experimental Rreactor) con costruzione a Candarache in Francia iniziata nel 2013 e l'assemblaggio del Tokamak iniziato nel 2020.

Il consorzio comprende - Cina, gli allora 28 stati dell'Unione Europea più Svizzera, India, Giappone, Corea, **Russia** e Stati Uniti -che stanno lavorando in modo collaborativo con l'obiettivo ambizioso di far progredire la scienza e la tecnologia della fusione fino al punto di dimostrare la possibilità di progettare centrali a fusione.

Nel Tokamak di ITER, le temperature raggiungeranno i 150 milioni di gradi centigradi (dieci volte la temperatura al centro del Sole).

La «macchina» ITER con circa un milione di componenti peserà 23.000 tonnellate

Progettato per un elevato guadagno di potenza di fusione. Per 50 MW di potenza iniettata nel Tokamak attraverso i sistemi che riscaldano il plasma, produrrà 500 MW di potenza di fusione per periodi da 400 a 600 secondi. Questo rendimento è espresso da $Q \geq 10$ (rapporto tra la potenza termica in uscita e la potenza termica in ingresso) superando i record fino ad ora conclamati da altri impianti con Q vicini ad 1.

Dopo una serie di ritardi, la nuova data per l'inizio previsto dell'operazione deuterio-trizio era stata posticipata dal 2025 al 2035 prima dell'invasione dell'Ucraina.

Il budget iniziale era vicino ai 6 miliardi di euro, ma il costo totale per la costruzione e le operazioni è stimato intorno ai 20 miliardi; alcune stime superano i 50 miliardi di euro, sebbene queste cifre siano contestate da ITER.

Viene sottolineato dai detrattori:

- l'inutilità come risposta rapida e possibile al cambiamento climatico
- altri progetti di fusione avrebbero una frazione del costo di ITER
- la disponibilità di trizio (materia prima con il deuterio per la fusione) è limitata per applicazioni estese

Occorrerà verificare l'impatto sul progetto dell'invasione Russa dell'Ucraina ricordando che la Russia ha una quota del 10% nel progetto e rilevanti contributi tecnologici.

Non prevedo alcun impatto apprezzabile prima del 2060-70 da impianti commerciali che sfruttino la fusione nella produzione di elettricità e relativa immissione in sistemi elettrici

REATTORI NUCLEARI PIANIFICATI O PROPOSTI A LIVELLO MONDIALE FINO AL 2050

La IEA considera da qui al 2050 un raddoppio del contributo dal nucleare per produrre elettricità/calore e ciò implicherebbe **una potenza nucleare da installare in circa 30 anni di oltre 300 GW.**

La World Nuclear Association ha presentato **a Settembre 2022** un riepilogo dettagliato per **96 reattori pianificati in 16 nazioni per 98 GW e proposti in 31 nazioni per ben 364 GW.**

Per i **96 reattori pianificati** ben **38 sono in Cina, 25 in Russia e 12 in India** ma occorrerà vedere quanti di questi reattori entreranno effettivamente in costruzione specie al di fuori dei 3 paesi sopracitati.

Per i **332 reattori proposti** le nazioni con il maggior numero sono : **Cina con 160 reattori, India 28, Russia 21, Stati Uniti 18, Arabia Saudita 16, Inghilterra 10, Giappone/Sud Africa (Small Modular Reactors)/Turchia con 8 reattori in ciascun paese.** A parte la maggioranza di reattori di grande taglia, **si notano sia in grandi nazioni (es. Stati Uniti) sia in piccole (es. Giordania) un maggior inserimento di progetti con SMR.** **Si rammenta per i reattori proposti vi è una maggior incertezza sull'effettiva futura realizzazione** e la loro lista ha una sensibile variazione nel tempo.

LA DOMINANTE POSIZIONE RUSSA IN TECNOLOGIE NUCLEARI ED ESPORTAZIONE DI REATTORI

La Russia dagli albori dell'utilizzo del nucleare per usi civili ad oggi ne è stata all'avanguardia nello sviluppo

-prima elettricità da nucleare immessa in rete

-primo reattore di Generazione3+ in rete

-primo SMR collegato al sistema elettrico

-reattore di IV generazione in servizio ben prima dei progetti di GIF Generation IV

-innovatore nei progetti di fusione con il suo Tokamak; nel progetto ITER ha una quota del 10%ed è fornitore di importanti componenti e sistemi

I reattori della serie BN fast breeder raffreddati a sodio fuso fanno parte del cosiddetto progetto PRORYV ROSATOM con un ciclo di combustibile che richiede un numero ridotto in tonnellate /anno di nuovo combustibile ogni 1000 MW di reattori vecchi e nuovi collegati nel progetto(uso di scorie prodotte da vecchi reattori) (producendo un ridotto numero di t/anno di scorie ad alta radioattività per i depositi geologici finali.

In ogni caso i reattori BN russi sono gli unici in esercizio oggi dei vari progetti iniziati nel mondo della categoria Fast Breeder reactors experimental plants a parte un piccolo reattore da 20 MW in Cina ;basti ricordare il progetto Superphenix francese abbandonato nel 2012,quello Monju in Giappone abbandonato nel 2016 dopo 22 anni nei quali ha funzionato meno di 300 giorni e lo stesso per progetti in Germania, Stati Uniti ,Inghilterra ecc.-

La realizzazione all'estero di centrali nucleari russe-

La concorrenza cinese emergente

la posizione della Russia pre Ucraina nel mercato mondiale è impressionante come dagli **almeno 30 paesi che avevano esaminato o stavano esaminando l'utilizzo del nucleare e di di reattori russi nei loro piani, spinti da allettanti tipologie di collaborazione e finanziamenti** con realizzazioni che vanno da schemi BOO (*Build Operate and Own*) con cessione dell'energia al cliente, a BOT (*Build Operate and Transfer*), a fornitura della centrale e del combustibile con assistenza al servizio e varie altre condizioni.

In vari casi **la Russia include anche il ritiro delle scorie radioattive prodotte che causano spesso opposizione al nucleare in vari paesi.**

- 46 reattori in servizio al 2/12/2022 per oltre 55 GW in 11 nazioni al di fuori della Russia a partire dal 1980** con le varie tipologie del loro reattore VVER che hanno soppiantato i reattori RBMK tipo Chernobyl-
- 22 i reattori in costruzione al 2/12/2022 in 10 nazioni** secondo la IAEA (4 in Turchia, India e Cina, 2 in Slovacchia , Ucraina e Bangladesh, Egitto e 1 in Bielorussia e Iran);
- 9 i reattori in contratti finalizzati e in attesa di inizio costruzione** (2 in Egitto, 2 in Cina, 1 in Armenia, Iran, Turchia e Finlandia). Il reattore finlandese Hanhikivi del consorzio Fennovoima partecipato per 1/3 da Rosatom ha avuto il contratto rescisso dai finlandesi ;era stato scelto sulla base di tecnologia avanzata ,costi e tempi di realizzazione e parziale finanziamento e partecipazione russa al consorzio
- 7 i reattori per ordini ricevuti con finanziamento in via di definizione** (2 in India, Ungheria e Uzbekistan e 1 in Slovacchia);

30 reattori in fase di negoziazione in vari paesi in Asia, Africa, Europa e Sud America

La Cina sta ponendosi come principale concorrente della Russia effettuando una esportazione di centrali nucleari fortemente supportata a livello politico.

Progressi in parte **condizionati**

- **dal non avere ancora definito con la IAEA la convenzione per le responsabilità civili per danni**
- **non sia ancora definita la volontà di riprendersi le scorie** prodotte dai reattori come molto richiesto da vari paesi e fatto dalla Russia .

In sintesi

-2 reattori cinesi in servizio in Pakistan -2 reattori in costruzione in Pakistan

-4 reattori con finanziamenti pianificati(2 in Romania e 2 in Argentina)

-accordi vari di collaborazione per reattori in Inghilterra (qualificati i loro reattori e accordo con EdF con il 30% di quota per la centrale di Hinkley Point), **Iran, Turchia, Sud Africa, Kenia, Egitto, Sudan ,Armenia e Kazakistan**

CONSIDERAZIONI FINALI

La fame di energie primarie e di elettricità dei paesi non OCSE che domineranno lo scenario energetico e le emissioni climalteranti (già ora 2/3 delle globali).

L'Unione Europea che ha avuto nel 2021 l'8% di emissioni climalteranti che sono previste a meno del 5% nel 2030 , con i suoi ambiziosi e costosi programmi di decarbonizzazione conterà ben poco nella soluzione globale del problema se non passerà da una posizione eurocentrica a investimenti nei paesi in via di sviluppo con tecnologie green.

Occorre notare che l'Africa che ha oggi 1,4 miliardi di abitanti, che diventeranno 2,5 nel 2050, ha un consumo pro capite di 1/12 di quello dei paesi OCSE ed 1/20 di quello degli Stati Uniti.

A livello mondiale il petrolio nel 2021 ha una quota dominante del 31% nei consumi di energie primarie ed il carbone con il 36% nella produzione di elettricità dove il nucleare è al 10%, l'idroelettrico al 15% ed altre FER al 13% con eolico e fotovoltaico poco meno del 7% e 4% rispettivamente.

Il carbone risulta dominante nei paesi non OCSE sia nei consumi di energie primarie (36%) e sia nella produzione dell'elettricità (46%) dove il nucleare è al 5% e le totali rinnovabili al 26,5%; nella UE il petrolio domina (35,5%) nei consumi di energie primarie ed il nucleare come singola fonte (25,3%) nella produzione di elettricità dove idroelettrico ed altre FER sono al 12 e 25% rispettivamente.

Nei consumi di energie primarie le fonti fossili sono passate da una quota dell'85% nel 2000 all'82,3% del 2021 con un decremento medio annuo di quota dell'1,5 per mille; nella produzione di elettricità si è verificato un fortissimo sviluppo di eolico e fotovoltaico e le fonti fossili da una quota del 64,5% al 2000 sono passate al 51,5% nel 2021 con un decremento medio annuo di quota dell'1%.

Per il nucleare al 2/12/2022 l'estremo oriente risulta, con Cina in testa, la regione che ha la maggior potenza nucleare in costruzione. La Cina con ambiziosi programmi nucleari, nel 2021 pur con una share di elettricità dal nucleare di solo il 5% ha superato la Francia per l'energia prodotta dal nucleare, diventando seconda dopo gli Stati Uniti con un sorpasso previsto in circa 10 anni.

Il nucleare presenta notevoli vantaggi per le ridotte emissioni di CO₂ per energia prodotta secondo un Life Cycle Assessment (metà di fotovoltaico ed idroelettrico e simile all'eolico), bassa occupazione di suolo per energia prodotta, programmabilità della produzione di elettricità e contributi all'inerzia e potenza di corto circuito del sistema elettrico per un affidabile e stabile funzionamento; ha però aspetti non trascurabili per l'opinione pubblica. In particolare, a parte il costo dell'energia prodotta specie in UE per nuovi reattori, le lungaggini per autorizzazioni e finanziamenti, i principali problemi riguardano la sicurezza per possibili gravi conseguenze di incidenti ed il trattamento e cimitero delle scorie ad alta radioattività per millenni.

La presente crisi energetica con prezzi alle stelle specie del gas ed i problemi della sicurezza delle forniture energetiche hanno spinto ad un auspicato rinascimento del nucleare spesso non ben definito (se non con la parola "pulito") ed a considerare l'utilizzo sia di piccoli reattori "prefabbricati" (SMR) sia di reattori della cosiddetta IV generazione e persino della fusione nucleare con temperature di 150 milioni di gradi Kelvin.

Per SMR e Generation IV reactors o similari occorrono almeno 2 decenni per poter avere in servizio commerciale ed in entità non trascurabile loro impianti collegati alla rete.

La fusione ed il progetto ITER è fondamentalmente un progetto di ricerche sul plasma e suo confinamento e sul comportamento di materiali ad alte temperature per dimostrare la possibilità di progettare centrali a fusione ; in funzione commerciale impianti a fusione non prima di circa 50 anni.

Con particolare riferimento alla UE, per quanto riguarda il nucleare sarà opportuno nel breve-medio termine poter utilizzare al massimo la disponibilità dei reattori esistenti (ahimè non valido per l'Italia), estendendone in modo sicuro la vita utile, anche per la produzione di idrogeno *CO2 free* a costi ben inferiori, specie con reattori ammortati ,rispetto all'idrogeno verde da rinnovabili che sono da sviluppare e privilegiare per usi elettrici sempre più diffusi.

Il costo di realizzazione di nuove centrali nucleari con le migliori tecnologie esistenti (reattori di III Generazione+ , più sicuri ed efficienti delle generazioni precedenti) risulta elevato in UE e con un costo del MWh prodotto vicino ai 130 €; ciò se non vengono riconosciuti i vantaggi che apporta al sistema elettrico sopra menzionati.

Sono essenziali nuove regole di mercato da introdurre con gradualità ed approfondite analisi per minimizzare i costi delle bollette ai clienti finali addebitando i costi addizionali al sistema causate da non programmabilità ed altro di alcune produzioni di energia (valutate ora al solo costo di produzione al sito) o dandole come vantaggio a chi non causa questi extra costi ,chiaramente con una adeguata penalizzazione delle emissioni climalteranti. Tale approccio dovrebbe essere adottato anche nella pseudo tassonomia " concessa" dalla UE a gas e nucleare.

L'uranio utilizzato in UE proviene praticamente tutto dall'estero; il 45% da Canada ed Australia ma il 14% da Russia ,il 14% da Kazakistan ed il 24% da Niger+Namibia ponendo un possibile problema di sicurezza degli approvvigionamenti meno serio però che per il gas avendo l'uranio possibilità di stoccaggi pluriennali locali tali da garantire una certa sicurezza-sebbene non illimitata- a forniture di energia elettrica da nucleare.

Per prospettive di lungo periodo occorre tuttavia procedere anche in UE con investimenti in ricerca e sviluppo per nuove tecnologie nucleari non prospettando tuttavia a livello politico illusioni su un nucleare pulito ora od a breve, specie in un paese come l' Italia.

Si pone la questione su quali saranno gli effetti dell'invasione dell'Ucraina e le sanzioni verso la Russia sul loro proseguimento di ingenti investimenti in ricerca e sviluppo ed oneri finanziari per le attività interne ed all'estero nel nucleare per usi civili (partecipazione a Gen IV reactors ,ITER,ecc.) gestiti dal colosso Rosatom indiscusso leader mondiale nel settore..

Si pone anche il problema per i piani energetici di quei paesi con reattori russi in servizio ,costruzione od in fase di finalizzazione con combustibile e forte assistenza all'O&M dalla Russia e ritiro delle scorie prodotte (o come per la Finlandia a seguito del loro annullamento dell' ordine di un reattore alla Russia a tempistiche per sostituzioni e trattative per un nuovo reattore da altri fornitori).

Una questione essenziale è quella di una efficace e corretta informazione sulla transizione energetica/ecologica, coinvolgendo i cittadini senza illuderli su presunti vantaggi economici ma presentando chiaramente i vantaggi ed i costi e la suddivisione degli oneri, creando consenso verso tutte le tecnologie favorevoli alla decarbonizzazione, nucleare incluso, e con un approccio di giusto compromesso tra le ideologie e la ragione.

**GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE E
PAZIENZA**

alessandro.clerici2406@gmail.com