



Il nuovo Nucleare

Marino Mazzon

**Commissione Cambiamenti Climatici
Ordine Ingegneri Venezia**

1



1.

**Introduzione:
Alcuni dati di fatto**

2

Intanto: quanta potenza serve e quanto spazio ci vuole? CIRCA

quanta potenza serve

Cosa	Potenza media
casa	1 kilowatt
cittadina	1 Megawatt
città media	1 Gigawatt (GW)
Italia	130 GW
Stati Uniti	1000 GW
Il mondo	5000 GW

Quanto «spazio» per produrre 1 GW (= per una città)

Fonte di energia	Watt per mq	Un quadrato da... km per 1 gigawatt
Nucleare	500-1000	1
Idroelettrica	5-50	4,5
Solare	50-100	4
Eolica	100-500	13
Biomasse	Meno di 1	31

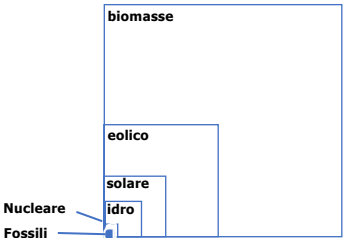
(numeri da prendere MOLTO con le pinze!)

Italia: dati Terna e GSE 2024:

Potenza installata: ca 130 GW
Di cui da solare: ca 37 GW

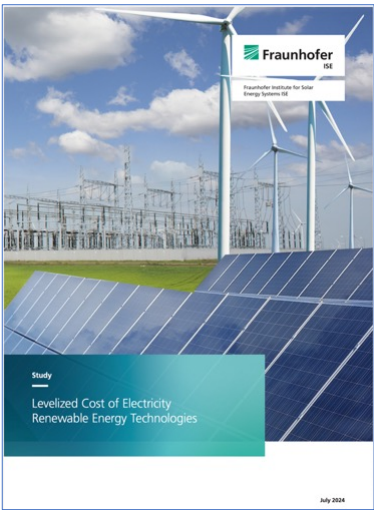
Altri 100 GW solare? 1.300 kmq @ 75w/mq
Un quadrato da: 36 km (provincia MI)

B. Gates, Clima, come evitare il disastro, La Nave di Teseo; Terna



3

Quanto costa produrre l'energia



LCOE = Levelized Cost of Energy = Costo dl ciclo di vita dell'energia

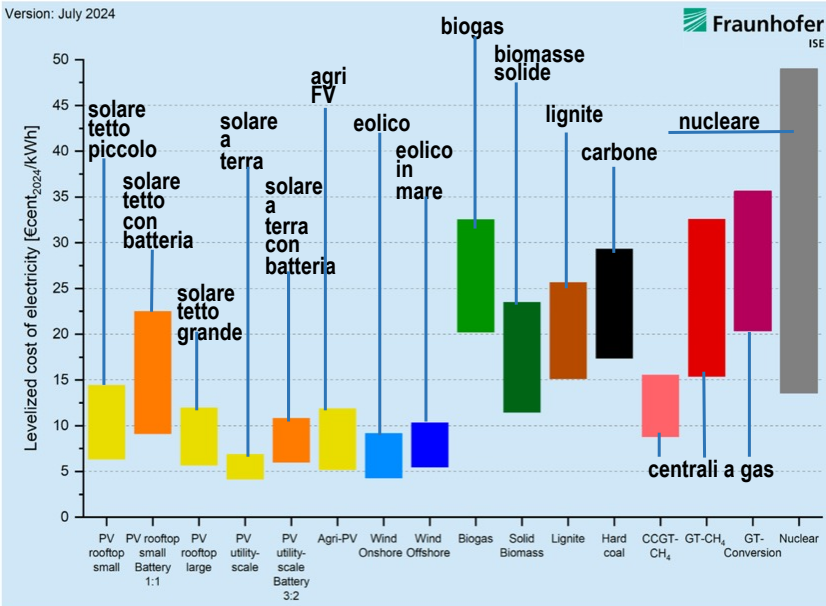
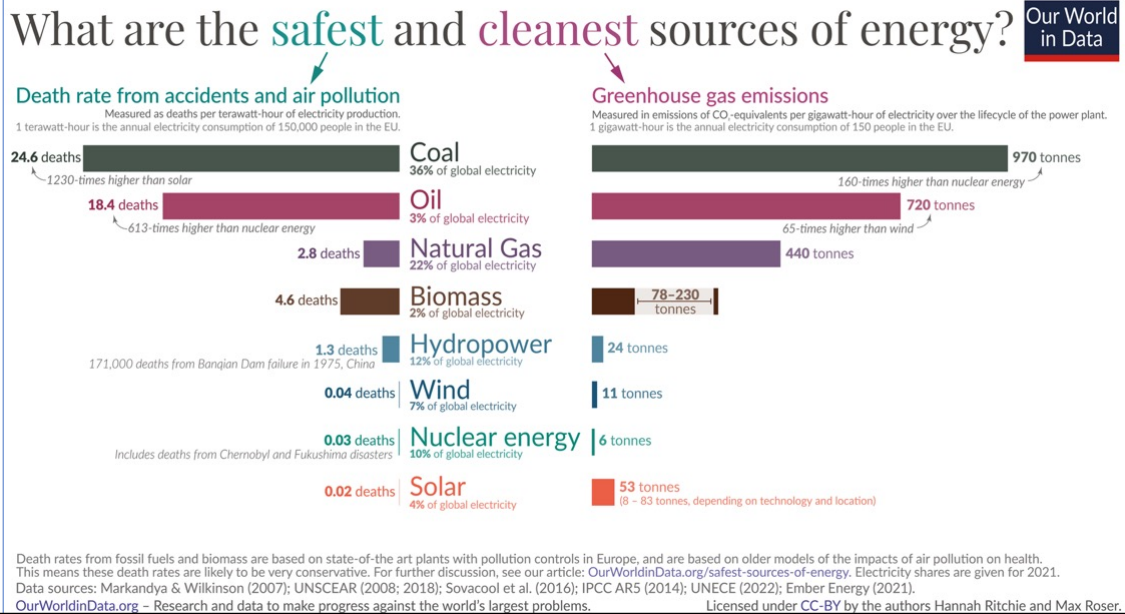


Figure 1: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Germany in 2024. Specific investments are considered using a minimum and maximum value for each technology.

4

Rinnovabili e nucleare sono molto più «sicure» delle fonti fossili



5

Le centrali nucleari, guardando alla decarbonizzazione

I principali vantaggi:

- Emissioni CO₂eq molto minori rispetto ai fossili
- Alto fattore di capacità (ore/anno di produzione), rispetto a solare ed eolico
- Contributo al «base load» nel sistema energetico a compensare l'intermittenza di solare/eolico
- Minor rischio oggettivo rispetto ai fossili

E le principali problematiche:

- Il maggior costo per il MW
- I rifiuti radioattivi e il relativo stoccaggio
- La grande complessità costruttiva
- Acqua per il raffreddamento
- I ritardi e i fuori budget della realizzazione
- I disastri di Chernobyl e Fukushima nello sfondo
- Questioni di salute: nuovo studio di Harvard



6

Lo studio di Harvard che complica il «rinascimento nucleare»

- Nature comm. 23 feb 26: «National Analysis of Cancer mortality and proximity to nuclear power plants in the US»
- Osservazione: le morti per cancro aumentano del 15-20% per persone di 45-85 anni che vivono vicino alle centrali. Trovati 6400 morti in più per tumore l'anno.
- Per dimostrare che ci sia una correlazione diretta servono però altri studi.
- Il tasso comunque scompare alla distanza oltre 30 km.
- Analisi: estesa a tutte le centrali USA e tutti i tipi di tumore.
- Campione: tutte le contee fino a 200 km dalle 70 centrali; solo le persone residenti tutto il tempo fra il 2000 e il 2018, con fattori di correzione per stili di vita, ambientali, reddito, strutture sanitarie, obesità...

<https://www.nature.com/articles/s41467-026-69285-4>

<https://www.qualenergia.it/articoli/studio-complica-rinascimento-nucleare/>

7



2.

**Il rapporto annuale
2025
sull'industria nucleare
nel mondo.**

8

Il rapporto 2025 sull'industria nucleare

Pubblicato a settembre, 590 pagine. Indice:

- Situazione mondiale: quante centrali attive, quante in costruzione, quanto tempo di costruzione, quanta energia si produce, proiezioni
- Focus Paese per Paese
- Situazione a Fukushima
- Stato del decommissioning
- Paesi che «entrano» nella scena
- Interdipendenze con la Russia
- Gli SMR (Small Nuclear Reactors)
- La connessione alle reti
- Il nucleare e le rinnovabili

The World Nuclear Industry Status Report 2025



FRIEDRICH
EBERT
STIFTUNG

Federal Office
for the Safety of
Nuclear Waste Management

ENERGIE
FUTUR

HEINRICH BÖLL STIFTUNG

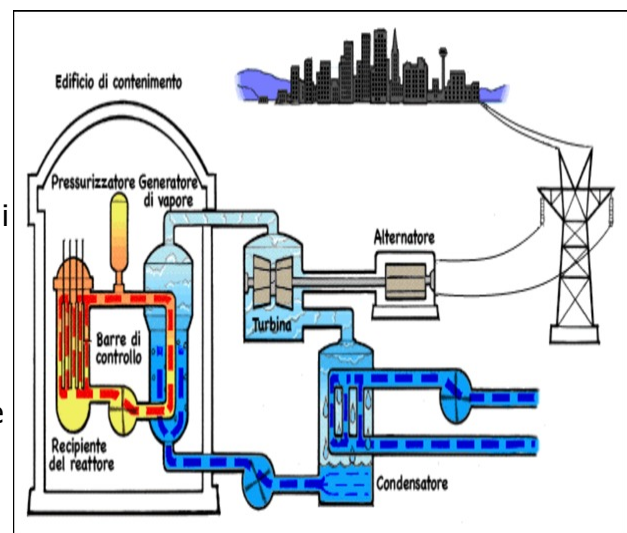
SIES

9

Le centrali nucleari OGGI sono tutte a FISSIONE.

Esistono molte varianti tecnologiche ma:

- Il combustibile è l'uranio 235, fissile
- Si bombarda l'uranio con degli elettroni
- L'uranio diventa 236, che è instabile e si spezza iniziando una reazione a catena
- La reazione sviluppa una quantità enorme di energia (calore)
- Il calore va a vaporizzare acqua
- Il vapore alimenta una turbina che genera elettricità
- Il processo genera diverse scorie radioattive con tempi di emivita da 30 anni (cesio) a 24.000 anni (plutonio) e oltre.
- Problematiche: stoccaggio scorie; smantellamento (decommissioning).

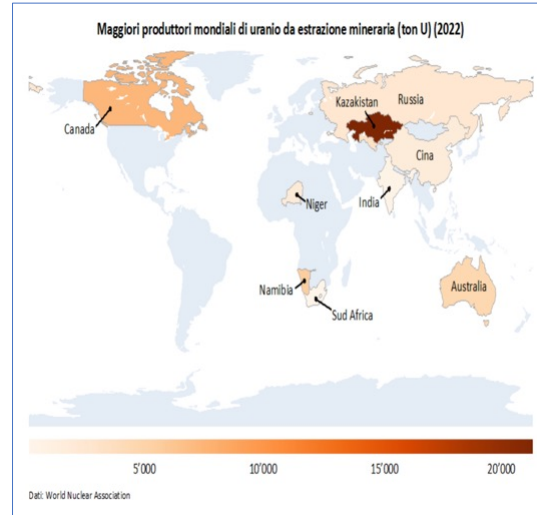


10

10

Geopolitica della disponibilità di uranio : ridurre il rischio

- I produttori sono pochi e alcuni sono instabili (Russia, Niger)
- Il Kazakistan produce il 44% dell'uranio
- La Russia ha il 44% delle capacità di arricchimento mondiale (e dipende da tecnologie europee per farlo)
- La Russia è oggi il solo fornitore commerciale di uranio HALEU per gli SMR (High-Assay Low-Enriched Uranium: alto titolo e meno arricchito)
- USA, Canada, Europa lavorano per potenziare la produzione domestica di HALEU e arricchimento
- Cina aumenta le importazioni dalla Russia; USA le diminuiscono del 50%
- Aumento della volatilità dei prezzi



11

11

Quante centrali ci sono in giro

- 408, di cui 100 in Europa
- Classifica: USA 94, 18%; Cina 59, 4%; Francia 57, 67%; Russia 36, 18%; Sud Corea 24, 30%; etc
- Europa 100, 23%
- Tutte: 408, **9%**

Quante centrali in costruzione

- 63, di cui 0 in USA, 1 in Europa
- Classifica: Cina 32, Russia 7, India 6, Egitto 4, Turchia 4, Sud Corea 3, Bangladesh 2, UK 2, etc
- In maggioranza: potenza circa 1 GW
- Costruzione in ritardo: 22-26 al momento

p.s. **uranio arricchito**: con percentuale di isotopo 235 più alta, ottenuta centrifugando.
Percentuali di 235: Uranio naturale 0,72; per le centrali 3-5%; SMR 5-20%; per bombe, navi, ricerca >20%

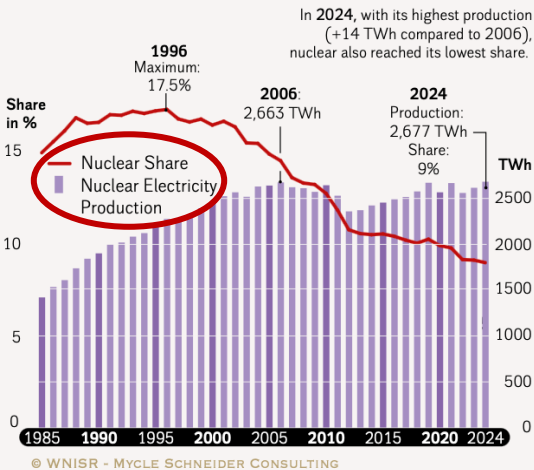
12

12

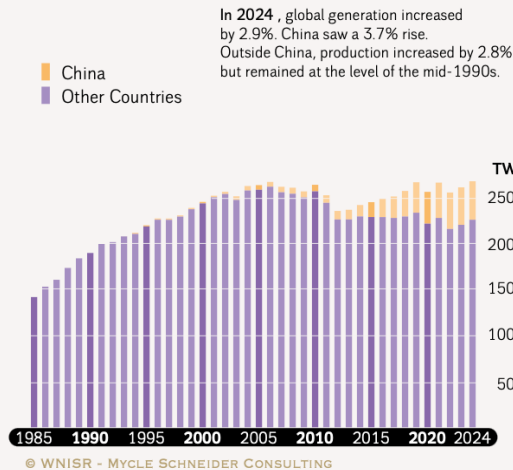
La produzione da nucleare non cresce: anzi, tolta la Cina diminuisce

Nuclear Electricity Production 1985–2024 in the World...

in TWh (net) and Share in Electricity Generation (gross)



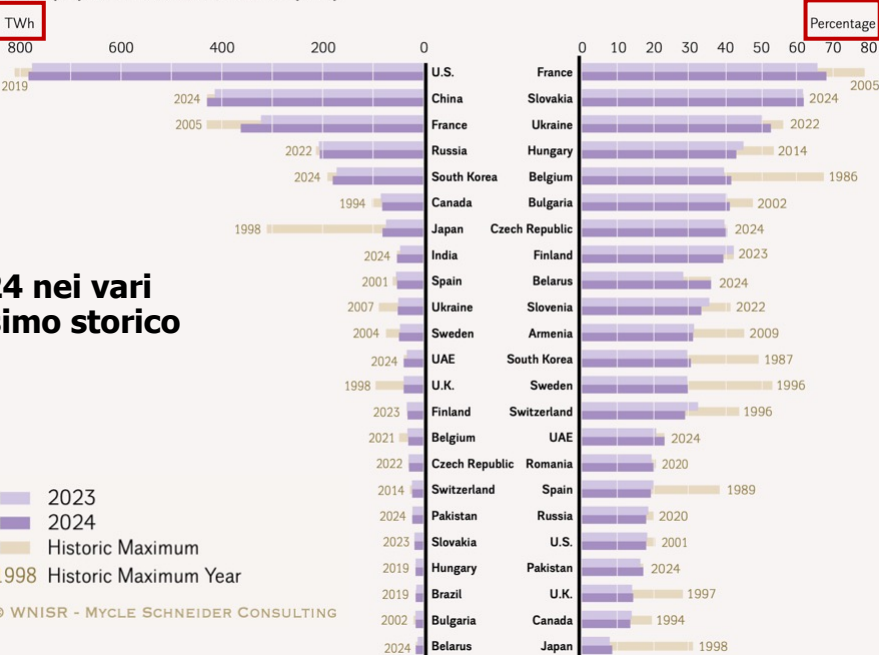
...and in China and the Rest of the World in TWh (net)



13

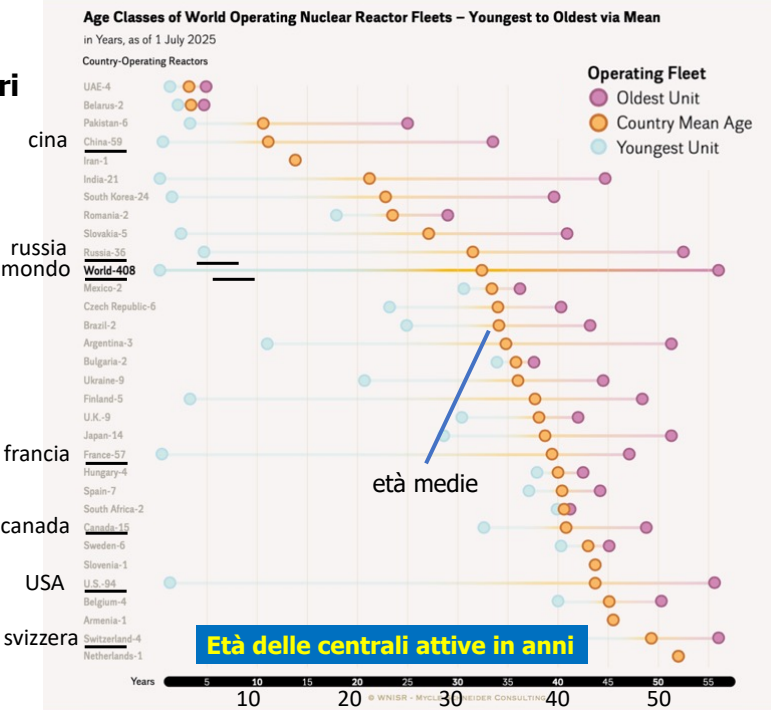
La produzione 2023-24 nei vari Paesi rispetto al massimo storico è diminuita per molti

Nuclear Production in 2023–2024 and Historic Maximum in TWh (Net) and Share in Electricity Production (Gross)



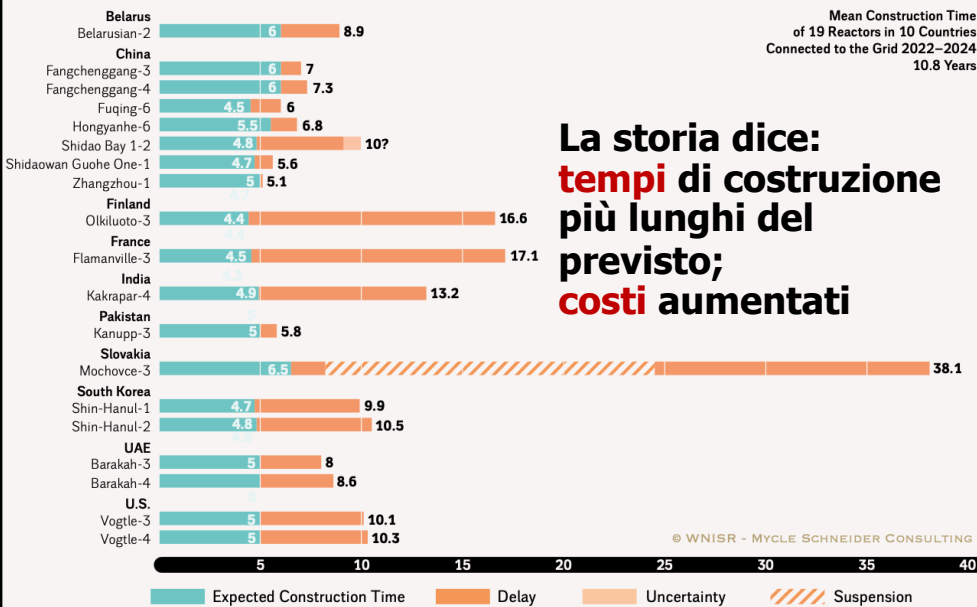
14

La vetustà delle centrali nucleari esistenti



15

Expected vs. Real Duration from Construction Start to Grid Connection for Startups 2022–2024
in Years



16

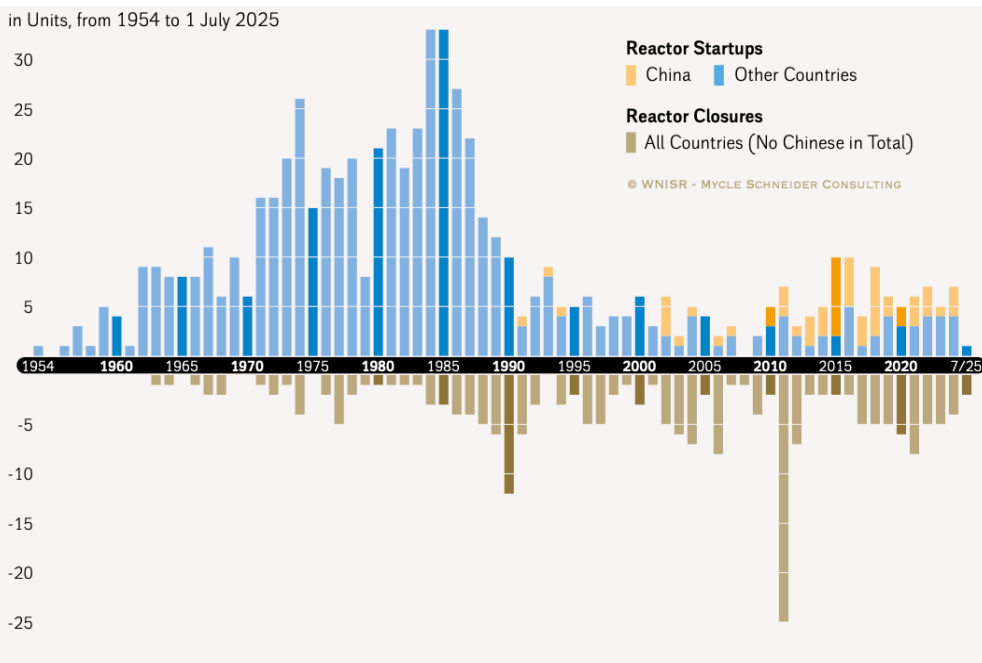
Alcuni casi eclatanti di ritardi, costi o rischi economici

- **Olkiluoto, Finlandia**
 - La prima centrale EPR in Europa (European Pressurised Reactor), ad acqua pressurizzata
 - Secondo WNISR: «un disastro industriale e finanziario»
 - Iniziata nel 2003, doveva finire nel 2008 e invece è finita nel 2023.
 - Doveva costare 3,5 Mld€ e invece è costata 11 Mld (5,5 investimento + 5,5 perdite)
- **Flamanville, Francia**
 - Iniziata nel 2007 doveva finire nel 2010 e invece è finita a fine 2024.
 - Doveva costare 3,3 Mld€ e invece è costata 19 Mld€.
- **Sizewell, Regno Unito, in costruzione**
 - Costruzione iniziata nel 2024, tempo previsto 9-12 anni.
 - Budget iniziale 20 Mld€, budget attuale circa 38 Mld.
 - Fortissime polemiche (incluso il FT) criticano complessità e crescente rischio sui costi .
 - Secondo Bloomberg, il costo per MW prodotto sarà >2,5 volte quello del solare o eolico.

17

17

Centrali aperte e chiuse all'anno dal 1950



18

Conclusioni del rapporto mondiale, 1

- Nuovo record di produzione, ma in calo al di fuori della Cina
- Meno Paesi costruiscono centrali nucleari:
 - Delle 63 in costruzione, 22-26 sono in ritardo e 14 sono in ritardo
 - La Russia domina il mercato con 27 unità in costruzione (20 all'estero)
 - Solo la francese EDF sta costruendo centrali all'estero: 2.
 - Il 95% delle costruzioni avvengono in Paesi dotati di armi nucleari.
- Dei 218 reattori chiusi, solo 23 sono stati smantellati e 9 sono «puliti»
- SMR: finora ci sono solo 2 approvazioni di progetti e nessuna costruzione in Occidente.

19

19

Conclusione del rapporto mondiale, 2

- Sfide dell'integrazione dell'energia nucleare nel sistema energetico.
 - Fotovoltaico si espande, riduce i costi e aumenta le prestazioni.
 - Progresso di elettronica di potenza e batterie di rete.
 - Insieme, compongono un **sistema energetico flessibile** che supera i sistemi centralizzati fossili e nucleari.
- Il solare aggiunge centinaia di Gigawatt, il nucleare no. Nel 2024:
 - Investimento in rinnovabili: 730 Mld\$, 21 volte più del nucleare
 - Capacità aggiunta da solare+eolico: **565 GW** contro **5,4 GW** di nucleare
- Conclusione generale:
 - «Il 2024 ha visto un **aumento senza precedenti** della capacità solare e delle batterie, guidato da un continuo e significativo calo dei costi. Mentre i mercati energetici sono in rapida evoluzione, **non ci sono segni** di una vigorosa costruzione di impianti nucleari e continua il **lento declino** del ruolo dell'energia nucleare nella produzione di elettricità.»

20

20



21

Cosa sono gli Small Nuclear Reactors (SMR) di cui si parla tanto

IAEA: “una nuova generazione di reattori nucleari progettati per generare energia elettrica intorno a 300 MW, i cui componenti e sistemi possono essere fabbricati in officina e poi trasportati come moduli nei siti per l'installazione”.

Ci sono molte Società impegnate, con diverse configurazioni tecnologiche a fissione.

Minor costo stimato di investimento ma minore economia di scala: costo stimato per MW più alto.

Oggi ci sono solo 2 SMR, sperimentali: uno in Russia (70 MW) e uno in Cina (210 MW).

Si parla di avere il primo SMR commerciale (americano?) a inizio anni 2030. Attendiamo.

[Science Direct](#), ott. 24



22

Le caratteristiche degli SMR, per come vengono «venduti»

- Dimensioni e modularità, secondo progetti standardizzabili; e assemblati in sito
- Potenza ridotta e tipicamente 300 MW, scalabile aggiungendo moduli. Ma anche mini reattori da 10 MW
- Installabili in siti non adatti alle grandi centrali
- Ridotti costi e tempi stimati per la costruzione
- Alta sicurezza, anche sistemi di controllo passivi
- Utilizzabili anche per applicazioni mirate: dissalazione, produzione di idrogeno, alimentazione di data centers e di processi industriali difficili da decarbonizzare.
- Attualmente ci sono oltre 80 progetti di SMR in atto, allo stadio di progetto concettuale o preliminare.

International Energy Assoc., International Atomic Energy Assoc. e altri



23

Cosa dicono i critici (e non solo)

- L'energia non sarà più economica dei reattori grandi: ci si aspetta che il costo per MW sia più alto, almeno nella fase iniziale di diffusione sul mercato.
- Non sono necessariamente più sicuri degli altri. Le diverse tipologie necessitano poi di analisi diverse, normative e di sicurezza.
- Non ridurranno il problema del che fare con le scorie.
- E' improbabile che gli SMR possano fornire energia affidabile e resiliente fuori dalla rete elettrica per alimentare Data Centers, idrogeno etc. (ciò nonostante, i provider di IA e i grandi Data Center sono interessati).
- Gli SMR non usano più efficientemente il combustibile, nonostante alcune tipologie di reattore prevedano uranio HALEU (basso arricchimento e alto dosaggio) rigenerabile in parte durante l'operatività del sistema.
- Essenziale, quindi, una comprensione realistica di costi, rischi e tempi.
- Fondamentale quindi il tema dei finanziamenti. Es.: il caso NuScale.

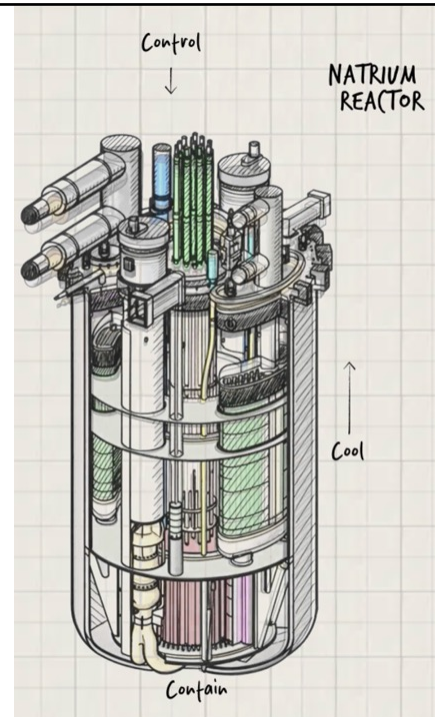
Union of Concerned Scientists, 30 apr 24, GPT

24

24

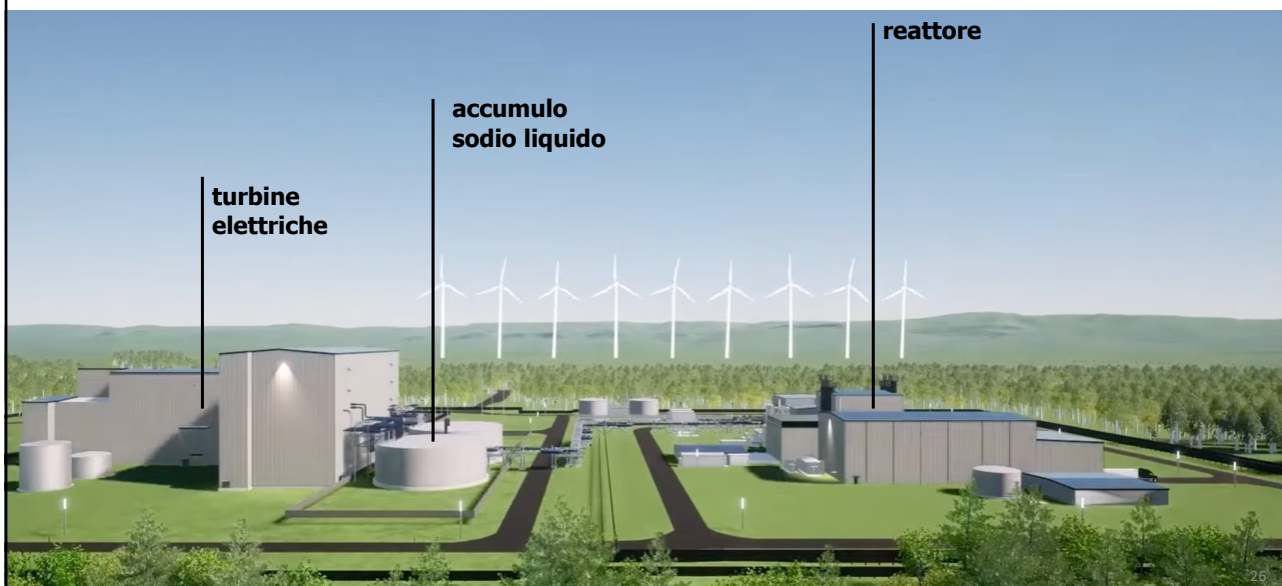
**Un esempio, interessante, FORSE finito a inizio dei '30:
il Natrium di Terrapower + GE Hitachi** (Natrium: Sodio)

- Reattore «veloce» raffreddato a **Sodio** liquido e integrato con una unità di accumulo (caratteristica peculiare).
- Potenza 350 MW, modulabile grazie all'accumulo, che fornisce altri 100-500 MW per oltre 5 ore.
- La configurazione è pensata per integrarsi con solare/eolico o anche per fornire calore ad alta temperatura a industrie.
- Co-finanziato da Breakthrough Energy (B. Gates) e altri.
- Finanziamento attuale: 2 Mld\$, circa metà dal DOE
- Costruzione iniziata a Kemmerer, Wyoming, per la parte Accumulo + Turbine elettriche
- Arrivata a ottobre l'approvazione DOE anche per la parte nucleare
- Si inizia a costruire il modulo del reattore.
- 2026: firmato accordo con META per 2+6 reattori.



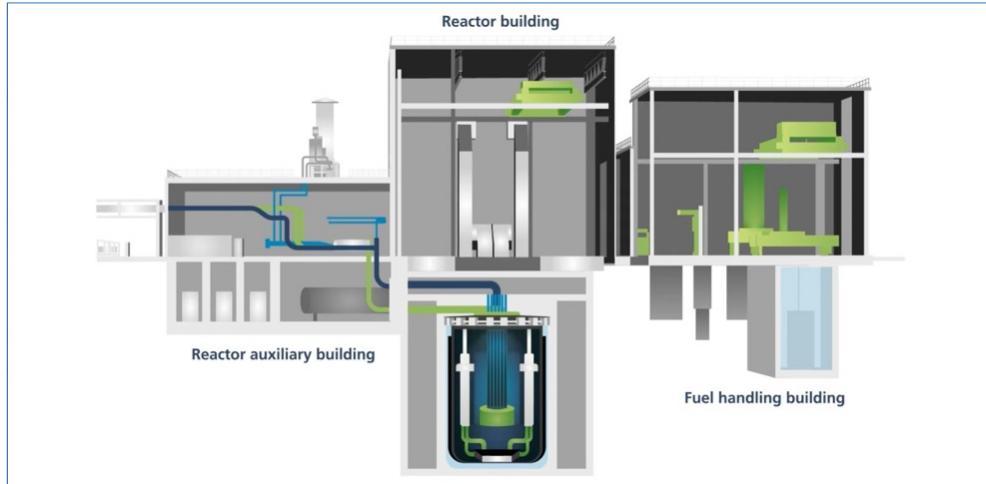
25

Il Natrium è costituito da due «isole» funzionalmente separate per semplificare accessi e procedure di sicurezza.



26

L'isola nucleare, l'area ad alta sicurezza

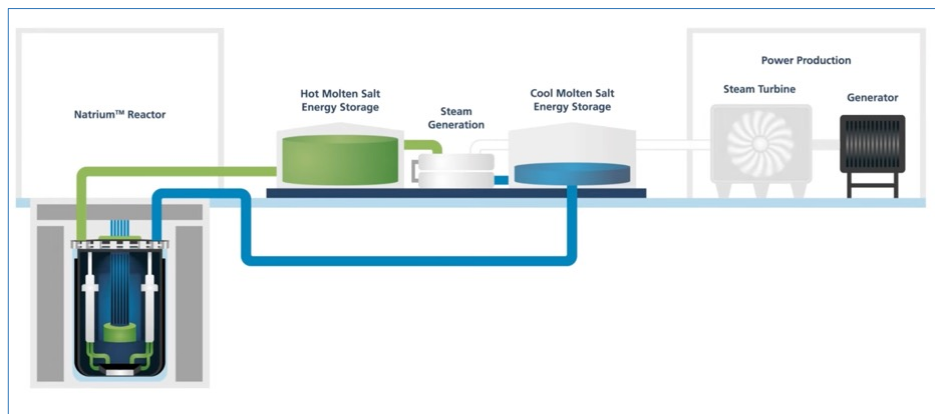


Il sodio liquido (che bolle a 870°C) riempie il contenitore dove avviene la reazione. La reazione produce elettroni che scaldano il sodio liquido. Il sodio liquido caldo non è radioattivo e viene mandato all'isola di accumulo.

27

27

L'isola di accumulo e generazione: si può modulare la potenza



Il sodio liquido del contenitore «caldo» (verde) passa in uno scambiatore dove si genera vapore supercritico che va in turbina. Modulando la quantità di sodio si modula la potenza della turbina. All'uscita dello scambiatore il sodio liquido passa nel contenitore «freddo» e torna al reattore, dove la reazione a catena lo riscalda di nuovo.

28

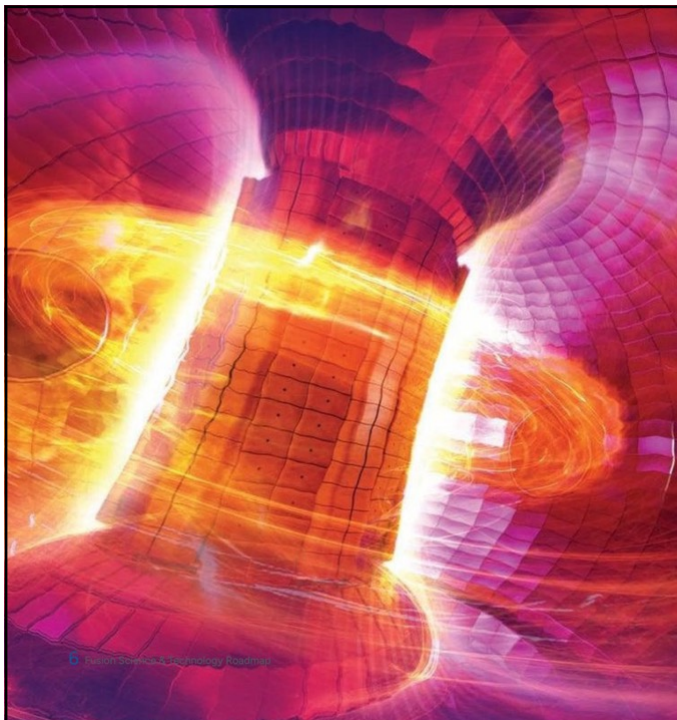
28

Ma al 2050 quanti SMR saranno operativi in giro, in generale?

- Primo: servono delle proposte concrete di impianti SMR su siti veri.
- Servono pure le procedure autorizzative, che sono complesse e lunghe
- Le opinioni pubbliche (dove esistono) devono accettarli (prima o poi?)
- L'esperienza dice che i tempi di costruzione sono di oltre 6 anni, sempre.
- L'esperienza dice che i costi finali sono molto più alti del previsto, sempre.
- Quanti. Le rinnovabili **oggi** producono ca **4600 TWh, che è meno del 10% del fabbisogno energetico**. Solo per fare questo numero occorrono ca **2000 SMR** da 300 MW l'uno.
- Se il primo SMR commerciale uscisse nel 2035, testato e provato tanto da avere ordini da terzi, e tenuto conto dei processi autorizzativi, reperimento **fondi** (privati + incentivi pubblici?), potremmo vederne
 - **5-6** nel mondo entro il 2040 o giù di lì?
 - Qualche **centinaio** entro il 2050 o giù di lì? (miracolo)
- A meno che costo e dinamica di sviluppo non siano come quelle del solare...

29

29



4.

Il nuovo nucleare 2: Gli SMR a fusione

30

Insomma esiste o no la fusione? E per quando ci sarà?

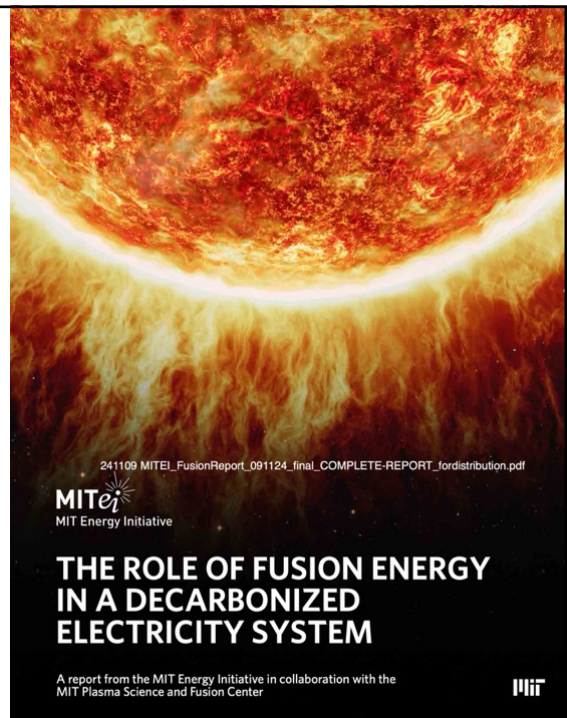
- **La battuta** che gira da tempo: la fusione ci sarà fra 30 anni, per sempre!
- Le sfide ancora aperte:
 - **Energia Netta**: non si è ancora riusciti a generare «praticamente» più energia di quella che entra nel reattore per alimentarlo
 - **Temperature estreme**: il combustibile va portato a 150 milioni di gradi e va confinato con campi magnetici altissimi
 - **Gestione dei materiali**: i neutroni generati dalla fusione possono danneggiare i materiali del reattore.
- **Ma** ci sono progressi:
 - **Nuovi magneti**: superconduttori a cosiddetta «alta temperatura» consentono di fare magneti più piccoli, perfetti per le tipologie di SMR a fusione
 - **Sinergia fra progetti**: progetti come CFS o Helion, in sinergia con l'IA, fanno pensare alla raggiungibilità di un risultato a inizio anni 30.

31

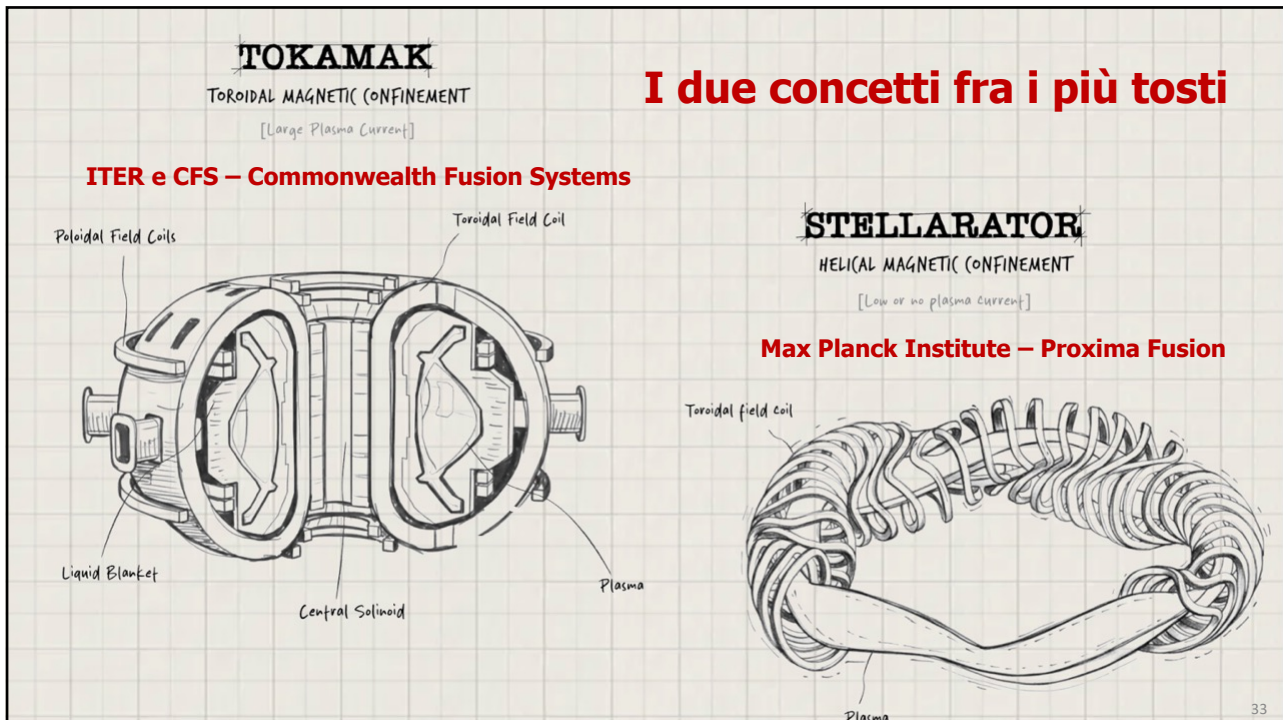
31

Principio di funzionamento

- Bisogna far fondere fra loro due isotopi di idrogeno. (La fissione rompe isotopi di uranio.)
- Un campo magnetico altissimo pressa gli isotopi in stato di plasma (gas ionizzato) fino a raggiungere la temperatura di 150 M °C.
- La fusione genera elio e neutroni che rilasciano calore, sfruttato per fare elettricità.
- E' sicura: cessa appena si interrompe l'alimentazione di combustibile o si spegne la camera che contiene il plasma.
- Le scorie sono a bassa attività che decade in decine di anni o poco più. Molto meno della fissione.
- Una delle sfide: La camera del plasma è a 150 milioni di Gradi; i magneti stanno appena fuori e vanno tenuti a circa -180°C. Mica male!



32



33

FUSION
INDUSTRY ASSOCIATION

The global fusion industry in 2025
Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association

Alcuni dati sulla industria globale della fusione

THE FUSION INDUSTRY

- Ci sono oltre 50 Industrie attive nella fusione nucleare (a parte la scienza, che lavora intensamente a parte)
- Investiti finora 9,7 Mld, in gran parte privati, ma solo 3 Società hanno oltre 1 Mld di investimenti:
 - CFS, Commonwealth Fusion Systems: >3
 - Tae Technologies: 1,3
 - Helion Energy: 1
- La maggior parte delle società pensa che uscirà un sistema commerciale nella decade 2030. Sarà?
- Nel complesso si parla con ottimismo ma in generale sono molte le questioni aperte e da superare.

34

La «roadmap» americana

- Pubblicata a ottobre 25 stabilisce un programma pubblico con l'obiettivo di «scalare» il settore privato della fusione per gli anni 2030.
- Strategia:
 - Costruire l'infrastruttura che supera i gap
 - Innovare la collaborazione scienza-industria
 - Crescere l'ecosistema della fusione e le catene di fornitura, attraverso collaborazioni pubblico-private internazionali.
- Identifica (ma non temporizza) le 42 (!) pietre miliari delle **6 aree chiave**: materiali; plasma; confinamento magnetico; ciclo del combustibile; «coperta»; ingegneria e integrazione.

U.S. DEPARTMENT of ENERGY | Office of Science
Fusion Science & Technology Roadmap



BUILD
INNOVATE
GROW

35



Quale sarà la quota della fusione nucleare in USA? Cosa dice il MIT

Rapporto pubblicato a nov 24, 160 pag., è il risultato di un anno e mezzo di lavoro.

36

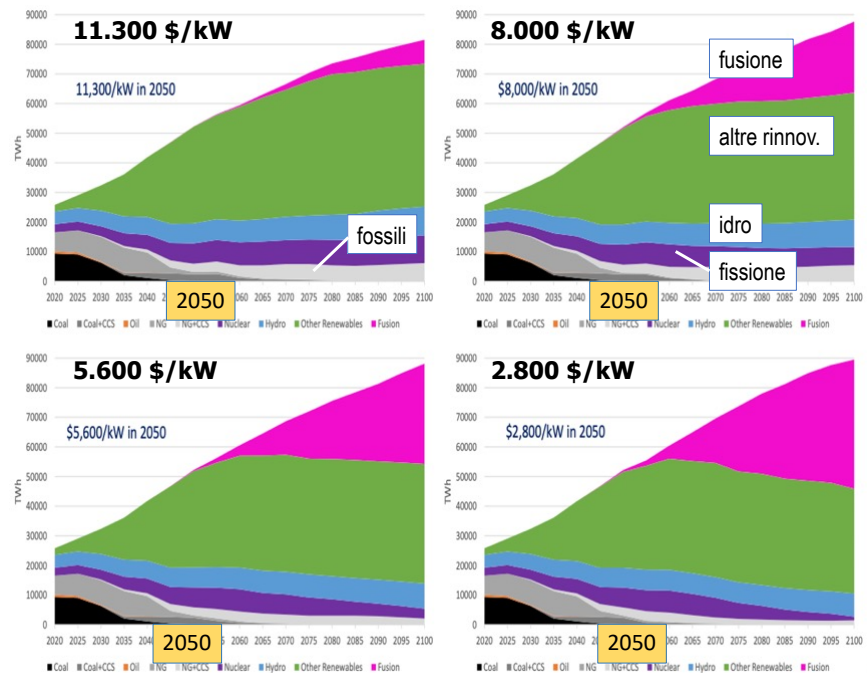
36

Dal rapporto MIT

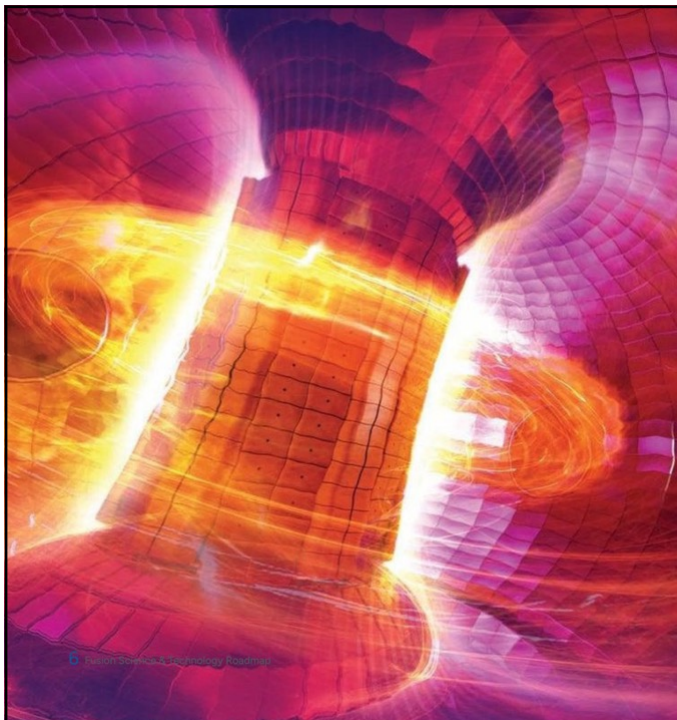
Previsione della **quota** di energia a fusione al 2100 per diversi costi/kW al 2050

senza tener conto degli oneri finanziari.

In tutti i casi prima del 2050 non ci sarà nulla o quasi di significativo.



37

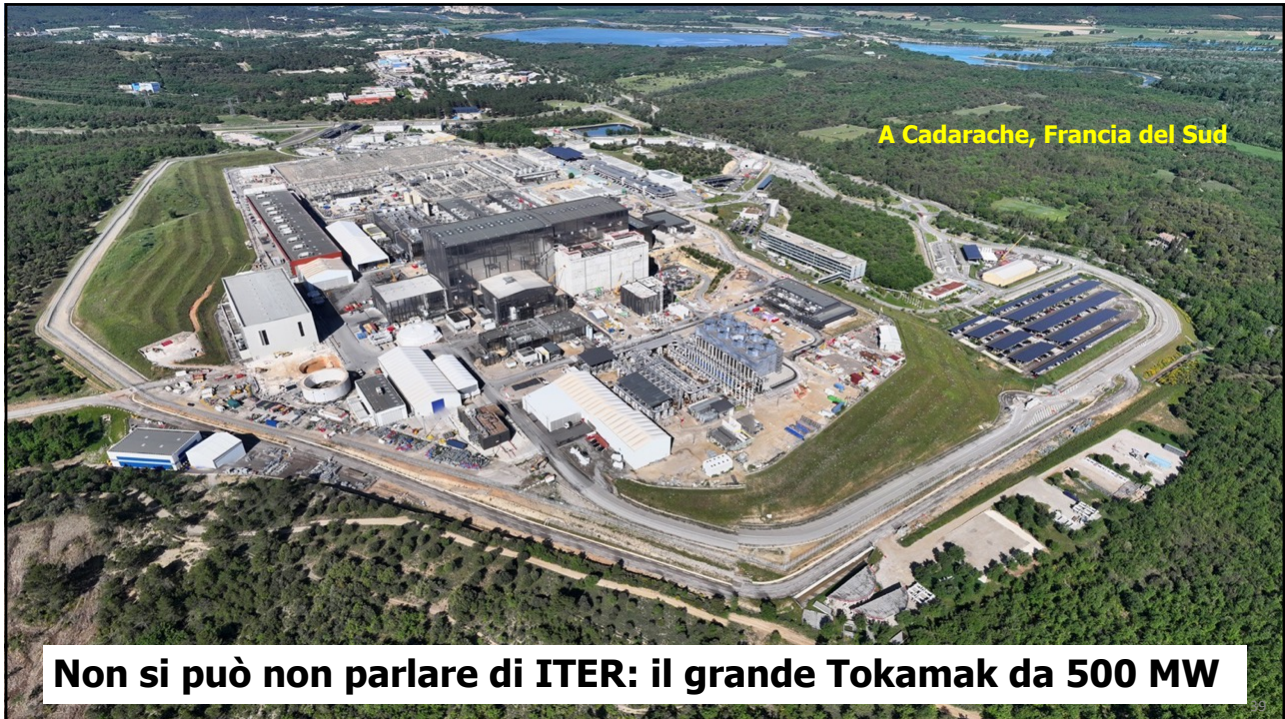


4.

Il nuovo nucleare 2: Gli SMR a fusione

Tre esempi di tipo:
2 Tokamak
1 Stellarator

38



39

E' un **dimostratore scientifico** per generare potenza netta positiva

- Gestione: consorzio UE, Russia, Cina, Giappone, USA, India, Corea del Sud
- Obiettivo: produrre più energia di quella di alimentazione, per 20 minuti.
- Tokamak di taglia 500 MW.
- Programma iniziale: inizio 2005, accensione 2019, 10 Mld€, costo operativo 290 M€/anno a regime.
- 2016: spostamento della data di accensione al 2025.
- 2022: per fessurazioni nella saldatura del tokamak, data portata al 2033 per il primo plasma e **al 2039** per l'uso del combustibile.

Budget attuale: chi dice 22, chi dice 40 Mld.

Il Tokamak è davvero grande:

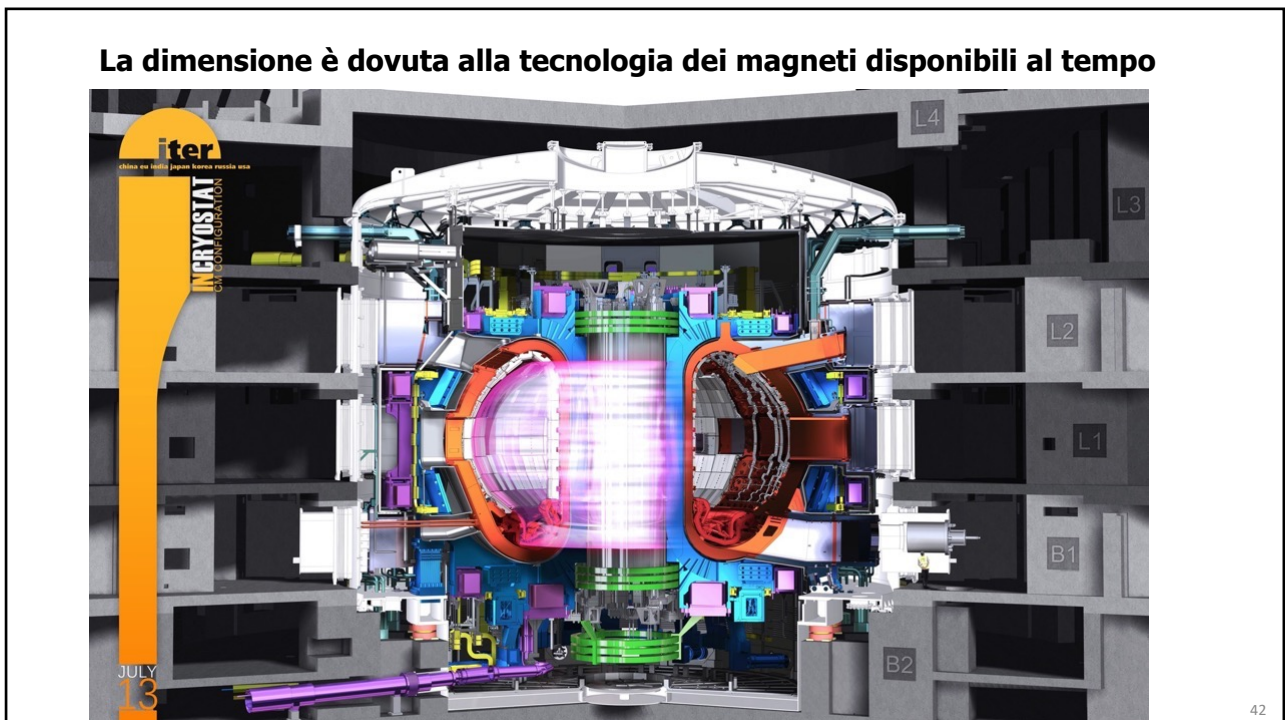
- Massa: 23.000 t
- Camera del plasma: 8.000 t
- Raggio: 6 m esterno, 2 m interno
- Temperatura del plasma: 150 M°C
- Potenza in ingresso: 620 MW
- Potenza in uscita: 500-700 MW
- Potenza del campo magnetico: **11,8 T**

40

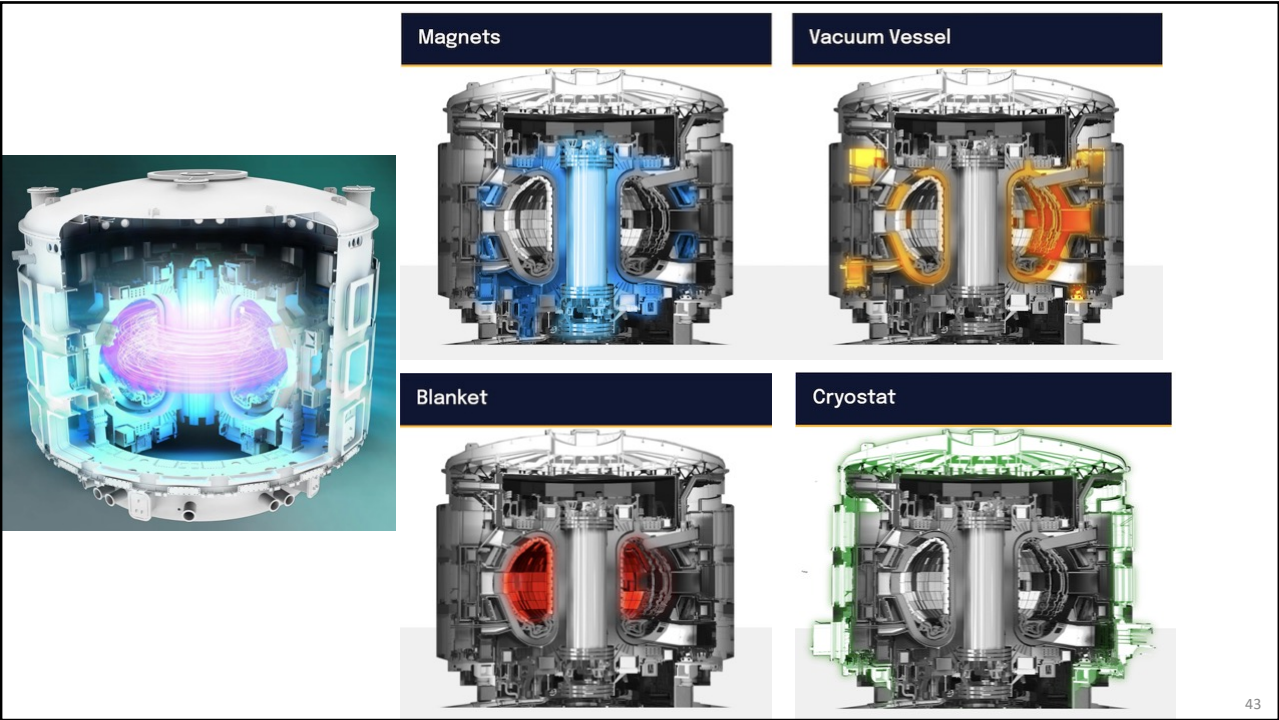
40



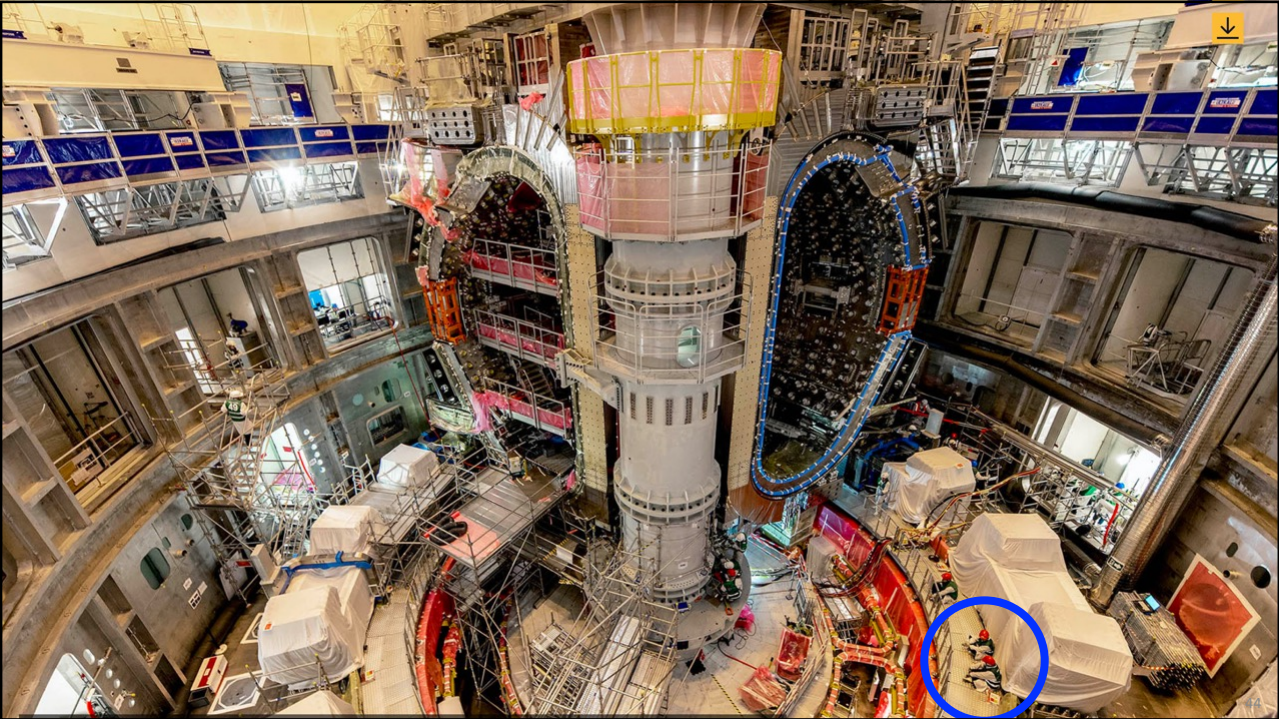
41



42



43



44

I Tokamak SPARC e ARC di CFS (Commonwealth Fusion Systems, Mass.)

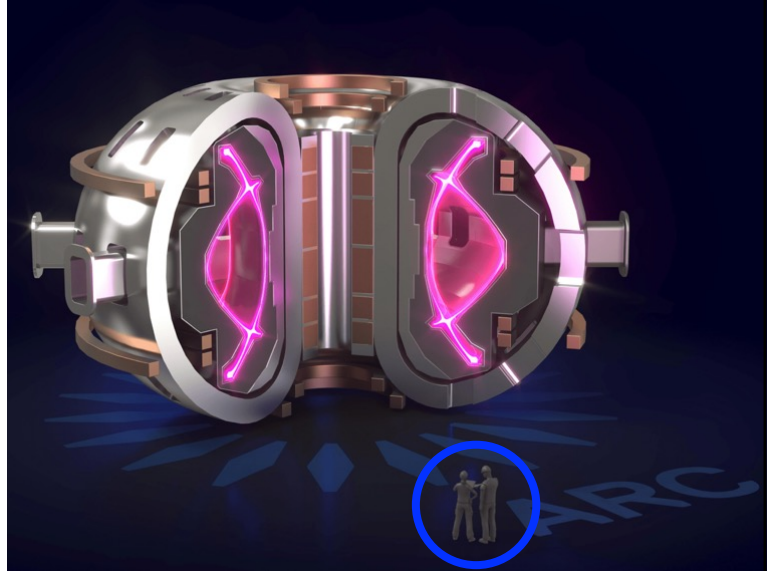
L'idea: con i nuovi magneti superconduttori ad alta temperatura (HTS ReBCO*) i Tokamak vengono più compatti e meno costosi:

ITER fa **11 T** con i magneti a tecnologia 1995, giganteschi
CFS fa **20 T** con i magneti di tecnologia HTS, compattissimi

Questo, perché

$$P_{\text{fusione}} = \text{campo}^4 \times \text{raggio}^3$$

Curiosità: gli HTS sono fragili e difficili da produrre in fili. Si è riusciti a farli in **nastri** che incapsulano i composti. La corrente è 40.000 A...!!



* ReBCO: Rare-Earth Barium Copper Oxide, Ossido di rame bario e terre rare

45

Chi è e cosa vuol fare CFS

- Startup (!) del Plasma Fusion Center del MIT, Boston, nata nel 2018
- Oltre 1000 dipendenti nel 2025
- Finanziatori/Azionisti: nel 2018 50 M\$ ENI (!); 2019: 115 M da ENI, Bill Gates e altri; e oggi dispone di circa **3 Mld\$** da venture capital, investitori istituzionali, società tecnologiche e fondi sovrani.
- Nel 2021 ha dimostrato il magnete che dà 20 T e allora ha comprato 300 km di nastro HTC ReBCO.
- C'è una certa fiducia: CFS ha in mano oltre 30% di tutto il capitale investito nel mondo nella fusione. (il MIT...)
- Programma in due fasi:
 - **SPARC** entro 2027, un dimostratore operativo da 100 MW, a Devens, MA
 - **ARC**, sistema commerciale da 400 MW nei primi anni 2030 a Chesterfield, Virginia. Sito identificato e accordo già fatto col governo locale.
- Impegni già sottoscritti con ENI che acquisterà 1 Mld\$ di quella energia, e con Google per 200 M\$.
- Le sfide rimangono altissime. Fra cui la stabilizzazione della «supply chain».

46

46

Gestione del plasma: accordo CFS - Google Deep Mind

Il punto:

- Il plasma è per sua natura instabile, ondivago e turbolento e tende a scappare dappertutto, col rischio di toccare le pareti del tokamak, danneggiandole e interrompendo la reazione.
- SPARC ha molti controlli (alimentazione, riscaldamento, frequenza, correnti nei magneti...).
- L'IA può arrivare a fare diagnostica e controllo attivo complessi e con risposte velocissime per anticipare e contenere le instabilità.

L'accordo fra CFS e Google DeepMind prevede di:

- unire più modelli di IA per simulare la fisica del plasma e, con il cosiddetto apprendimento per rinforzo, esplorare molte soluzioni diverse e identificare quelle più promettenti, anche con strategie non pensate prima.
- massimizzare le prestazioni, mantenendo un margine di sicurezza.
- arrivare a controllare autonomamente SPARC durante il funzionamento.

<https://deepmind.google/blog/bringing-ai-to-the-next-generation-of-fusion-energy/>

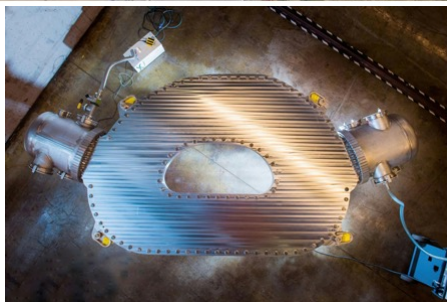
47

47



Il sito di CFS a Devens

2021: test della generazione del campo da 20 T



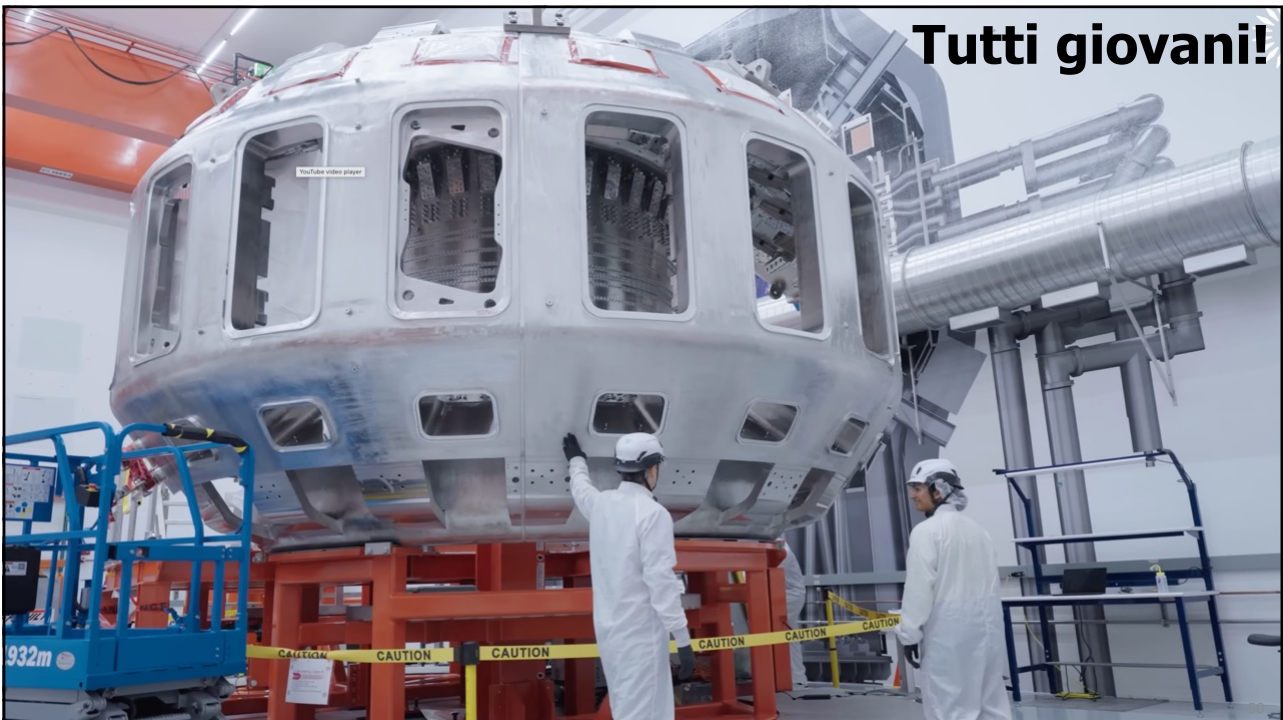
La dimensione del magnete

48

28 ott 25, arrivata la prima metà della camera a vuoto, 48 t, costruita a Chieti

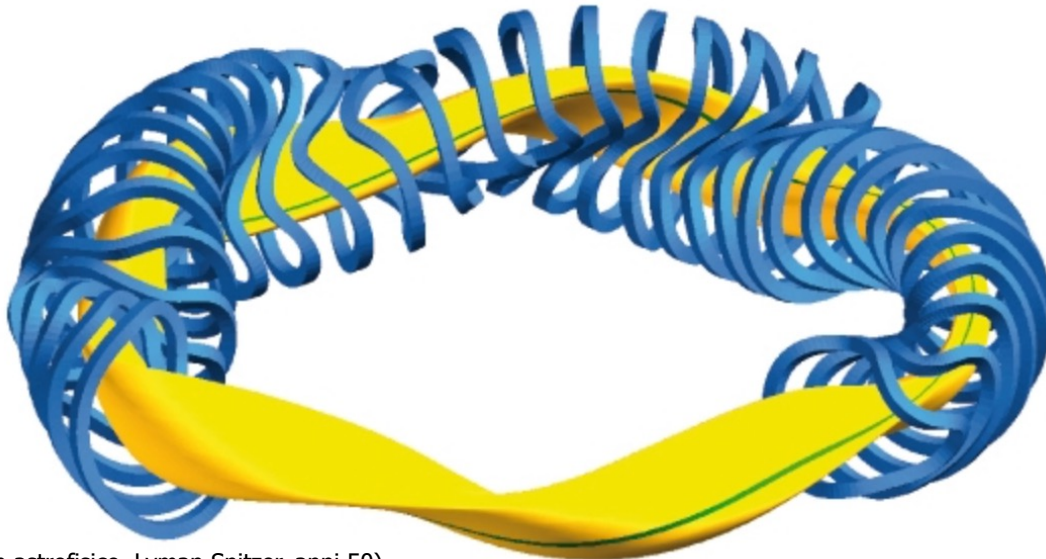


49



50

**L'altro esempio di fusione realistico:
a chi può essere venuto in mente lo Stellarator! Plasma elicoidale!**



(a un astrofisico, Lyman Spitzer, anni 50)

51

51

I fondamentali

- Il plasma «a ciambella» del tokamak, nel quale passa una potente corrente elettrica, deve essere confinato da un campo magnetico enorme. In più deve funzionare a impulsi che interrompono la fusione.
- Lo stellarator invece può funzionare senza corrente di plasma e in modo continuo, perché il plasma, nella sua configurazione elicoidale detta «quasi simmetrica», è tenuto in uno stato di equilibrio intrinseco grazie proprio alla complessa e apparentemente bizzarra deformazione dell'anello.
- Ha bisogno di campi magnetici dell'ordine di 3 T (SPARC: 20 T)
- Lo stellarator ha problematiche costruttive e di precisione complesse perché nessun pezzo è uguale a un altro nella configurazione (a parte il plasma): magneti, camera a vuoto etc. Ma il vantaggio di equilibrio del plasma è invitante.
- Oggi la tecnologia di costruzione con macchine a controllo numerico consente di realizzare il complesso molto più facilmente.

52

52

Cosa ha fatto l'Istituto Max Plank per la fisica del plasma (IPP)

L'IPP ha avviato il progetto **Stellarator Wendelstein W7-X** nel 1994, entrato in funzione nel 2015 e poi evoluto fino al 2022. Ha dimostrato la fattibilità del funzionamento stazionario della fusione senza corrente di plasma. Fondi pubblici per 1.3 Mld€.

Fra le cose, il W7-X è riuscito a mantenere il plasma per 8 minuti (record!), ma non ancora per i 30 dell'obiettivo iniziale. Ha pure prodotto 1,6 GJ per 360 sec (6 minuti) con una potenza di picco di 620 MW (!).

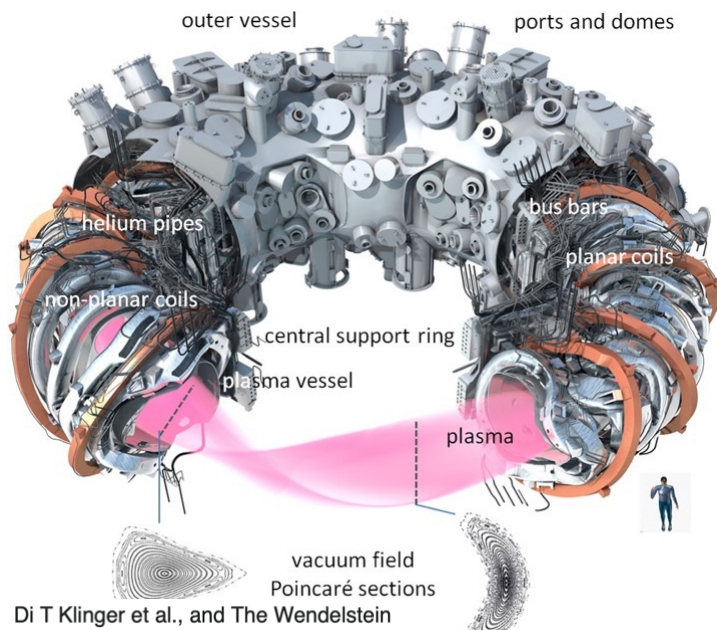
Rapidi progressi si sono succeduti, grazie ai supercomputer e l'AI:

- 2023: progetto di campi magnetici con simmetria quasi perfetta
- 2024: progetto dei «campi quasi-isodinamici stabili» (SQuiD) che consentono confinamento, bassa turbolenza, stabilità robusta e geometrie realistiche delle bobine
- 2025: la spinoff **Proxima Fusion**, con IPP, ha presentato **Stellaris**, un progetto ingegneristico di reattore a fusione intrinsecamente stabile che soddisfa i vincoli fisici e ingegneristici attorno a uno SQuiD.

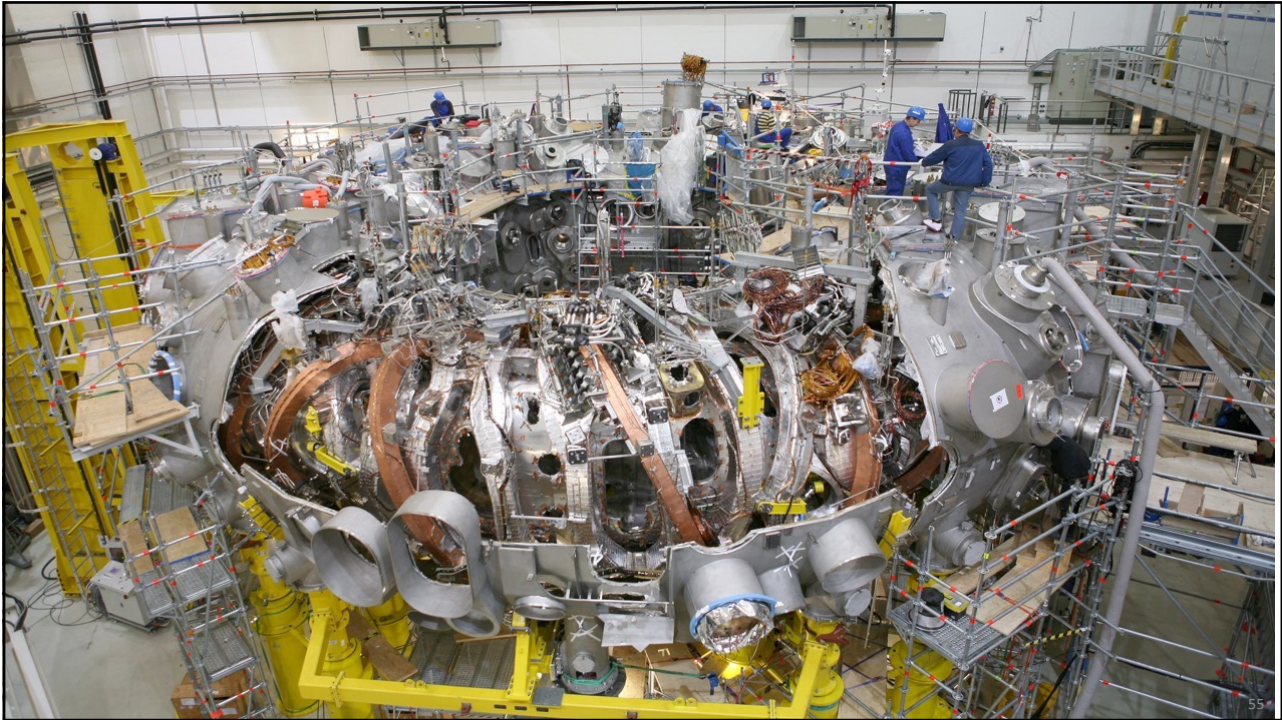
53

53

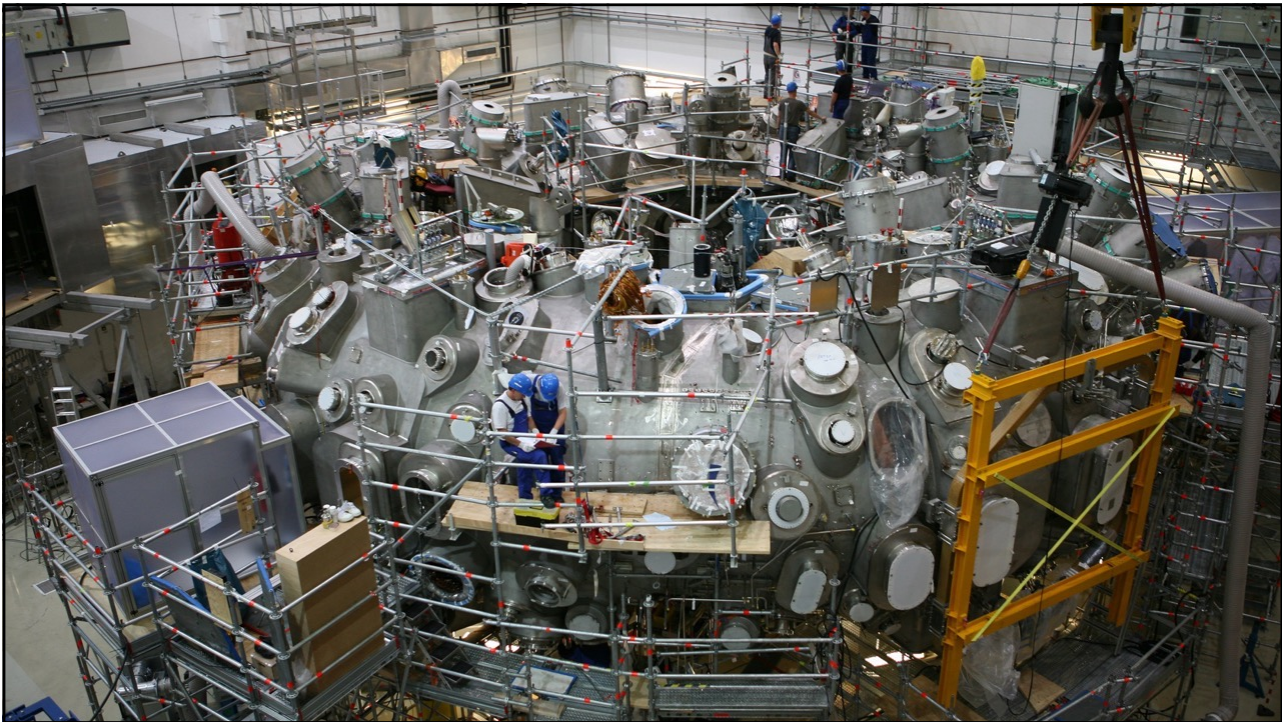
La costruzione del W7-X, tanto per farsi un'idea



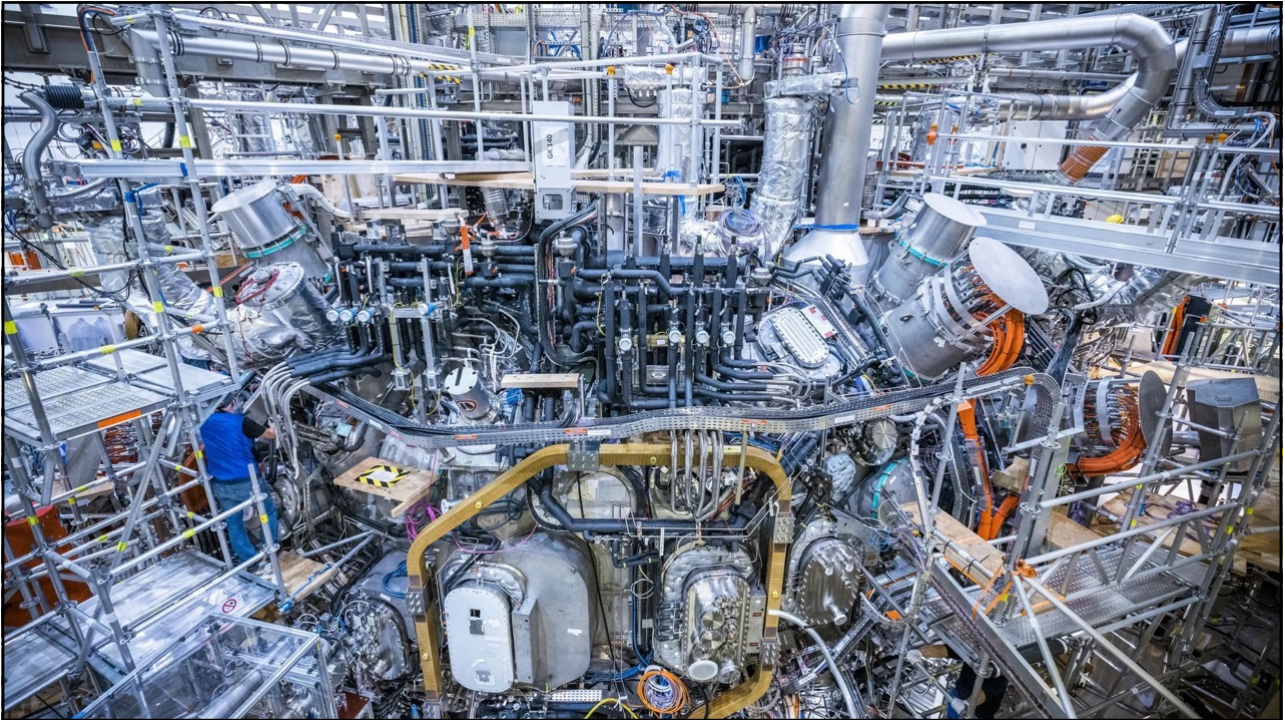
54



55



56



57

La startup: Proxima Fusion e il prossimo stellarator Stellaris SQuiD

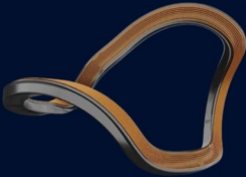
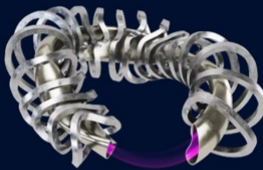
- Due dei tre soci fondatori sono italiani. Sede a Monaco (c'è l'IPP), 100 dip.
- Proprietà intrinseche degli SQuiD:
 - La corrente toroidale è bassa
 - Il plasma non è turbolento e il confinamento è soddisfacente
 - Le particelle prodotte dalla fusione non colpiscono la parete.
- Il nuovo progetto Stellaris è nato «ottimizzato» grazie a un gran numero di simulazioni fatte con supercomputer e IA. Prevede superconduttori HTS.
- Proxima, da sett. 25 raccoglie fondi per la costruzione, in massima parte **europei**. Il primo «round Series A» per 200 M€ ha visto **CDP** Venture Capital; Fondo del Consiglio Europeo per l'innovazione; Brewan Howard e altri. Il 26 feb 26 firmato con la Baviera un MOU per la realizzazione del sistema. Previsto un budget di 2 Mld€.
- Dicono di sé: «siamo la società di fusione europea che cresce più velocemente». E ovviamente, auguri

<https://www.proximafusion.com> e altro

58

58

Il programma di Proxima Fusion

2025  Stellaris Fusion Power Plant Concept	2027  Completion of Stellarator Model Coil (SMC)	2031  Alpha Demonstration Stellarator 25.2.26, Alpha Alliance: 30 partner coinvestono per costruire Alpha. C'è anche ENI.	2030s  Stellaris Fusion Power Plant 26.2.26: firmato MOU con Bavaria. Budget 2 Mld€
--	--	---	--

<https://www.proximafusion.com>

59

59



4.

Il nuovo nucleare: Cosa succede in Italia

60

Situazione (moolto sommaria)

- (Non dimentichiamo tempi molto lunghi e costi del problema delle scorte dei 3+1 reattori che avevamo - Latina, Caorso, Trino, Montalto - con i siti non sono ancora identificati; oltre a due referendum negativi).
- Oggi il PNIEC del governo vede «un grande potenziale» per il nucleare al 2050, con la copertura dell'11% della domanda, ovvero 8-16 GW (24-48 SMR: è realistico visto il contesto?).
- Banca d'Italia mette in guardia sull' «incertezza delle tecnologie scelte, la maggior parte delle quali non è ancora disponibile».
- Nel 2025 è stata fondata Nuclitalia (Enel 51%, Ansaldo Energia 39%, Leonardo 10%). Obiettivo: valutare i progetti più maturi, con focus sugli SMR. Poi: sistema paese, partnership e tutto il resto.
- Progetto DTT (Divertor Tokamak Test), Frascati: ENEA 70%, ENI 30% per studiare problematiche della fusione, in probabile sinergia con CFS.

WNIR 2025; https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/press_release/2025/CS_Nuclitalia_ita_pdf.pdf

<https://www.eni.com/it-IT/azioni/innovazione-tecnologica-collaborazioni/universita-centri-ricerca-aziende/enea.html> 61

61

Numerose azioni di lobby, fra cui 2 documenti di un certo peso

Il mondo industriale punta sul nucleare (**fissione**).

Confindustria stima a regime 117mila occupati, con ritorno economico del 2,5% del PIL

Focus: SMR e AMR, primo impianto operativo 2035 (!)

Costo stimato 70-110 \$/MWh

Oltre 70 aziende italiane lavorano anche nel nucleare...

Tutti concordano su una produzione dell'ordine del 10-15% del fabbisogno.

«nell'ambito di un mix di fonti energetiche»



62

La stima del PNIEC sulla produzione di nucleare in Italia (ca 11% del fabbisogno)

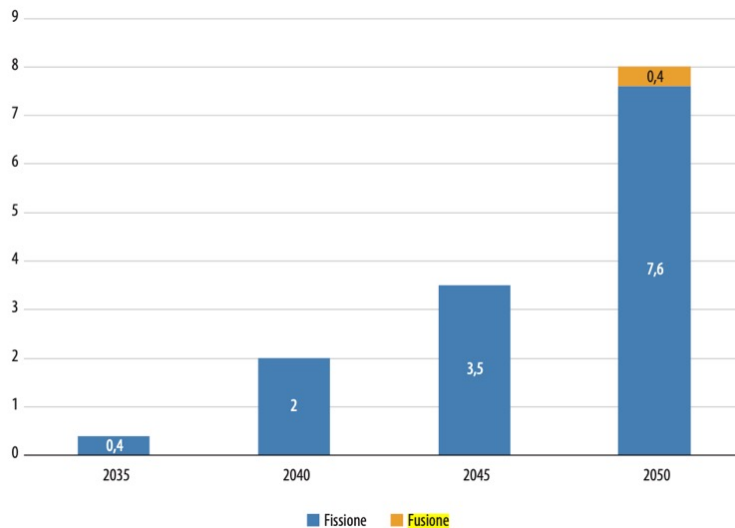


Figura 2.1
Sviluppo della capacità di generazione nucleare nello scenario considerato, rappresentata unicamente da nucleare avanzato (SMR ed AMR) e, successivamente al 2050, da una quota di energia da fusione
(Fonte PNIEC, giugno 2024)

(Dal documento Confindustria)

63

disegno di legge 2669: Delega al Governo in materia di nucleare «sostenibile»

Delega=parlamento definisce principi; governo li attua.

Obiettivi (in attuazione del PNIEC):

- Inserire il nucleare nel mix (fissione; fusione quando ci sarà)
- **Rispetto** politiche UE di decarbonizzazione
- **Contenere** i costi dell'energia
- **Indipendenza** da approvvigionamenti esteri

Il Governo regola su queste aree:

- Produzione: norme per il nucleare «sostenibile».
- Regole per impianti: dove; gestione; sicurezza
- Gestione scorie (combustibile, rifiuti, stoccaggio)
- Disattivazione e smantellamento
- Riorganizzazione normativa e istituzionale.

Etc, fra cui:

- **7,5 M€** per campagne informative 25/26 (ne facessero per le rinnovabili!)
- Programma nazionale per il nucleare sostenibile
- Promozione ricerca e competenze

Atti Parlamentari — 1 — Camera dei Deputati
XIX LEGISLATURA — DISEGNI DI LEGGE E RELAZIONI — DOCUMENTI

CAMERA DEI DEPUTATI N. 2669

DISEGNO DI LEGGE

PRESENTATO DAL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
(MELONI)

E DAL MINISTRO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA
(PICCHETTO FRATIN)

Delega al Governo in materia di energia nucleare sostenibile

Presentato il 17 ottobre 2025

ONORAVOLI DEPUTATI! – Il presente disegno di legge ha l'obiettivo di intervenire in forma organica sulla materia della produzione di energia da fonte nucleare sostenibile e da fusione.

1. La politica energetica costituisce uno degli assi strategici delle politiche volte ad assicurare l'approvvigionamento, lo sviluppo economico, la sovranità nazionale e l'indipendenza del Paese.

Dalle scelte relative a essa dipendono: a) la sicurezza nazionale, in quanto l'indipendenza energetica garantisce l'approvvigionamento energetico del Paese rispetto all'impatto che possono avere eventi geopolitici come quelli dell'epoca presente e, più in generale, le politiche energetiche dei Paesi fornitori; b) la capacità di concorrere agli obiettivi di decarbonizzazione neces-

sari a fronteggiare il cambiamento climatico, attraverso il massimo ricorso a fonti di energia sostenibile; c) la garanzia di continuità nell'approvvigionamento in presenza di un incremento costante della domanda; d) la sostenibilità dei costi gravanti sugli utenti finali (domestici e no) e la competitività del sistema industriale.

A seguito degli eventi accaduti negli ultimi anni sul piano internazionale – dal punto di vista geopolitico, climatico, ambientale e socio-economico – è emersa la necessità di adottare misure che garantiscano, anche sul piano della sicurezza energetica, la stabilità del benessere della popolazione e un adeguato sviluppo in tutti i Paesi membri dell'Unione europea.

Tale obiettivo è altresì racchiuso nei principi fondamentali dell'Agenda 2030 dell'Organizzazione delle Nazioni Unite, da

64

La questione nucleare in Italia è comunque oggetto di critica da vari soggetti.

Es.: Manifesto di Energia per l'Italia

Sintesi estrema:

- Il "nucleare sostenibile" aggira la volontà popolare (i 2 referendum).
- Gli SMR non sono né maturi né sostenibili.
- Il nucleare arriva troppo tardi per il clima.
- È una falsa alternativa che favorisce i fossili.
- Costa molto più delle rinnovabili.
- Manca il consenso sociale e istituzionale.

C'è anche questo documento,
molto chiaro.
Settembre 2025

energiaperl'Italia

La transizione energetica in Italia



65



4.

Conclusioni

66

Per riassumere, 1

- La domanda di energia crescerà a dismisura. L'energia dovrà essere elettrica.
- I combustibili fossili vanno **eliminati**, per salvarci la vita. Quando lo saranno non è chiaro, visto l'antagonismo ancora efficace di «Big Oil».
- Il nucleare, qual che sia, **NON PUO'** contribuire alla transizione, che va finita **PRIMA**, ovvero ca 2050. Perché lo scenario a 2,6-3 °C a fine secolo è inconcepibile.
- La **fissione** delle grandi centrali non pare destinata a un brillante futuro. Gli SMR? Praticamente non risolvono le questioni collaterali (**scorie** etc).
- La **fusione** non si farà sentire su scala prima del 2050 in quasi tutte le previsioni. A meno che non costi così poco da poter prendere una quota importante. Ma parliamo di seconda metà del secolo.
- Il prezzo non appare competitivo rispetto a FV+eolico+accumulo.

67

67

Per riassumere, 2

- Anche per il prezzo si prevede **forte incidenza** delle «**altre**» rinnovabili, sostenute dalle batterie di rete. Succederà? Stiamo anche aspettando di vedere la **geotermia** profonda.
- L'incertezza geopolitica appare rilevante per l'approvvigionamento.
- **L'Italia** reclama un ruolo che chissà quale sarà davvero, visto il contesto. L'ENI con CFS e Proxima ha fatto una mossa interessante: si vedrà qual è la sua vera intenzione.
- Con queste quote, il nucleare potrà avere **alcune** applicazioni, fra cui la generazione di una quota di baseload per contribuire, oltre alle batterie, a stabilizzare l'intermittenza delle rinnovabili. **Dopo** il 2050 si vedrà.

68

68



69