

# SUL NUCLEARE

*Perché non si parla quasi più di questa fonte di energia?*

*Un panorama divulgativo di Mirco Rossi*

A quasi un decennio di distanza dal referendum che ha visto bocciare l'idea di costruire 4 nuove centrali in Italia, la questione dell'energia nucleare sembra pressoché scomparsa.

Stampa, media, social, esperti, politici, ambientalisti, nessuno ne parla più apertamente, né chi sosteneva che quegli impianti avrebbero risolto la questione energetica né chi, al contrario, considerava un gravissimo errore la loro realizzazione.

Entrambi i due gruppi, e l'opinione pubblica in generale, da allora non s'interessano più dell'argomento e si comportano come se il problema energetico mondiale non esistesse e quello italiano sia stato risolto. Convinzione priva di fondamento, considerato che **(1)**:

- a) I **consumi di energia primaria** in Italia mostrano una discesa, dapprima lenta poi via via più ripida, da 187,6 Mtep **(2)** nel 2005 a 149,7 Mtep nel 2014, e una lieve successiva incerta risalita attestandosi nel 2018 a 154,5 Mtep. **A livello mondiale**, nello stesso periodo si è passati, con una crescita **pressoché costante**, salvo un momentaneo decremento tra 2008-2009, da 10.887,9 Mtep a 13.864,9 Mtep.
- b) La **produzione di elettricità in Italia** è scesa da 314,1 TWh **(2)** nel 2007 a 279,8 TWh nel 2014 per risalire a 290,6 nel 2018. **A livello mondiale**, nello stesso periodo si è passati, con una **crescita quasi costante** da 20.041,2 TWh nel 2007 a 26.614,8 nel 2018.
- c) Aumentano le criticità **globali nel garantire l'approvvigionamento di combustibili fossili**, petrolio in particolare. Contemporaneamente emerge la **gravità delle conseguenze** dovute al loro impiego, **crisi climatica** e inquinamento in primis.
- d) L'**idroelettrico**, principale fonte rinnovabile con limitati impatti sull'ambiente, nel 2018 ha coperto il 15,8% della produzione di elettricità mondiale. Le risorse di tipo "alpino" sono da tempo sostanzialmente esaurite e qualche possibilità di incremento è legata alla costruzione di giganteschi sbarramenti sui grandi fiumi della terra in Asia, in Africa e in Sud America. Il prezzo da pagare sono cambiamenti climatici e ambientali profondi a dimensione regionale, spostamento obbligatorio di intere popolazioni, accumuli di sostanze inquinanti tali da cambiare la natura e la vivibilità del fiume per lunghi tratti. **In Italia** questa fonte fornisce, ormai da una trentina d'anni, tra i 40 e i 50 TWh all'anno (tra 1/6 e 1/7 del totale della produzione elettrica) a seconda dell'andamento delle precipitazioni. Per la nostra realtà è **una fonte sostanzialmente non più espandibile**.
- e) Le nuove FER (Fonti Elettriche Rinnovabili), **eolico e fotovoltaico**, a livello globale coprono rispettivamente il **4,39% (circa l'1,8 % dell'energia primaria)** e **l'1,73% (circa lo 0,7% dell'energia primaria) dell'elettricità mondiale**.
- f) **L'energia nucleare** a metà degli anni '90 rappresentava il 17,5% della produzione globale di elettricità. Dal 2012 il suo contributo si attesta **attorno al 10-11% dell'energia elettrica mondiale** e, in alcuni paesi (es: Francia, Usa, Cina, Russia, Germania, Spagna, Ucraina, Inghilterra, Corea del Sud, ecc.) garantisce una quota importante alla base del diagramma di carico della produzione elettrica.

Nell'insieme, in uno scenario in cui aumentano sia i consumi energetici sia le difficoltà di individuare nuovi giacimenti di combustibili fossili (che comunque, a causa delle conseguenze sempre più gravi legate al loro impiego dovremmo evitare da subito di estrarre e consumare!), sembra un azzardo pensare che le fonti rinnovabili possano garantire nel breve o medio termine una tranquilla prospettiva per la situazione energetica globale e nazionale.

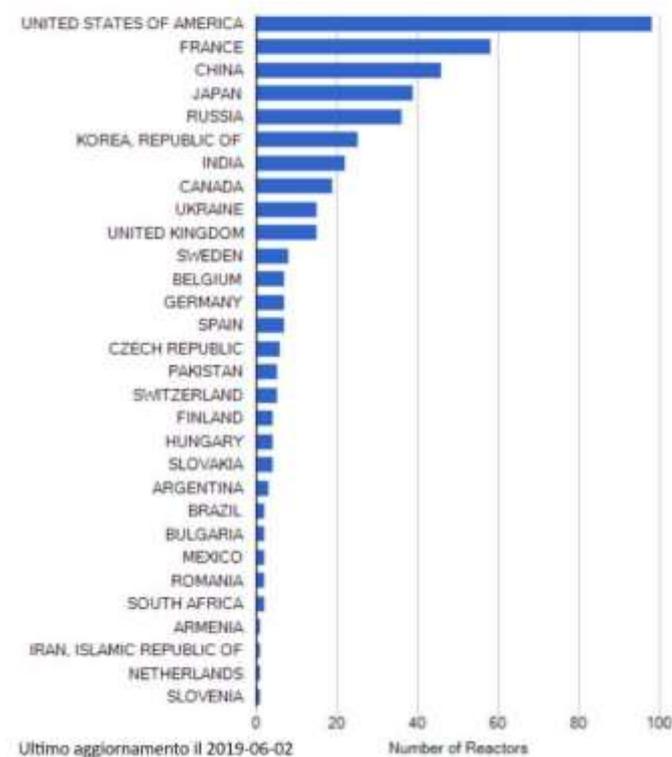
Ma tant'è, movimenti, associazioni ambientaliste, gruppi d'impegno, partiti politici, governo, cittadini, terminati i festeggiamenti o superata la depressione per il risultato del referendum, sembrano aver dimenticato nel suo complesso l'argomento "energia". Come fossero entrati in letargo.

Non ritengo però che i nuclearisti convinti siano scomparsi o abbiano cambiato opinione. Forse un tale silenzio può dipendere dalla sconfitta subita, dal venir meno della necessità (a causa della relativa diminuzione dei consumi elettrici dovuta all'avvitarsi della crisi) e dal timore di affrontare un tema che, nella sua ultima rappresentazione pubblica, è stato impersonato dal disastro di Fukushima.

A distanza di 8 anni, quando la costa della Prefettura di Fukushima fu investita da uno tsunami, nella maggiore delle due centrali nucleari (Daiichi) situate in riva al mare, a una decina di chilometri una dall'altra, la situazione resta inquietante: i processi di fusione in atto in tre reattori sono fuori controllo, non si sa se e quanto siano sprofondati nel terreno, si stanno costruendo dei sarcofaghi per isolarli dall'atmosfera, ci si limita a raffreddarli con acqua che poi, radioattiva, viene recuperata e conservata in 900 enormi serbatoi. La capacità dei serbatoi è pressoché saturata e il governo sta valutando se riversare una parte dell'acqua in mare. Vaste aree di territorio (20 km di raggio dalla centrale) sono e resteranno interdette a tempo indeterminato. In altre più esterne, evacuate a suo tempo, si può transitare ma non risiedere. L'altro impianto (Daini) non subì danni ma proprio in questi mesi la società che lo gestisce (TEPCO) ha deciso di chiuderlo, ritenendolo obsoleto e non convertibile.

Tuttavia, l'ascolto occasionale di frammenti di dialogo, di nostalgici riferimenti a occasioni perdute o di


**fig. 1**  
**Operational & Long-Term Shutdown Reactors**  
 Total Number of Reactors: 452



qualche rara presa di posizione nuclearista in occasione dei miei incontri divulgativi, mi fanno credere che sottotraccia siano molti coloro che ancora ritengono sia stata persa una chance importante per il nostro paese. E che il referendum del 2011 abbia avuto quell'esito solo perché gli elettori avrebbero deciso sulla spinta emotiva creata dall'incidente di Fukushima.

C'è chi pensa sia necessario riesumare il nucleare come scelta ottimale dal punto di vista economico e strategico, altri considerano questa fonte anche una valida risposta alla progressiva minor disponibilità di combustibili fossili, capace anche di rallentare la crescita del riscaldamento globale in quanto fonte che emette limitate quantità di CO<sub>2</sub>.

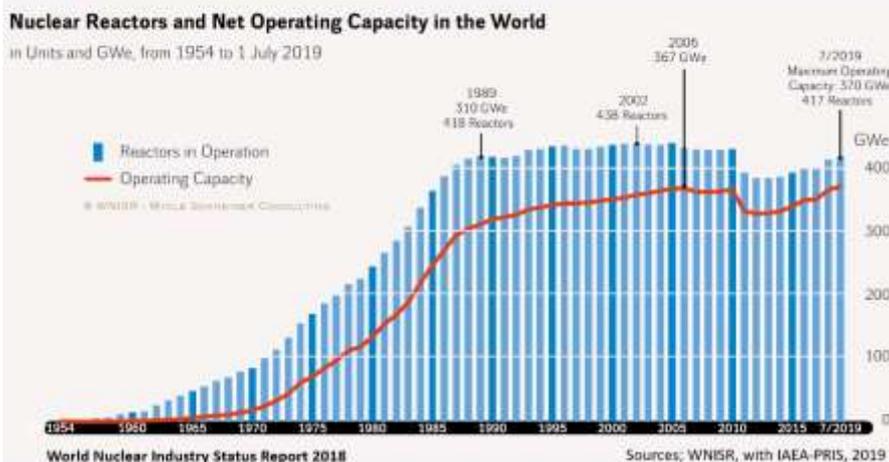
Ci sono quindi motivi validi per pensare, che in una fase definibile stabile piuttosto che tranquilla, possa essere utile mettere in fila una serie di dati, informazioni e considerazioni quanto più oggettive possibili, da esaminare e valutare al di fuori di schematismi e fideismi aprioristici.

## STATO E RUOLO DELL'ENERGIA NUCLEARE NEL CONTESTO GLOBALE

Il totale di reattori in esercizio e in spegnimento a lungo termine (Long Term Shutdown, una procedura propedeutica alla successiva dismissione dell'impianto) a livello mondiale, sono 452 (fig. 1). Il numero di quelli in esercizio, dopo una forte progressione, si è stabilizzato a partire dagli anni '90 e ha raggiunto la consistenza massima di 438 reattori nel 2002 (fig. 2).

World Nuclear Reactor Fleet, 1954-2019

fig. 2



L'improvviso cedimento numerico che si registra nel 2011 è legato al disastro di Fukushima che spinse il **Giappone** a fermare di colpo tutti i suoi impianti, una cinquantina. Dopo averli sottoposti a severi stress-test, alcuni sono stati rimessi in esercizio, ma la quasi totalità è ancora ferma a causa della contrarietà della popolazione.

La **Germania** nel 2011, quando la produzione nucleare copriva il 22% del fabbisogno di

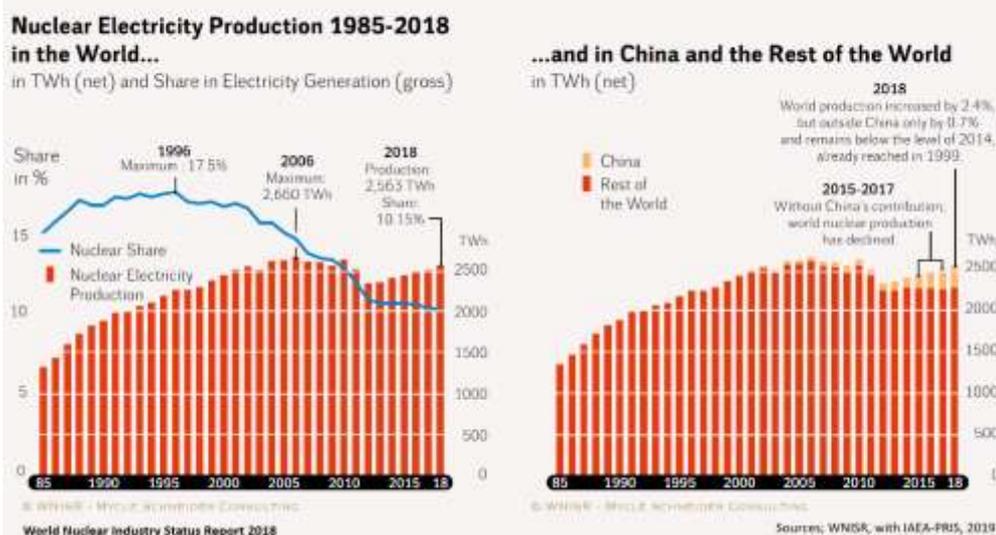
elettricità del paese, decise che nel 2022 avrebbe fermato l'ultimo dei suoi 9 reattori in esercizio, mantenendo in stand-by un solo reattore, come riserva estrema in caso di pericolo di blackout. Con quella decisione la Germania poneva fine a una lunga serie di tentennamenti che, a partire dal 1986 e a seconda della composizione politica delle coalizioni, più volte avevano portato il governo a esprimere orientamenti contrastanti sulla sorte del settore elettronucleare. Tuttavia, di recente sembra voler ritornare nuovamente sulla sua ultima decisione, per allungare i tempi della chiusura delle centrali. La **Svizzera** nel 2011 aveva deciso di chiudere i 5 impianti in esercizio ma, successivamente, è ritornata sulla sua decisione. Beznau 1, il più vecchio impianto commerciale del mondo ancora in attività, avrebbe dovuto chiudere nel 2019 ma,

assieme a Beznau 2, nel 2015 è stato fermato per "aggiornamenti" e dopo 3 anni è stato ricollegato alla rete.

La **Svezia** nel 1980 aveva deciso di eliminare la sua fonte nucleare ma il parlamento ha abrogato questa decisione nel 2010. Dopo Fukushima è iniziata una nuova discussione sull'opportunità di chiudere le 10

Nuclear Electricity Generation in the World... and China\*

fig. 3



centrali in esercizio che si è conclusa con la decisione che si potranno costruire nuovi reattori solamente nel medesimo luogo e in sostituzione di quelli che si andranno a smantellare. Probabilmente potrà succedere tra il 2025 e il 2035. Nel 2013 è stato chiuso, perché insicuro, il reattore numero 2 dell'impianto nucleare di Oskarshamn.

Sono tre esempi che dimostrano come sia difficile sciogliere il contrasto, che la fonte nucleare presenta, nel momento in cui la società deve decidere tra l'eliminazione di un pericolo tragico per quantità, qualità e durata, e la vitale necessità di disporre di quantitativi importanti di energia

A livello globale, a causa delle nuove costruzioni e della progressiva sostituzione di impianti obsoleti con altri più potenti, la produzione elettronucleare in passato cresceva piuttosto velocemente, raggiungendo nel 2006 il suo picco in valore assoluto. Successivamente, dopo qualche anno di sostanziale "plateau", ha subito un crollo, accentuato dall'incidente di Fukushima, per poi ricrescere, ma solo grazie al contributo

delle nuove centrali cinesi e restando comunque al di sotto del picco. Tuttavia, il suo contributo al mix di elettricità mondiale ha continuato a scendere dal 17,5% del 1996 al 10,15% del 2018 (fig.3).



fig. 4

Va considerato che la realizzazione di molti degli impianti portati a termine negli anni '80 era iniziata nel decennio precedente, quando negli Stati Uniti il governo rappresentava la principale fonte di finanziamento per la ricerca avanzata sui reattori e sul ciclo del combustibile e forniva incentivi per la costruzione di nuovi impianti attraverso garanzie sui prestiti e crediti d'imposta. Nel 1978 si

determinò quasi un blocco totale nella progettazione e costruzione di nuove centrali (fig. 4) in particolare negli USA, probabilmente prima a causa del referendum che nel 1976 in California bloccò la costruzione di nuove centrali nucleari, poi dalla nuova politica del presidente Jimmy Carter che nel 1977, per arginare il rischio di proliferazione, bloccò vari programmi di sostegno agli impianti civili tra cui il riprocessamento a fini militari del plutonio prodotto dal materiale fissile esaurito proveniente dalle centrali elettriche nucleari.

**(3)(4)**

Americani, russi, inglesi e francesi in pochi anni avevano già costruito decine di migliaia di ordigni nucleari. Fu allora che iniziarono seriamente i colloqui che progressivamente (prima con il SALT I e II negli anni '70 e poi, a partire dal 1991, con i vari START e SORT) avrebbero portato allo smantellamento della maggior parte degli arsenali nucleari. Non esistono dati certi ma solo stime: nel 1968 le testate erano circa 40.000; a metà degli anni '80 circa 70.000; nel 2000 ne esistevano ancora 35.000; nel 2007, al termine del periodo di esecuzione dei trattati, le testate operative probabilmente non erano più di 7.000-7.500. **(5)**

Da quando il settore militare del mondo occidentale perse interesse per il settore nucleare, Westinghouse e General Electric, senza più la garanzia del risultato economico positivo, bloccarono tutte le nuove iniziative e ben pochi impianti furono successivamente commissionati da imprese private **(6)**. La quasi totalità degli

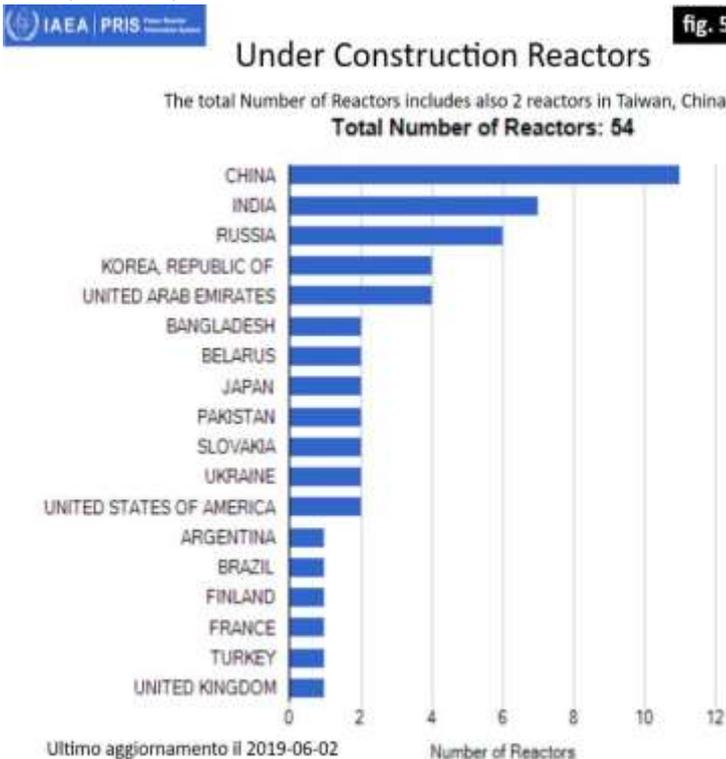


fig. 5

impianti costruiti successivamente nel mondo verrà realizzata non con investimenti privati ma con finanziamenti pubblici. Saranno i governi dei vari paesi, quasi sempre caratterizzati da sistemi democratici discutibili o inesistenti, a gestire e veicolare le risorse verso la tecnologia elettronucleare al fine di assumere maggior peso nei rapporti internazionali e per garantirsi, oltre che la produzione di energia elettrica, lo sviluppo del potenziale bellico. In questi casi l'economicità del risultato di gestione non è più un valore decisivo, mentre invece assume priorità assoluta in presenza del capitale privato. La copertura dei costi e il profitto per lungo tempo sono stati garantiti ai privati investitori, assieme alla determinazione di un apparente prezzo basso dell'energia, con i fondi e provenienti e destinati alle

forze armate, cioè a carico della collettività, su una diversa voce del bilancio pubblico. Quest'aspetto ha avuto un peso decisivo anche in Inghilterra e in Francia che, all'inizio dell'era nucleare, svolgevano ruoli importanti sullo scacchiere mondiale e ritenevano indispensabile fornire ai loro eserciti la nuova micidiale arma.

Per l'ex Unione Sovietica e la Cina la questione del profitto imprenditoriale in passato non si è mai posta. Nella Russia e nella Cina di oggi le cose sono un po' cambiate ma la tecnologia nucleare resta comunque sotto esclusivo controllo e gestione dello Stato.

Attualmente gli impianti nucleari in costruzione sono 54 (fig. 5). Solo poche notizie certe trapelano riguardo numerose centrali in costruzione. Si sa che una parte di quelle cinesi sono in costruzione da quasi 20 anni, mentre una delle due unità EPR, costruite a Taishan su licenza della francese Areva, è già avviata e la seconda dovrebbe entrare in esercizio a breve.

**L'EPR** è un reattore di "III Generazione Plus", presentato dalla Francia sul mercato mondiale come il reattore più avanzato, moderno e sicuro che sia mai stato progettato, anche se poi, già in fase di costruzione, sono emersi centinaia di "difetti" ed è stato necessario migliorare i sistemi di sicurezza. Ne esistono 4 esemplari: Flamanville, Olkiluoto, che stanno per essere avviati, e i due di Taishan di cui si è già detto.

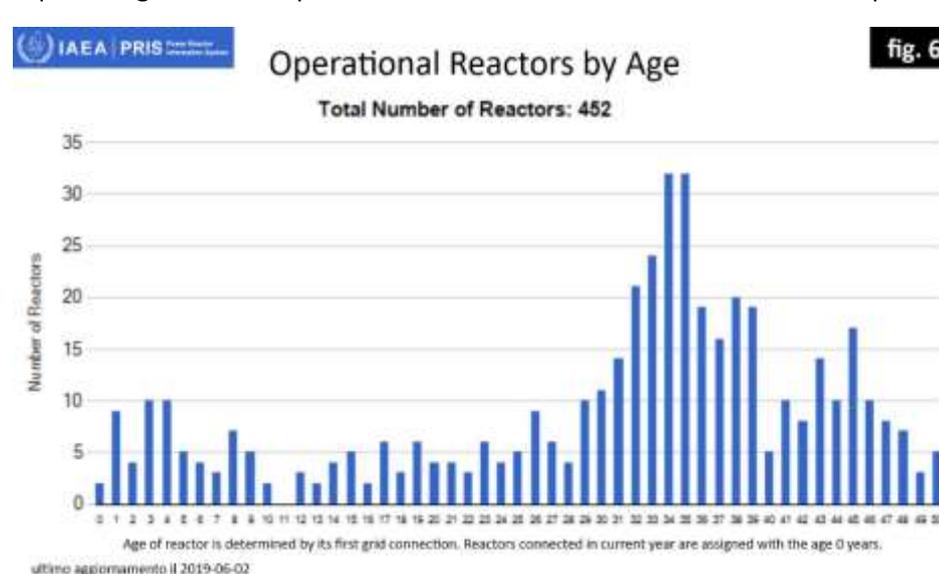
Alla fine del 2014 Areva aveva riscontrato la presenza di difetti nella fusione dell'acciaio del coperchio e del fondo del reattore (costruiti in India) dell'EPR di Flamanville. Il contenitore, che quei coperchi hanno il compito di sigillare, pesa 526 tonnellate ed è destinato a ospitare le barre di combustibile. Due serbatoi analoghi equipaggiano le centrali di Taishan I e Taishan II in Cina, per le quali il governo cinese aveva temporaneamente deciso di sospendere il caricamento delle barre, ma poi ha concesso di completare le fasi di avviamento. Nessuna conseguenza su Olkiluoto il cui contenitore è stato costruito da un'azienda diversa **(7)**.

L'inconveniente, secondo alcuni esperti, ha portato la situazione dell'impianto vicina all'abbandono. L'ASN (Autorité de sûreté nucléaire) ha autorizzato l'impiego temporaneo dei coperchi con l'obbligo di sostituirli nel 2024, in occasione del primo ricambio di combustibile **(8)**.

Tuttavia, nel giugno 2019 l'ASN ha avvertito l'EDF che i lavori dovevano essere bloccati per procedere al rifacimento di otto saldature considerate a rischio da diversi esperti, francesi e internazionali **(9)**. Ciò allontana l'avvio dell'impianto almeno sino al 2022 e ha aumentato il costo della costruzione di altri 400 milioni di euro, portando il totale a 10,9 miliardi di euro.

Il procedere spedito dei due impianti cinesi potrebbe essere elemento di preoccupazione, considerato che quelli di Olkiluoto in Finlandia (approvato nel 2002 con un costo preventivato di 3,3 miliardi di euro) e Flamanville in Francia (iniziato nel 2007 con una stima di 4 miliardi di euro), hanno ormai accumulato quasi un decennio di ritardo sui tempi previsti. I costi nel frattempo sono saliti quasi al triplo di quelli ipotizzati inizialmente e si stima che quando gli impianti entreranno in servizio (2020? 2022?) costeranno all'incirca 10-11 miliardi di euro ciascuno, rispetto ai 3-4 preventivati.

A questo riguardo val la pena di ricordare che nell'autunno 2010 è stato pubblicato un rapporto firmato da



Russely (ex Amministratore Delegato di EDF, la società che gestisce tutto il sistema elettrico in Francia) che ammette il sostanziale fallimento dell'EPR, la cui credibilità è stata seriamente minata dalle difficoltà incontrate sia nel sito di Olkiluoto che a Flamanville **(10)**.

A conferma che sull'EPR esistono da tempo forti perplessità, la Constellation, una delle

più importanti società americane in campo energetico e socia di EDF, nel 2010 si è rifiutata di realizzare un impianto EPR rinunciando anche a un'agevolazione di 7,5 miliardi di dollari messa a disposizione dal governo degli Stati Uniti per rilanciare il nucleare.

Anche molti impianti russi sono in forte ritardo perché probabilmente, come gli altri in via di realizzazione, si sono trovati costretti a rivedere gli iniziali criteri di progettazione, per tener conto dei nuovi standard di sicurezza richiesti dall'Agenzia Internazionale per l'Energia Nucleare, dopo quanto accaduto a Fukushima. Merita ricordare che nei territori ricadenti nel territorio dell'ex Unione Sovietica, in Russia e Ucraina soprattutto, sono ancora in funzione una decina di impianti tipo RBMK, la stessa tipologia di reattore presente a Chernobyl. Sono stati sottoposti ad aggiornamenti e miglioramenti di vario tipo ma non possono essere sicuramente considerati modelli di massima sicurezza.

Un diverso problema riguarda, invece, le centrali indiane in costruzione. Alcune rappresentano il tentativo di far funzionare gli impianti a partire dal torio, metallo fertile di cui l'India è ricca che va trasmutato in Uranio 233. Ma l'intero ciclo pone problemi complessi, dal punto di vista economico e fisico, che evidentemente ancora non si riescono a risolvere adeguatamente.

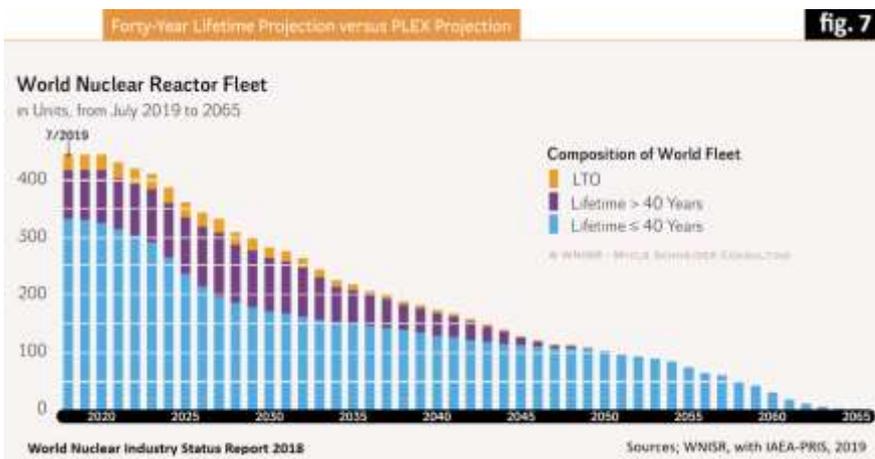
Nell'insieme, l'elenco riportato in fig. 5 conferma che, **salvo la centrale di Olkiluoto** in costruzione da parte del Consorzio Areva-Siemens (che è già stato portato in giudizio da TVO, il gestore della rete elettrica finlandese), **tutti gli altri impianti in costruzione sono sotto diretto o stretto controllo governativo e molti rispondono a obiettivi anche/o prioritariamente, militari.**

È interessante notare (fig.6) che l'età media degli impianti sta aumentando e che molti si avvicinano a fine vita: più di un centinaio supera i 40 anni di esercizio; più di 200 sono entrati in funzione tra 30 e 40 anni fa. Per garantire un adeguato livello di sicurezza, devono essere revisionati e aggiornati in base delle più recenti normative internazionali.

Questa necessità si sta imponendo negli ultimi tempi dopo che il disastro di Fukushima ha dimostrato ancora una volta l'enorme pericolosità di possibili incidenti.

Il progressivo invecchiamento del parco reattori, messo in relazione alla scarsità di risorse disponibili per finanziare gli interventi particolarmente costosi di aggiornamento e/o rifacimento, fa emergere la gravità del problema rappresentato dall'**inevitabile lento declino dei livelli di sicurezza**. Pochi sono gli stati che in questo periodo di crisi possono stanziare i fondi necessari per intervenire adeguatamente su impianti ormai vecchi o per costruirne di nuovi.

Valga l'esempio dell'Inghilterra che già prima dello scoppio della crisi del 2008 aveva perso più di metà della propria produzione nucleare, costretta a fermare impianti diventati ormai obsoleti e insicuri senza poterli sostituire. Le due gare internazionali lanciate dal governo qualche anno fa per la costruzione di 10 nuovi impianti, necessari a sostituire quelli messi fuori servizio per vetustà, sono andate deserte in quanto il bando di gara escludeva esplicitamente sostegni o finanziamenti pubblici. Per tentare di superare l'ostacolo



il governo inglese aveva fissato per l'elettricità da nucleare un prezzo più alto di quello medio, spostando così l'**onere a carico dei consumatori**.

La Francia un paio d'anni fa ha quantificato in circa 55 miliardi di euro la cifra necessaria per aggiornare e riportare ad accettabili livelli di efficienza e sicurezza diversi suoi impianti e ha deciso di far fronte all'esigenza caricando una specifica integrazione sulle

tariffe elettriche. Di recente, a causa di alcune urgenti riparazioni e manutenzioni straordinarie, la Francia ha cancellato per un certo periodo gli accordi in atto per l'esportazione di energia nucleare.

Successivamente ha ripreso l'esportazione, ma sono aumentati gli accordi "spot".

Se nei prossimi anni non saranno decisi nuovi pesanti investimenti per la produzione elettronucleare, questa fonte tenderà velocemente ad esaurirsi, come evidenzia la figura 7.

Già all'inizio abbiamo ricordato (fig.3) che la produzione mondiale di energia nucleare, dopo un periodo di sostanziale "plateau" registrato per alcuni anni all'inizio del secolo e dopo aver raggiunto il picco nel 2006, sta costantemente diminuendo in percentuale della produzione elettrica mondiale. Conseguentemente risulta sempre più limitato il ruolo di questa fonte **rispetto al totale fabbisogno mondiale di energia primaria**, ambito in cui **il nucleare oggi copre circa il 4,4% del totale**.

Alcuni paesi sono in evidenti difficoltà nel decidere se chiudere o "aggiornare" i loro impianti; altri stanno cercando di recuperare le ingenti risorse finanziarie per poter prolungare la vita di vecchie centrali, mentre sembra non esistano le condizioni per il riavvio di una fase di nuove costruzioni. La capacità di produzione complessiva sembra destinata inevitabilmente a diminuire.

Magari il processo risulterà lento perché si tenterà di allungare per quanto possibile la vita attiva degli impianti in scadenza, ma l'eventuale rallentamento del declino costringerà i governi a distrarre consistenti risorse da altri settori di spesa e non riuscirà in ogni caso a garantire i massimi livelli di sicurezza che, almeno in teoria, potrebbero essere offerti da impianti di nuovissima concezione.

### **I COSTI E IL COMBUSTIBILE**

Già si è detto che i costi di costruzione di nuovi impianti hanno raggiunto cifre spropositate attestandosi, per quanto noto e per gli EPR, tra i 5 e i 7 miliardi di euro per 1 GW (1 Miliardo di W). La stima attuale porta quindi tra i 10 e gli 11 miliardi il costo di una centrale da 1,6 GW da mettere ora in cantiere **(11)**.

In Italia si parlava di una spesa di circa 3,5-4 miliardi di euro per ciascuna centrale da 1.600 MW da costruire, prima che la proposta governativa risultasse bocciata dal referendum del 2011. Quasi tutti gli esperti erano consci che si trattava di un importo volutamente contenuto, "da preventivo", che sarebbe sicuramente lievitato in fase di costruzione. Forse anche Enel ne era consapevole quando, pur disponibile ad assumere il ruolo di costruttore, chiedeva esplicite garanzie di aver mano libera, per decenni, sulle tariffe al fine di poter coprire i costi di costruzione. Questa scelta si sarebbe configurata come elemento fortemente critico se il referendum avesse convalidato la decisione del governo, in quanto il parlamento aveva esplicitamente escluso la possibilità di sostenere qualsiasi onere con risorse pubbliche o nuove imposte **(12)**.

Il costo del kWh (1 kWh = 1.000 Wh) prodotto (per il nucleare, in questo caso, ma anche per gli altri tipi di centrali), in estrema sintesi e a grandissime linee, è funzione di:

- Impegno finanziario in relazione al capitale preso in prestito per realizzare l'impianto e al tasso d'interesse applicato
- Tempi di costruzione
- Spesa per la gestione della centrale
- Costo del combustibile per unità di energia prodotta
- Quantità di energia venduta dalla centrale durante la sua vita utile, prima di interventi di manutenzione straordinari, e di vita massima
- Costo dello smantellamento
- Costo dello stoccaggio dei rifiuti o delle scorie (nel nucleare a lunghissimo termine).

Non è possibile in questa sede sviluppare un'analisi di questi aspetti. Dovrebbe comunque riferirsi a un preciso impianto, prendere in considerazione una mole di dati/informazioni talmente grande da renderne impossibile, in concreto, la sua disponibilità. Per un lavoro di pretese limitate come questo può essere sufficiente avere chiari almeno i principali componenti che determinano il reale costo del kWh.

È inoltre utile ricordare che i criteri di sicurezza degli impianti nucleari, ritenuti socialmente accettabili dopo gli incidenti di Cernobyl e Fukushima, hanno reso più complessa la progettazione, fatto allungare i tempi di costruzione e lievitare i costi (e i relativi oneri finanziari) delle nuove centrali e gli adeguamenti di quelle in servizio, a un livello che può considerarsi pressoché proibitivo.

Per rendere politicamente più "appetibile" la proposta di un nuovo impianto, chi lo propone tende a dimostrare la competitività della fonte nucleare anche usando i seguenti espedienti:

- a) sostenere che **un nuovo reattore** può essere considerato sicuro per 40 anni e più, trascurando il fatto che i materiali sottoposti a radiazioni si deteriorano più velocemente e **con il passare del tempo aumenta il livello di rischio**.
- b) prendere in considerazione la stima più bassa possibile (e in passato nemmeno questa è sempre stata considerata) per individuare il **costo di smantellamento**, approfittando del fatto che il costo reale è sostanzialmente indefinibile a distanza 60-70 anni dal momento in cui verrà effettivamente sostenuto.
- c) **trascurare completamente il costo di stoccaggio delle scorie e di sorveglianza dei siti** che dovranno essere affrontati per centinaia, migliaia d'anni.
- d) dare valore zero ai costi conseguenti a **incidenti gravi**, considerandoli tacitamente e a priori, **a carico della collettività**.

Per un lungo periodo, e per molti degli impianti in esercizio, il costo del kWh dichiarato, se e quando ha implementato i costi dei punti b) e c) lo ha fatto con valori non realistici o nulli. Il punto d) non è mai stato preso in considerazione.

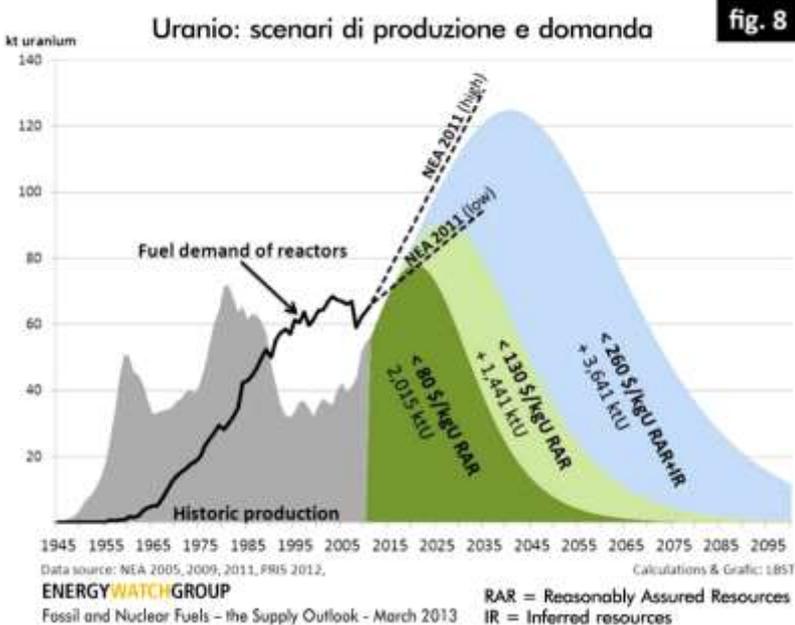


fig. 8

Una corretta definizione dei costi dell'energia nucleare scoraggia a priori i potenziali investitori che desiderino trarne profitti economici. Nascondere, "addomesticare" questi oneri, o non considerarli per motivi politici o militari, come è successo in passato e in parte si fa anche oggi, significa **lasciare ai posteri e alla collettività la responsabilità** e il compito di affrontarli. Un'eredità velenosa e costosa per le generazioni future.

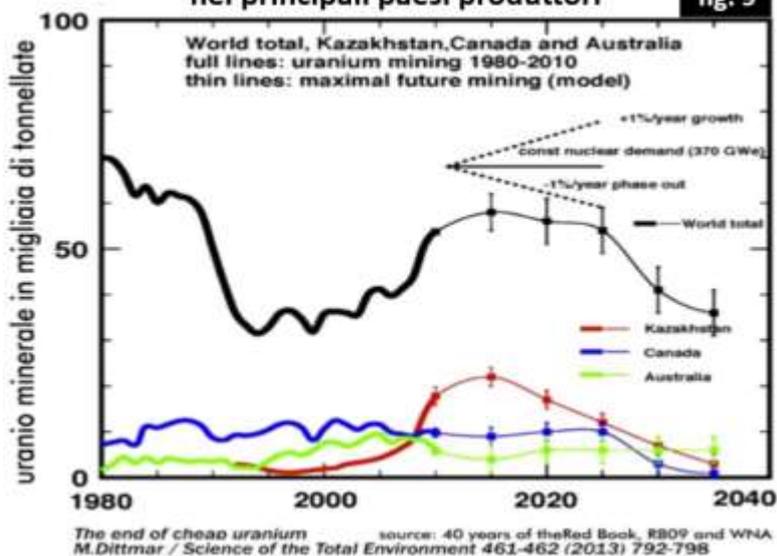
Per quanto riguarda il combustibile, sinora il costo dell'uranio minerale incide in misura ridotta sui costi di produzione. È però plausibile che in prospettiva si verifichi un'inversione di

tendenza a causa del progressivo impoverimento dei giacimenti.

Il grafico (fig. 8) mostra scenari in cui le quantità note di uranio minerale, anche scontando un forte aumento del costo di estrazione, non potranno alimentare molto a lungo nemmeno i soli impianti ora in

scenari produzione di uranio minerale nei principali paesi produttori

fig. 9



esercizio. Moltiplicando di un fattore 3 il costo di estrazione, si arriverebbe a sfruttare, oltre alle RAR (Reasonably Assured Resources), anche le IR (Inferred Resources), ma comunque attorno alla metà di questo secolo si raggiungerebbe il "picco" estrattivo e il declino sarebbe inevitabile.

Alcuni studiosi considerano il grafico poco attendibile, tanto da ritenere che esistano riserve di uranio in grado di garantire per quasi un secolo il fabbisogno di un numero di centrali simile all'attuale, altri sono invece molto più pessimisti.

Va notato che lo scenario di una richiesta di uranio in aumento a livello mondiale, ipotizzato dalla NEA (Nuclear

Energy Agency) nel 2011, pare poco realistico alla luce di quanto successo dopo il disastro giapponese, e oggi non ci sono elementi per pensare che un tale andamento della domanda si verifichi nel prossimo futuro.

Uno studio di Michael Dittmar, del politecnico di Zurigo, pubblicato su “Science of the Environment” (13), (fig. 9) prospetta che il “picco” dell’estrazione di uranio minerale a basso costo possa essere raggiunto proprio in questo periodo. Dopo questa data la disponibilità di questa risorsa diminuirebbe velocemente e stabilmente.

Per un lungo periodo, a partire dall’inizio degli anni ’90, quasi metà della richiesta di combustibile per la produzione di energia elettronucleare è stata garantita dall’uranio recuperato e poi riprocessato, nonché dallo smantellamento di migliaia di testate nucleari americane ed ex sovietiche. Per esempio, nel 2009 il fabbisogno mondiale è stato di 61.730 tonnellate, di cui 50.863 ricavate da minerale estratto (14). Il 93% delle altre 10.867 tonnellate è stato recuperato dal riciclo dell’uranio altamente arricchito proveniente da testate nucleari russe e americane. Il restante 7% è stato reso disponibile riprocessando l’uranio “esausto” estratto dai reattori in servizio, da cui, una volta eliminati tutti i vari elementi di decadimento, si ottiene l’uranio impoverito (con percentuali di U235 tra lo 0,25 e lo 0,4%). Proprio l’aumento dei costi dell’uranio minerale negli ultimi anni ha reso conveniente riprocessare una seconda volta l’uranio impoverito per estrarne quel poco di U235 che ancora contiene. Si tratta di una quota percentuale che sino a poco tempo fa era antieconomico recuperare, tanto che l’uranio impoverito veniva usato (e smaltito), in lega in altri metalli, per aumentare densità e potere di penetrazione in alcune munizioni da guerra. D’altra parte, la “riserva” del potenziale atomico militare si è molto ridotta e, anche immaginando – cosa purtroppo del tutto improbabile – vengano smantellate tutte le testate residue (alcune migliaia), le quantità di uranio che così si renderebbero disponibili sarebbero limitate.

## IL DECOMMISSIONING

Smantellare una centrale nucleare non significa risolvere definitivamente il problema dei materiali radioattivi (a bassa, media o alta attività) che vi si trovano, ma semplicemente separarli dal resto, trattarli in modo da ridurre il volume, confinarli (o se si vuole, impacchettarli) opportunamente e spostarli in siti che si ritengono (talvolta a torto) molto sicuri, dove dovranno restare, a seconda dei livelli di radioattività, per

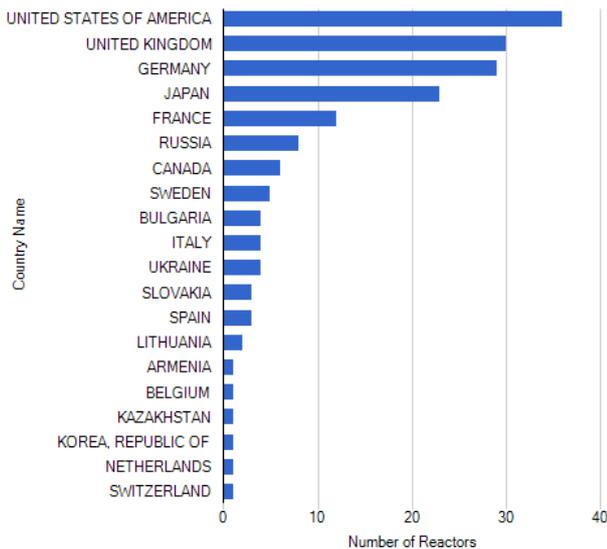
decine, centinaia o migliaia di anni.



fig. 10

### Permanent Shutdown Reactors

Total Number of Reactors: 176



The total Number of Reactors includes also 1 reactors in Taiwan, China

Above data are from the PRIS database. Last update on 2019-07-21

Lo smantellamento costa un’enormità di denaro.

Nel 2019 ci sono 176 impianti a scopi civili spenti da decenni in attesa di smantellamento (fig. 10).

A questi vanno aggiunti più di 250 piccoli reattori di ricerca e molti impianti sperimentali del ciclo di combustibile da tempo dismessi. Nonché alcune centinaia di reattori marini militari abbandonati a deperire in varie località isolate.

Una volta spento un reattore viene lasciato per lungo tempo a “raffreddarsi” per ridurre i livelli di radioattività. Ovviamente nel frattempo non può essere abbandonato completamente e va monitorato e protetto. Lo smantellamento vero e proprio inizia dopo alcuni decenni.

I fondi spesi e stanziati a questo scopo sono molto diversi da caso a caso e non è possibile definire uno standard consolidato. Conviene andare per esempi. Forse il più grande impianto sinora smantellato è la centrale **Maine Yankee** (920 MW nel Maine-USA). I lavori sono iniziati nel 1997 e terminati nel 2005 con un costo di circa mezzo miliardo di dollari. Il 75% della cifra è stata spesa per l’abbattimento e il 25% (15)

per lo stoccaggio “provvisorio” del combustibile esaurito e del materiale radioattivo, tuttora depositati in giganteschi contenitori di acciaio e cemento posti all’aperto, in un’area del terreno su cui insisteva in precedenza l’impianto (fig. 11).



Negli **Stati Uniti** la Nuclear Regulatory Commission ha stimato che lo smantellamento di ciascuno dei 35 reattori già fermi costerà una cifra compresa tra i 280 e i 612 milioni di dollari **(16)**.

Per affrontare i costi gli Stati Uniti, dove tutte le centrali sono di proprietà privata, già alcuni anni fa hanno deciso di correre ai ripari obbligando le imprese a caricare in bolletta sul costo del kWh elettrico una integrazione di 0,001 \$/kWh per tutta la durata operativa degli impianti, finalizzata a raccogliere i fondi per finanziare, almeno in parte, lo smantellamento.

La **Gran Bretagna**, uno dei primissimi paesi al mondo a costruire impianti nucleari, oltre a quasi una trentina di reattori, ha anche 5 impianti di riprocessamento e alcuni siti di ricerca da smantellare.

La Nuclear Decommissioning Authority nel 2005 ha stimato che l'UK dovrà sostenere una spesa di 81 miliardi di euro, di cui l'80% per il solo complesso di **Calder Hall (Sellafield)**.

Nel sito sono presenti 4 reattori Magnox inizialmente da soli 60 MW di potenza netta ciascuno, (ridotta a 50 dal 1973 in poi) che dal 1956 al 1964 produssero contemporaneamente energia elettrica per uso civile **(primi reattori al mondo) e plutonio per uso militare, funzione principale per cui erano stati costruiti**.

Sono stati chiusi nel 2003. L'area occupata copre due miglia quadrate ed è il più grande complesso nucleare dell'Europa occidentale. Ci sono più di 1.000 edifici nel sito. Nel settembre 2007 sono state abbattute le 4 enormi torri di raffreddamento. **Il programma di recupero completo del sito dovrebbe durare circa un secolo**, usufruendo di finanziamenti graduati nel tempo **(17)**.

In **Francia** l'EDF, che dal nucleare ricava il 75% di tutta l'energia elettrica e che ha 13 reattori in attesa di essere smantellati da un quarto di secolo, per far fronte ai propri costi di prospettiva ha chiesto nel 2009 di poter applicare alle tariffe elettriche un aumento del 20% in tre anni, ma il governo francese ha poi concesso un aumento del solo 2% a partire dall'agosto 2010. In un rapporto parlamentare del 2017 si legge che EDF stima il costo di smantellamento delle 58 centrali francesi pari a 75,5 miliardi di euro, da distribuire su alcuni decenni. Importo che viene considerato sottostimato ma sostanzialmente in linea con le



valutazioni degli altri operatori elettrici europei che indicano cifre tra i 900 e 1.300 milioni di euro per impianto.

Tuttavia, EDF sta accantonando solo 350 milioni di euro per impianto.

Istruttiva è la vicenda della centrale di **Brennilis** (Finistere - F), il più vecchio impianto nucleare francese (fig.12).

Costruito a partire dal 1961 entrò in servizio nel 1967.

Moderato ad acqua pesante e anidride carbonica, forniva 70 MWe: un impianto 15 - 20

volte più piccolo di una centrale nucleare "standard" **(18)**. Nel 1971 due esplosioni danneggiarono la turbina e nel 1979 furono distrutte le linee che collegavano l'impianto alla rete. Gli attentati furono rivendicati dal Fronte di liberazione della Bretagna. Nello stesso periodo la Francia decise, cambiando impostazione progettuale, che i successivi reattori avrebbero utilizzato la tecnologia ad acqua pressurizzata. Nel 1985 il reattore di Brennilis fu spento definitivamente. Nel 2012 sorsero problemi: i lavori furono

sospesi perché EDF avrebbe dovuto risolvere il problema dello stoccaggio dei rifiuti prima di procedere a completare lo smantellamento. A tutt'oggi non è ancora terminata la fase più critica, cioè l'intervento sul reattore, i generatori di vapore e l'edificio. Nel 2018 alcune associazioni hanno protestato per il rifiuto di EDF di rivelare i costi finanziari dello smantellamento della centrale. Nel 2005, la Cour des comptes (la Corte dei Conti di Francia) stimava il costo dello smantellamento di Brennilis pari 482 milioni di EUR, 20 volte più di quanto previsto nel 1985.

Alla fine del 2019 la centrale **svizzera** di Mühleberg (Berna) fermerà definitivamente la sua attività e verrà smantellata entro il 2031. La sua costruzione iniziò nel 1967 e il reattore (373 MW) entrò in servizio nel 1972. Attualmente fornisce il 25% dell'elettricità gestita dalla proprietaria BKW, che intende compensare questa quota con produzione di energia eolica all'estero. La BKW si è accollata gli 853 milioni di euro dello smantellamento e tutti gli oneri connessi alla gestione delle scorie radioattive per ulteriori 1,32 miliardi di euro **(19)**.

In **Canada**, dove ci sono 3 reattori (circa 500 MW complessivi) spenti da oltre 30 anni, si parla di un onere compreso tra 279.000 e 430.000 dollari a megawatt.

La **Germania**, che ha già 28 reattori fermi di cui 19 (circa 6.000 MW complessivi) da oltre 20 anni, stima un costo compreso tra 300.000 a 550.000 dollari a megawatt.

Non esistono stime note riguardanti i circa 450 reattori marini militari abbandonati in vari luoghi sul pianeta. Ammesso e non concesso che qualcuno prima o poi intenda provvedere al loro smantellamento in sicurezza. Nelle basi di Murmansk e Vladivostok ci sono già oltre 120 reattori (13 francesi, 26 britannici, 25 americani, ecc.) fermi da decenni, che deperiscono senza che nessuno intervenga.

In **Italia** alla Sogin Spa sono stati affidati una decina di impianti nucleari da smantellare.

- 4 centrali elettronucleari (**Trino, Latina, Garigliano e Caorso**), ferme da 30 anni o più anni. Caorso, l'unica di media taglia (860 MW) ha funzionato, sempre a singhiozzo, dalla fine del 1981 per 7-8 anni, giungendo alla situazione di "riserva fredda" nel 1991.
- 4 impianti dove si riprocessava il combustibile nucleare: **Ipu e Opec a Casaccia** (nei dintorni di Roma), **l'Itrec di Rotondella (Matera), Bosco Marengo e Saluggia** in Piemonte.
- Il reattore del Centro di Ricerca Europeo di Ispra, sul lago Maggiore, e lo stabilimento Nu.cle.co di Roma. Per il loro smantellamento (meglio: per preparare ...) si stanno spendendo miliardi di euro, finanziati con oneri caricati sulle forniture di energia elettrica. Tra il 2000 e il 2017 **sono stati spesi più di 3,5 miliardi di euro**, di cui una buona metà solo per mantenere in sicurezza i siti e i depositi temporanei di scorie.

Sogin ha **un piano da 7,2 miliardi di euro** per completare il decommissioning nucleare, ma meno di un miliardo è stato sinora impiegato per lo smantellamento vero e proprio. Nel settembre 2018 l'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) ha autorizzato la Sogin a intervenire sui vessel (il "cuore") di Garigliano e di Latina, ma si è ancora in attesa dei permessi dell'ISIN (Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare) che forse sta aspettando il cambio dei vertici della Sogin (scadevano a giugno 2019).

**Entro il 2025 in Italia dovranno anche rientrare le scorie ad alta radioattività** che per ora sono stoccate in Francia e nel Regno Unito: per quella data dovrebbe essere pronto **il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi**, ma **per ora esiste, dal 2015, solo la "carta" che individua le aree potenzialmente idonee** a ospitare depositi di scorie nucleari a lungo termine. Tenuta per un certo periodo sottochiave, la "carta" stava per essere resa pubblica dal ministro dello Sviluppo Economico del governo Gentiloni che però era in scadenza. **Rimane tutt'ora segreta** per decisione dell'attuale ministro dell'Ambiente.

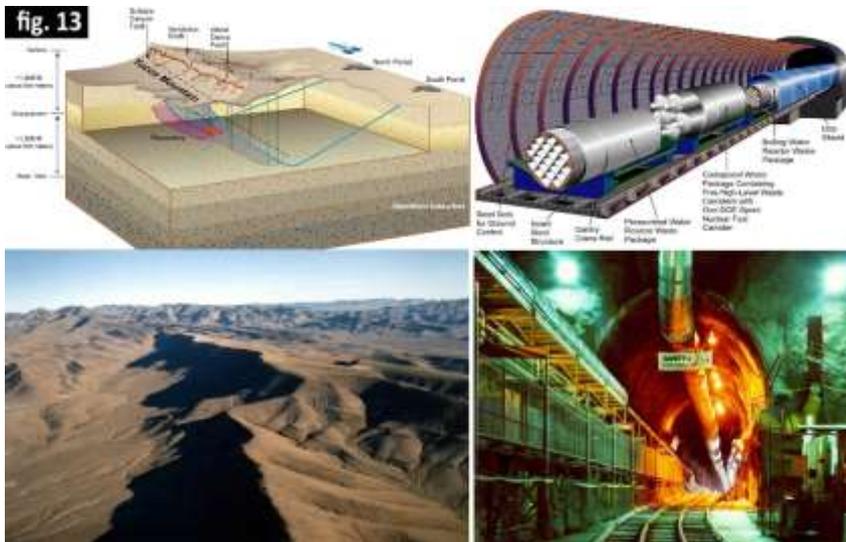
## **LO STOCCAGGIO DELLE SCORIE**

I rifiuti dell'attività nucleare presentano livelli di radioattività diversi:

- 1° grado (bassa): carta, stracci, indumenti, guanti, soprascarpe, filtri, attrezzi, liquidi, ecc. (circa 200 metri cubi all'anno). Sono rifiuti poco attivi ma talvolta di lunga durata.
- 2° grado (media): scarti di lavorazione, rottami metallici, liquidi, fanghi, resine esaurite, ecc. (circa 100 metri cubi all'anno). La loro radioattività ha una durata media di 300 anni. Importanti quantitativi provengono dalla fase di smantellamento.

- 3° grado (alta): combustibile esausto e rifiuti ad alta ed altissima radioattività provenienti dal cuore del reattore e dal riprocessamento del combustibile. In essi si concentra una enorme quantità di radioattività che decade in migliaia, se non decine di migliaia, di anni.

Non esiste sul pianeta alcun sito che possa essere considerato definitivo in cui stoccare le scorie nucleari civili di medio e alto livello per almeno qualche migliaio di anni. Esaminiamo alcuni esempi.

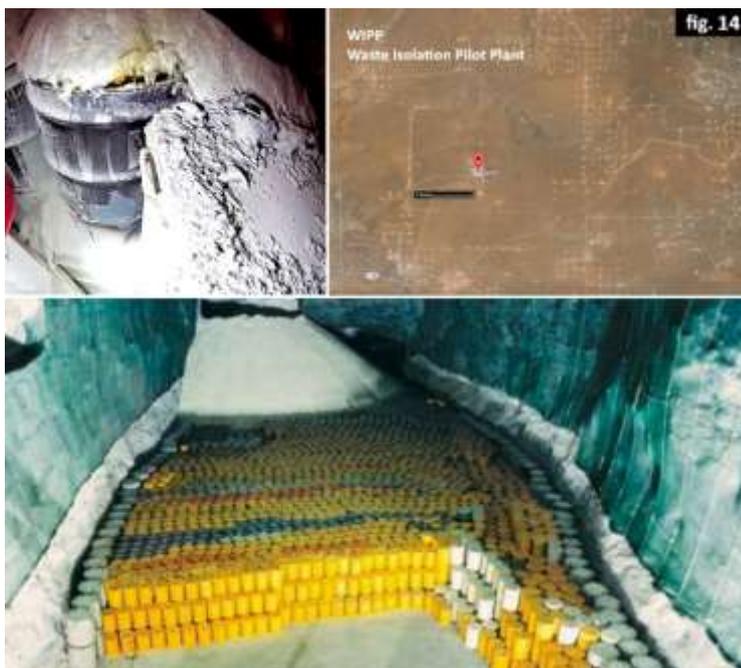


Ci avevano provato, a partire dal 1982, gli **Stati Uniti** individuando in Nevada il sito di **Yucca Mountain** (fig.13) che avrebbe dovuto accogliere 70.000 tonnellate di scorie ad alta radioattività (civili e militari) e offrire garanzie inizialmente per almeno 10.000 anni, aumentati successivamente a 300.000 dalla SCOTUS (Supreme Court of the United States). Il costo era stato inizialmente stimato in 80 miliardi di dollari e si pensava di averlo in attività tra il 1998 e il 2020. Tra il 2009 e il 2011,

quando erano già stati investiti circa 15 miliardi di dollari e i lavori erano da tempo iniziati, l'amministrazione Obama con l'appoggio dello Stato del Nevada, ha ritirato le licenze e definitivamente cancellato il deposito di scorie nucleari di Yucca Mountain dai programmi governativi.

L'abbandono del progetto si fondava su una serie di studi e di ricerche geologiche, durate 30 anni, che avevano messo in luce l'esistenza nell'area (che fa parte della Provincia estensionale del Basin and Range) di strutture, nelle zone di interazione tra le faglie normali, che possiedono una elevata permeabilità al movimento dei fluidi. **(20)** In caso di perdita di fluidi dal livello del deposito, a 300 metri dalla superficie, queste strutture funzionerebbero da canali verticali che porterebbero alla contaminazione della falda d'acqua profonda, che si trova a 600 metri dalla superficie e che rifornisce di acqua potabile la città di Las Vegas.

Già nel 2008 il DOE (Department of Energy) riteneva il progetto insufficiente e pensava di ampliarlo sino alla capacità di 122.000 tonnellate, aggiornando la stima di costo a 96,2 miliardi di dollari (2007).



Oggi del sito esistono il tunnel esplorativo di 5 miglia e una serie di derive trasversali e nicchie che formano parte del sistema ESF (Exploratory Studies Facility).

Di recente la Camera degli USA ha votato una mozione che sollecita il DOE a concedere nuovamente le licenze per realizzare l'impianto, scelta che il governo sembra voglia perseguire con uno stanziamento di 120 milioni di dollari. Tuttavia, proprio il presidente Donald Trump ha dato origine a una polemica dichiarandosi d'accordo con la popolazione del Nevada che si oppone fermamente al riavvio del progetto.

Altro esempio negli USA lo ritroviamo a **Carlsbad**, nel New Mexico (fig. 14). WIPP (Waste Isolation Pilot Plant). **(21)**

Concepito nel 1971 per garantire uno stoccaggio sicuro per 10.000 anni, nel

marzo 1999 ha cominciato a ricevere rifiuti transuranici derivanti dalla costruzione di ordigni militari. La maggior parte dei rifiuti, prima conservati fuori terra in 23 siti di 15 stati, contenevano plutonio-239, che ha una emivita di 24.000 anni. Dalla perforazione esplorativa, effettuata circa 20 anni prima, il Dipartimento dell'Energia (DOE) aveva investito circa 2,5 miliardi di dollari e, al momento dell'attivazione nel 1999, si stimava che il costo totale, compreso il funzionamento del sito per 25-35 anni, avrebbe superato i 19 miliardi di dollari.

Nel 2014 accadde una serie di incidenti: il 5 febbraio un camion per il trasporto del sale va a fuoco all'interno della struttura sotterranea; il 14 febbraio si verifica una perdita di radiazioni che viene rilevata il giorno dopo e che contamina una ventina di lavoratori; il 26 febbraio 13 lavoratori di superficie risultano esposti a materiale radioattivo. L'incidente del 14 febbraio verrà successivamente imputato allo scoppio di uno (o più) dei 258 contenitori di materiale radioattivo, imballato con lettiera organica al posto della lettiera di argilla, presenti in una delle sale sotterranee, a 460 metri di profondità.

Il sito resta chiuso per tre anni e, dopo una spesa di circa 500 milioni di dollari, viene riaperto il 9 gennaio 2017. **(22)**

Come se non bastasse il sito è ormai circondato da pozzi di gas e petrolio perforati con il metodo del fracking. Chi li ha autorizzati sostiene che i pozzi vanno in orizzontale tra i 2 e i 3 chilometri di profondità, mentre il sito è molto più in alto, a 650 metri. Si dimentica però la possibilità che si verifichino terremoti, più o meno forti; non esiste la garanzia assoluta che i liquidi di perforazione rimangano sempre in profondità e potrebbero risalire, tramite fratture, sino al sito di stoccaggio.

Gran parte delle circa 90.000 tonnellate di scorie nucleari della nazione, derivanti dal nucleare ad usi civili, continuano ad essere immagazzinate dove vengono prodotte. Le centrali nucleari li racchiudono negli stessi fusti-botti di acciaio e cemento che, forse, un giorno verranno sepolti a Yucca Mountain o da qualche altra

parte.

Anche la **Germania** aveva creduto d'aver individuato una soluzione duratura nella Bassa Sassonia realizzando il deposito **ASSE II** all'interno di una miniera di sale ormai dismessa (fig.15). A partire dal 1960 vi sono stati depositati 126.000 barili di scorie a bassa e media radioattività. Movimenti geologici hanno aperto fessure nella ex miniera consentendo all'acqua di filtrare. Si teme che le falde acquifere della regione possano venire contaminate. Già nel 1988



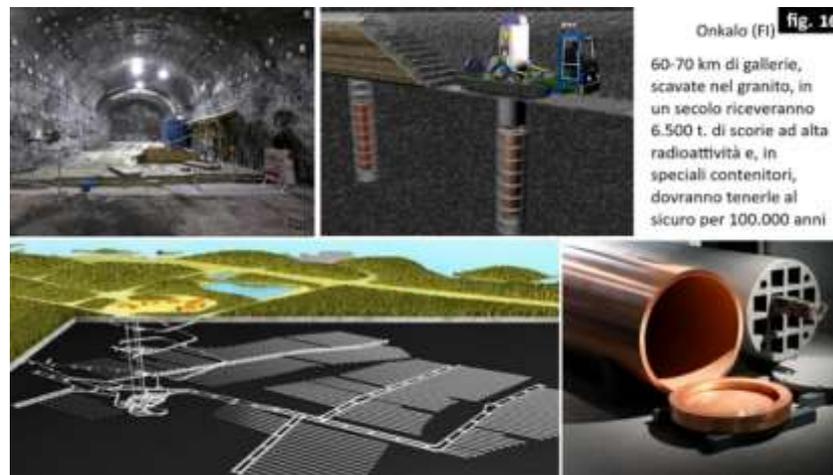
erano state individuate fuoriuscite radioattive dalle camere di stoccaggio sigillate a 750 metri di profondità. Nel 2008 è stato confermato che l'acqua che esce dalla ex miniera di sale è radioattiva e che la miniera stessa rischia di crollare. Il governo tedesco ha quindi deciso di estrarre dalla miniera le centinaia di tonnellate di rifiuti radioattivi con l'impiego di veicoli telecomandati per ricollocarli in siti più sicuri. Disgraziatamente i rifiuti nucleari erano stati depositati in modo da renderne ora molto difficile la rimozione. Sono presenti 102 tonnellate di uranio, 87 tonnellate di torio, 28 chilogrammi di plutonio (radioattivo e mortale in quantità minima). E poi un mix di diversi agenti chemio-tossici, pesticidi e circa 500 chilogrammi di arsenico. Nel gennaio 2009 il Bundesamt für Strahlenschutz (Ufficio federale per la protezione da radiazioni) ha assunto la responsabilità della miniera Asse II.

Il 24 aprile 2013 è entrata in vigore una specifica legge per accelerare il recupero dei rifiuti radioattivi, bonificare e disattivare il deposito. L'intervento sulle scorie dovrebbe articolarsi in tre diverse fasi: recupero e trasporto in un impianto di stoccaggio in superficie; condizionamento e re-impacchettamento; riallocazione per lo smaltimento in nuove cavità da realizzare nel sottosuolo e da riempire con speciale

calcestruzzo. Il processo presenta alcuni elementi d'incertezza che suggeriscono di iniziare con una fase di prova e sperimentazione. Attualmente circa 13.000 litri d'acqua al giorno vengono estratti dalla miniera per evitare il pericolo di contaminazioni. Si sta lavorando ma ancora non è iniziata l'estrazione dei materiali radioattivi che verranno stoccati in un sito provvisorio, in quanto non è ancora stato individuato un sito definitivo dove collocarli.

La **Francia** dispone in superficie di due centri per lo stoccaggio dei rifiuti a bassa radioattività: quello della **Manche**, vicino a La Hague, ha esaurito tutta la sua capacità nel 1994 e resterà sotto controllo per secoli. Al suo posto è da allora operativo quello di **Aube**, nei pressi di Parigi, che ha una capacità di stoccaggio di un milione di metri cubi di rifiuti a vita breve. Alla fine del 2018, il volume dei rifiuti immagazzinati era di circa 335.175 m<sup>3</sup>, cioè il 33,5 % della capacità autorizzata.

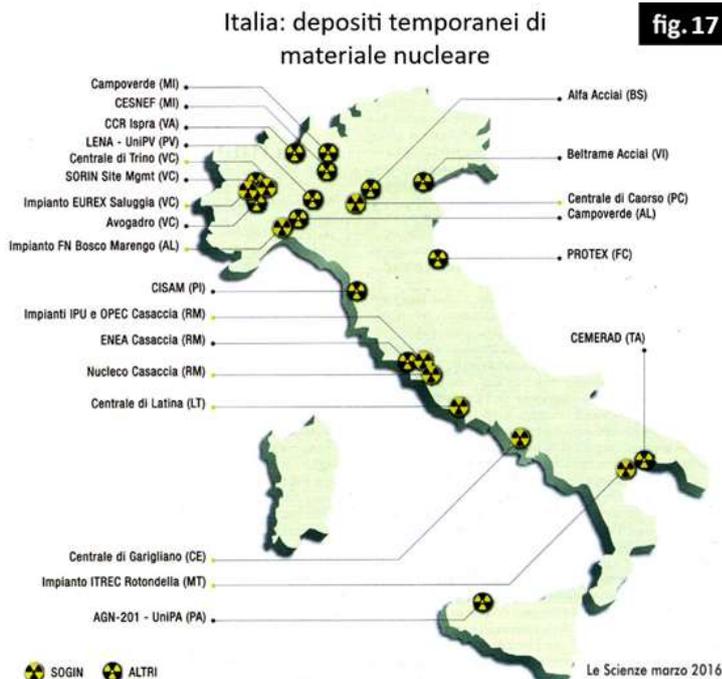
Per le scorie ad alto livello di radioattività è stata individuata una ipotesi di sito nelle formazioni di argilla di Bure. Qui l'Agenzia per i rifiuti radioattivi (Andra) è stata autorizzata a costruire un laboratorio di ricerca sotterraneo in vista della costruzione di un deposito per lo smaltimento a lunghissimo termine. Per la sua realizzazione, che dovrebbe concludersi nel 2025, è prevista una spesa di 25 miliardi di euro ma in un



recente rapporto dell'Institut de radio protection et de sûreté nucléaire (IRSN), l'ente pubblico transalpino responsabile per la ricerca sui rischi nucleari, si afferma che l'affidabilità di quel sito non può essere pienamente garantita.

La **Finlandia** sta effettuando forse il più serio dei tentativi, proprio nei pressi della centrale situata nell'isola di Olkiluoto. L'impianto si chiama **Onkalo** ed è formato da gallerie che si sviluppano

all'interno di una enorme piattaforma di granito, sino a 475 metri di profondità (fig.16). La struttura è iniziata nel 2004 e, a partire dal 2023 comincerà a ricevere le scorie all'incirca per i successivi 100 anni. Quando sarà terminata, sarà composta da 60 a 70 chilometri di tunnel sparsi in un'area di circa 2 chilometri



In Italia ci sono 23 siti di produzione e stoccaggio temporaneo di materiale nucleare 9 sotto la responsabilità di SOGIN, 14 di enti pubblici o aziende private

quadrati. Nei tunnel saranno stati depositati nel frattempo 3.250 contenitori che ospiteranno circa 6.500 tonnellate di uranio. Il tunnel di accesso principale sarà riempito con macerie e cemento e l'ingresso sarà sigillato nella speranza che la struttura di stoccaggio rimanga chiusa e impermeabile per 100.000 (centomila) anni. Il costo di costruzione dovrebbe aggirarsi sui 3,5 miliardi di euro, a cui se ne dovranno aggiungere forse altrettanti per lo smaltimento delle scorie.

In **Italia** scorie e materiali radioattivi, di varia origine (impianti di produzione di elettricità, laboratori sperimentali, ospedali, industrie, gadget), sono depositati da decenni **provvisoriamente in più di una ventina di siti**, che spesso coincidono con i luoghi in cui sono stati prodotti, **privi di particolari sistemi di**

**protezione contro i rischi sismici, idrogeologici o terroristici** (fig. 17). Nel **Lazio** ci sono i volumi maggiori dei rifiuti scarsamente radioattivi; in Piemonte, nel vercellese e principalmente a **Saluggia** (collocata in una specie di piccola isola circondata dalla Dora Baltea e da due canali), è invece accumulata la maggiore quantità dei materiali “più radioattivi”. Siti rilevanti si trovano anche presso le **quattro centrali elettronucleari dismesse**.

Si può facilmente arrivare a una visione esaustiva della situazione attuale dei depositi e dei materiali nucleari italiani, consultando l’Inventario Nazionale dei Rifiuti Radioattivi pubblicato dall’ISIN (Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione) nel maggio del 2019 **(23)**.

Alcuni anni fa il governo aveva commissionato una ricerca, conclusasi nel 2015 con un documento che dovrebbe aver individuato sul territorio nazionale una serie di siti adatti alla costruzione di un deposito di stoccaggio a lungo termine. Per opportunità politica (meglio, partitica), di quel documento, a distanza di quasi 5 anni, non si ha più notizia e rimane chiuso nei cassetti del Ministero dell’Ambiente.

## **CO<sub>2</sub> (IL BIOSSIDO DI CARBONIO)**

La radioattività, in caso d’incidente, fuoriesce dall’impianto nucleare e causa danni gravissimi, permanenti e su grandi estensioni, alle persone, ai terreni e ai corpi acquei. Tuttavia, alcuni collocano la fonte nucleare tra le fonti energetiche cosiddette “alternative”, ecologicamente compatibili.

Tale opinione si basa sulla considerazione che il processo fissione nucleare-calore-elettricità, non emettendo “gas serra”, in particolare CO<sub>2</sub>, rappresenterebbe una valida alternativa all’impiego di combustibili fossili. Osservazione incontestabile, ma che non permette di sostenere che la filiera della fonte elettro-nucleare non contribuisca al processo di riscaldamento globale di origine antropica.

Un reattore non emette direttamente CO<sub>2</sub> durante il funzionamento. Tuttavia, il lungo e complesso ciclo del combustibile (dall’estrazione dell’uranio minerale fino al confinamento permanente delle scorie e del combustibile esausto) e il ciclo della centrale (dalla costruzione della struttura e di tutti i suoi componenti, sino allo smantellamento) richiedono energia, materiali, trasporti e lavori, che danno origine a quantità importanti di emissioni di gas serra, CO<sub>2</sub> in particolare.

Non è semplice né facile quantificare l’emissione di gas serra lungo tutta la filiera nucleare, ma un centinaio di “analisi di ciclo di vita” sono state portate a compimento. Sono stati riscontrati valori molto diversi, da un minimo di 1,4 grammi a un massimo di 288 grammi di CO<sub>2eq</sub>/kWh prodotto **(24)**.

tecnologia	dimensione configurazione combustibile	fig. 18 gCO <sub>2eq</sub> /kWh
eolico	25 MW offshore 1,5 MW onshore	9-10
idroelettrico	3,1 MW con bacino 300 kW fluente	10 13
biogas	digestione anaerobica	11
solare termodinamico	80 MW	13
biomassa		14-41
fotovoltaico	silicio policristallino	32
geotermico	80 MW	38
<b>nucleare</b>	<b>vari tipi di reattori</b>	<b>66</b>
gas naturale	vari cicli combinati	443
celle a combustibile	idrogeno da metano	664
gasolio/olio	vari generatori e tipi di turbine	778
carbone	vari generatori con- senza scrubber (filtri)	960-1050

Benjamin K. Sovacool

Energy Policy 36 (2008) 2940-2953

Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power:  
A critical survey, Energy Policy, Vol. 36 di 103

La fig. 18 riporta la tabella di sintesi (tradotta in italiano) della revisione critica, di Benjamin K. Sovacool, di 103 studi **(25)**. Si osserva che **l’energia nucleare contribuisce all’aumento dell’effetto serra in misura minore dei combustibili fossili, ma ben maggiore di tutte le fonti di energia rinnovabile**. Altro dato interessante è reso disponibile dallo studio *Nuclear power, energy security and CO<sub>2</sub> emission (revised draft)* di Jan Willem Storm van Leeuwenche **(26)**, per quanto riguarda il CO<sub>2</sub>, arriva alla seguente conclusione (tradotta in italiano): “L’emissione specifica di CO<sub>2</sub> da parte del ciclo dell’energia elettro-nucleare rilevata in questo studio è nell’intervallo 84-130 gCO<sub>2</sub> / kWh, nel caso di minerale di uranio con un grado medio dello 0,11% di uranio (minerali morbidi). La diffusione del valore è causata dalle incertezze di emissione di CO<sub>2</sub> per la costruzione delle strutture e per il loro smantellamento. Con un grado di minerale dello 0,05% di uranio, che è più vicino all’attuale media mondiale, l’emissione specifica di CO<sub>2</sub> dell’energia elettro-nucleare è nell’intervallo di 98-144 gCO<sub>2</sub> / kWh.”

Sono valori molto inferiori a quelli dei cicli delle

centrali a carbone e a gas, ma superiori a quello individuato nel lavoro di Sovacool per il ciclo elettro-nucleare.

**A mano a mano che si esauriscono i siti minerari più “ricchi”,** la concentrazione di uranio nella roccia tende a ridursi e si è costretti a sfruttare miniere sempre “più povere”: **augmenta così il consumo di energia** e di materiali necessari per il ciclo di produzione del combustibile. In prospettiva una centrale nucleare, nei suoi cicli completi, potrebbe emettere una quantità di **CO<sub>2</sub> significativamente maggiore.**

## I REATTORI DI IV GENERAZIONE

Nei primi film western, quando i soldati si trovano accerchiati dagli “indiani” e sembrano ormai senza via di scampo, ecco che arrivano “*i nostri*” a risolvere la situazione. Così, quando nei dialoghi, nei confronti con imprenditori, economisti, politici e sostenitori del “main stream”, la questione del rilancio dell’energia nucleare sembra impantanarsi tra costi insostenibili, problemi complicati, pericoli crescenti e incidenti inevitabili, ecco che irrompono i salvifici reattori di “IV Generazione”.

A poco serve ricordare che il tentativo di realizzare quello di “III Generazione Plus” (l’EPR di Areva) sta trovando da anni difficoltà enormi; seppure in questo caso si tratti dello sviluppo e del miglioramento di una tecnologia in qualche modo consolidata.

Salvo qualche prototipo, sperimentato in passato, e qualche tentativo in corso per realizzare reattori sperimentali di piccola taglia “ad altissima temperatura”, i reattori di potenza di IV Generazione sono sostanzialmente ancora incompiuti persino sulla carta. Le linee guida, i principi ispiratori, la progettazione di massima, vengono sviluppati e arricchiti di nuove ipotesi da oltre un ventennio, ma non esiste ancora alcun progetto esecutivo, tante sono le difficoltà e le complessità che emergono nel momento in cui vi si vogliono inserire gli obiettivi che si vogliono raggiungere.

Tutti i progetti su cui si sta lavorando puntano a soddisfare i seguenti requisiti:

- nessuna emissione inquinante in atmosfera
- vita media a lungo termine (funzionamento ininterrotto per almeno uno o due decenni) con elevata efficienza nel consumo del combustibile e riduzione a livelli minimi delle scorie nucleari radioattive
- eliminazione della necessità di prevedere un piano di emergenza in caso di incidente e quindi esistenza di un’intrinseca sicurezza nucleare, affidata a semplici concetti fisici che dovrebbero attivarsi spontaneamente in caso di guasto o incidente
- non proliferazione militare
- vantaggio economico rispetto alle altre fonti di energia elettrica.

Si tratterebbe d’impianti a “sicurezza intrinseca”, in cui il guasto accidentale o l’errore umano non potrebbero avere conseguenze. Caratteristica particolarmente apprezzabile, che lascerebbe comunque inalterati alcuni aspetti non secondari, legati ai costi elevatissimi (costruzione, smantellamento) e alla gestione e stoccaggio dei rifiuti e delle scorie radioattive. Alcuni di essi dovrebbero poter utilizzare torio, plutonio, uranio impoverito e anche rifiuti nucleari, riducendo così anche la quantità di scorie pericolose e, nel caso del torio, ampliando enormemente le riserve di combustibile nucleare.

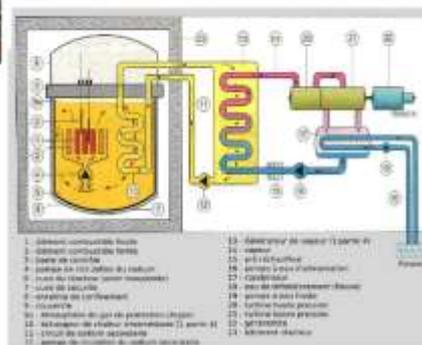
Questi reattori possono essere classificati in due grandi gruppi:

a) **reattori termici**, in cui il fluido di raffreddamento (acqua o sali fusi) lavora a temperatura estremamente elevata o in condizioni supercritiche;

b) **reattori veloci** (autofertilizzanti, raffreddati a sodio liquido) la cui caratteristica principale consiste nella produzione di materiale fissile in quantità maggiore a quella consumata.

Quest’ultima tipologia, ancor priva dei requisiti richiesti per reattori di IV generazione, in particolare del più importante, quello della “sicurezza intrinseca”, è stata sperimentata qualche volta in passato e i problemi risultarono sostanzialmente insormontabili.

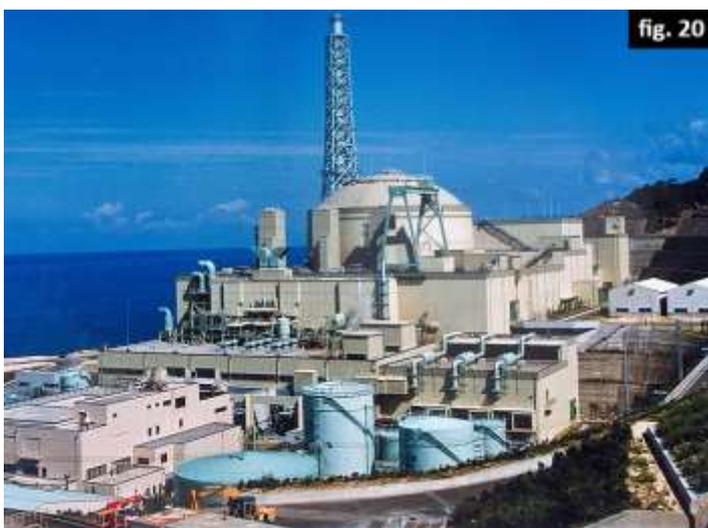
Il **Superphénix** (fig.19) fu progettato nel 1968, costruito tra il 1974 e il 1981 a Cres-Malville (F), vicino al confine svizzero da un consorzio formato da EDF (Francia), ENEL (Italia) e SBK, società a maggioranza tedesca (RWE Energie), con quote minoritarie di tre utility: Electrabel (Belgio), SEP (Olanda) e U.K.’s Nuclear Electric. Iniziò a produrre energia nel 1986 ma non raggiunse mai la potenza di progetto (1.200 MW). Il raffreddamento del reattore era garantito da 5.000 tonnellate di sodio liquido, un metallo infiammabile a contatto con l’aria ed esplosivo al contatto con l’acqua, con forte reattività chimica e corrosiva



Il contenitore del sodio era a doppia parete d'acciaio. L'impianto funzionò a singhiozzo a causa di problemi di varia natura, qualcuno grave e molto pericoloso. Più di una volta si sono verificate condizioni critiche, anche da far temere un fuoco di sodio con conseguenze gravissime. Nel marzo 1987 si verificò una fuga di 20 tonnellate di sodio da un recipiente di stoccaggio e subito dopo il reattore fu fermato. Riavviato nel gennaio 1989 fu fermato 8

mesi dopo ma, mentre era fuori servizio, nell'aprile del 1990 si verificò una nuova perdita di sodio da un circuito primario. In dicembre dello stesso anno sotto il peso della neve cedette una parte del tetto della sala del reattore. Nel gennaio del 1994 venne riavviato ma a luglio fu declassato a "laboratorio di ricerca e dimostrazione" mentre la produzione elettrica passò in secondo piano. Nel dicembre del 1994 si verificò una perdita di argon in uno scambiatore di calore al sodio. Venne nuovamente riavviato nel settembre 1995 ma un anno dopo, quando fu fermato per un controllo programmato, non ripartì mai più. Nel giugno 1997, dopo che da tempo nel Consorzio era rimasta solo EDF, l'impianto venne definitivamente chiuso con un decreto del governo francese.

Anche a **Monju** (Fukui-Giappone) c'è un *Fast Breeder Reactor (FBR)* da 280 MWe (fig. 20). Costruito a partire dal 1985 ha iniziato a funzionare nel 1994. Dopo quattro mesi, 700 chilogrammi di sodio liquido fuoriuscirono dal circuito secondario e si incendiarono. Per fortuna quel sodio non era radioattivo ma il



calore sprigionato fuse numerose strutture di acciaio presenti nei locali dell'incendio. Dopo anni di interventi e modifiche è stato avviato nel maggio del 2010 per poi funzionare solo qualche mese. Verso la fine dello stesso anno, mentre si procedeva al rifornimento con nuovo combustibile, le attrezzature per la ricarica caddero all'interno del reattore. Dopo vari rimpalli di responsabilità sul che fare, nel 2016 il governo giapponese ha formalmente deciso di smantellarlo. La Japan Atomic Energy Agency nel 2017 ha varato un piano per disattivarlo entro 30 anni, prevedendo un costo di 3,3 miliardi di dollari. Andranno ad aggiungersi ai circa 10 miliardi di dollari spesi in precedenza.

La **Russia**, l'**India** (che possiede molto torio) e in particolare la **Cina**, stanno destinando ingenti investimenti in ricerca e sviluppo per poter fare di un reattore al torio una fonte di energia concreta.

Il torio è un metallo radioattivo fertile, non fissile; non può quindi sostenere da solo una reazione a catena, ma se un atomo di torio 232 viene irradiato e cattura un neutrone, si trasmuta in uranio 233 che invece è fissile. Quindi il torio può essere fertilizzato se all'inizio si utilizza una fonte come l'uranio per irradiarlo e poi può a sua volta fertilizzare altro torio in un ciclo di autofertilizzazione. Si stima che il torio sia tre o quattro volte più abbondante dell'uranio.

Diversi reattori hanno utilizzato e utilizzano il torio assieme a uranio altamente arricchito o a plutonio, per scopi poco più che sperimentali, ma ancora non esistono prospettive concrete per un reattore di potenza alimentato esclusivamente a torio.

Qualche anno fa, grazie alle generose sovvenzioni di illustri e ricchi mecenati, nacque TerraPower, una compagnia che si pone l'obiettivo di sviluppare (per ora poco più che i disegni) dei reattori "rivoluzionari", possibili varianti di quelli di IV Generazione: il TWR (Traveling Wave Reactor), MCFR (Molten Chloride Fast Reactor). Dovrebbero poter utilizzare uranio impoverito, convertendo gradualmente il combustibile attraverso una reazione nucleare, senza rimuoverlo dal nocciolo del reattore, eliminando la necessità del ritrattamento. Sarebbero anche in grado di generare calore e produrre elettricità in funzionamento continuo per un periodo molto lungo. Per ora si tratta di modellistica computerizzata, mentre l'idea di costruire il primo prototipo in Cina è stata abbandonata.

Le più ottimistiche previsioni per sperare di vedere in funzione qualche impianto di IV Generazione guardano alla metà di questo secolo, ma nessuno è in grado di formulare ipotesi attendibili.

### QUALCHE CONSIDERAZIONE SULLA SITUAZIONE ITALIANA

*"Il nucleare eliminerà il pericolo di blackout".*

*"Il nucleare ci renderà più liberi dalla schiavitù del petrolio"*

*"Il nucleare diminuirà la nostra dipendenza energetica dall'estero".*

*"Non ha alcun senso rifiutare di costruire centrali nucleari sul nostro territorio quando siamo circondati da decine d'impianti appena oltre confine".*

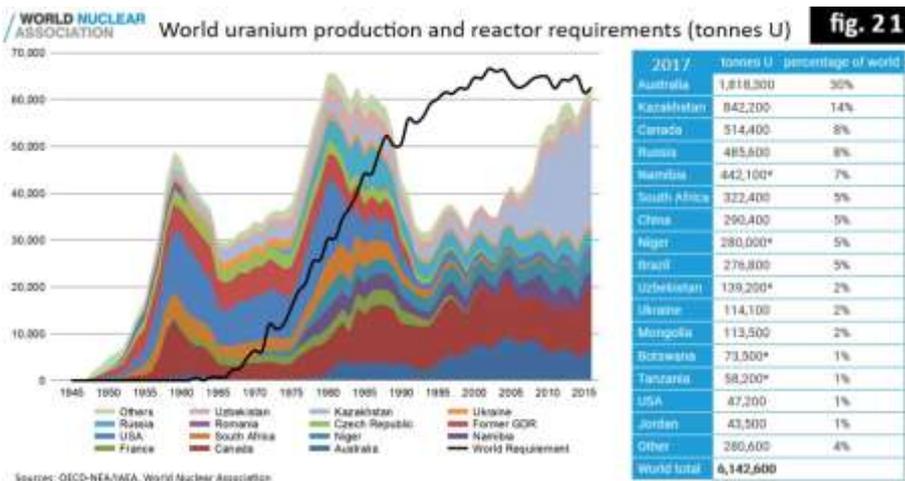
Prima del referendum del 2011, queste ed altre affermazioni di pari tenore erano pronunciate di frequente dai sostenitori del nucleare, sia nei dialoghi interpersonali che nei talk show televisivi.

Oggi, quando qualcuno intende sostenere la bontà della scelta nucleare, pur senza disconoscere la validità dei "vantaggi" sbandierati nel periodo pre-referendario, preferisce appoggiarsi a due concetti diversi, ritenuti più pregnanti in quanto di carattere generale:

a) Può fornirci l'energia che oggi ricaviamo dal petrolio, che non durerà per sempre, offrendoci garanzie migliori dell'eolico e del fotovoltaico, che sono aleatori e producono poco.

b) Può efficacemente contribuire alla riduzione dell'effetto serra in quanto la produzione di energia

nucleare non produce CO<sub>2</sub>.



La situazione in cui si sta dibattendo il settore elettronucleare è già stata analizzata nella prima parte di questo lavoro e ha mostrato quanto siano decisive le problematiche e le negatività e, invece scarsi, i supposti pregi di questa filiera. Tuttavia, qualche parola può essere aggiunta

per quanto riguarda in particolare l'Italia.

1) In Italia non c'è alcun pericolo di blackout per carenza di potenza elettrica disponibile. La potenza efficiente lorda complessiva è pari a circa 120 GW, più del doppio della punta massima richiesta al consumo che ultimamente si aggira tra i 56-57 GW, tra l'altro per poche ore durante l'anno. Il pericolo di blackout può nascere da grossi e imprevedibili problemi di rete, non certo da mancanza di centrali.

2) La produzione elettronucleare non serve a sostituire il petrolio usato per produrre elettricità, come al

**WORLD NUCLEAR ASSOCIATION**  
**2018 - uranium production**  
**fig. 22**

Company	tonnes U	%
Kazatomprom	11,074	22
Orano	5809	11
Cameco	4613	9
Uranium One	4385	8
CGN	3185	6
BHP	3159	6
ARMZ	2904	5
Rio Tinto	2602	5
Navoi Mining	2404	4
Energy Asia	2204	4
CNNC	1983	4
General Atomics/Quasar	1663	3
VostGok	1180	2
Sopamin	1002	2
Other	4701	9
<b>Total</b>	<b>53,498</b>	<b>100%</b>

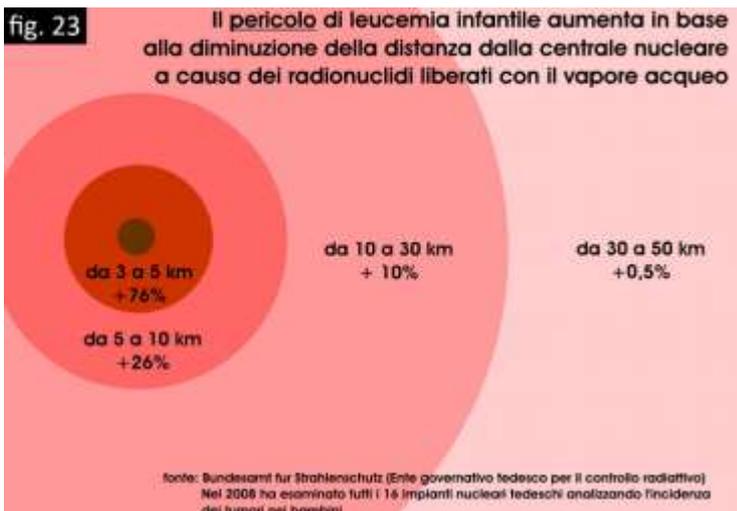
the top 10 companies by production marketed  
 80% of the world's uranium production

tempo del referendum sostenevano i fautori dello sviluppo nucleare. In Italia nel 2018 l'energia elettrica ricavata dalla combustione di prodotti petroliferi è stata pari a 10,9 TWh su un totale di 290, 6 TWh, cioè l'3,7%, anche se la produzione elettrica resta largamente dipendente dalle altre fonti fossili: per il 43,78% dal metano e il 12,58% dal carbone.

3) In Italia la "penetrazione elettrica", cioè il rapporto tra il consumo interno lordo di energia in fonti primarie e l'elettricità, si aggira da una ventina d'anni tra il 35% e il 38% (27). Alcune centrali nucleari potrebbero quindi cambiare la composizione del mix elettrico italiano, aumentandone anche il peso nel mix energetico nazionale, ma non cambierebbero in modo radicale le caratteristiche del consumo complessivo di energia primaria nazionale. Inoltre, non bisogna dimenticare che il nostro paese non possiede miniere, né impianti di raffinazione e di arricchimento per la produzione del combustibile e il suo riprocessamento. La fonte nucleare non diminuirebbe affatto la dipendenza energetica dall'estero poiché il funzionamento dei reattori resterebbe comunque del tutto dipendente dalle importazioni di uranio minerale e dalla disponibilità degli impianti tecnologici stranieri.

La figura 21 mostra chiaramente che è terminata la fase in cui buona parte del combustibile, necessario al funzionamento delle centrali, proveniva dal "riciclo" di "uranio militare" e che da ora in avanti l'approvvigionamento dipende pressochè totalmente dalla disponibilità di uranio minerale. Si nota anche che tra il 2015 e il 2017 (cfr. figura con tabella) la posizione in classifica delle regioni dove è stata estratta la maggiore quantità di uranio è cambiata e l'Australia ha superato il Kazakistan.

L'estrazione dell'uranio nel mondo è sostanzialmente nelle mani di un oligopolio di alcune grandi società che sfruttano giacimenti sia nazionali che stranieri (fig. 22) (28). Nel 2018 le prime 10 hanno coperto l'80% del mercato mondiale. Inoltre, il cruciale processo di arricchimento dell'uranio, a livello mondiale è svolto praticamente da sole 5 società che si dividono il 99,7% del mercato (29). Si tratta di



concentrazioni di potere dominante che rende ridicole quelle del mercato petrolifero e le parole di chi afferma che la fonte nucleare permette di diversificare le fonti di approvvigionamento.

4) Abitare a qualche chilometro o a centinaia di chilometri da una centrale nucleare pare proprio non sia la stessa cosa. La radioattività si sposta e nel farlo si "diluisce" assieme alle conseguenze sull'ecosistema, mala pericolosità per le forme di vita aumenta a mano a mano ci si avvicina al punto in cui si è verificato

l'incidente. Basta esaminare quanto è successo nei dintorni di Fukushima e di Chernobyl. Già entro una quarantina di chilometri da Fukushima ci sono città molto popolate dove probabilmente qualche conseguenza c'è stata, ma gli effetti più gravi e duraturi si sono registrate entro il raggio di una trentina di chilometri dalla centrale (cfr. fig. 31). Una situazione analoga, pur in presenza di un incidente molto diverso come causa e dinamica, si è verificata a Chernobyl dove la zona di "alienazione" si espande verso nord per una trentina di chilometri (cfr. fig. 28)

Gli esempi si riferiscono entrambi alle conseguenze di un incidente, ma anche durante il normale funzionamento sembra non sia indifferente vivere vicino o lontano da un impianto nucleare. Nel 2008 in Germania il Bundesamt für Strahlenschutz (ente governativo per il controllo radioattivo) ha esaminato i 16 impianti nucleari della Germania, analizzando l'incidenza dei tumori nei bambini. Il risultato (fig.23)

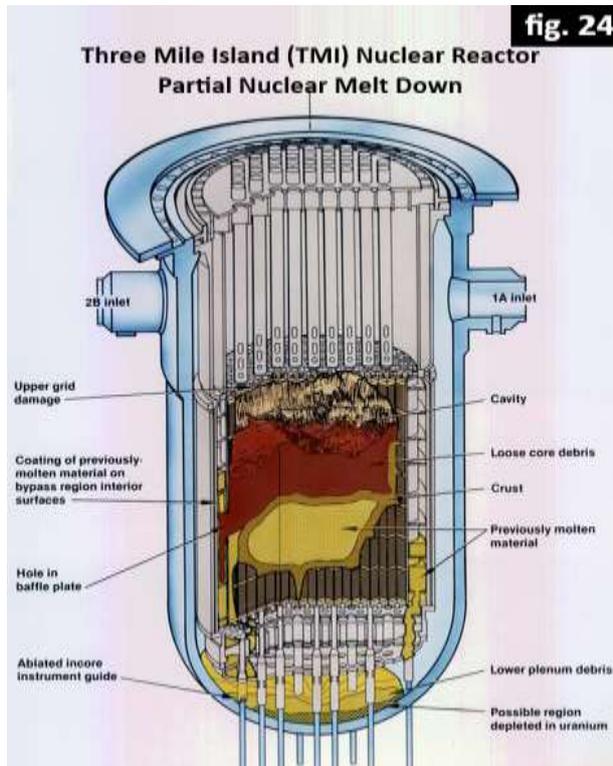


fig. 24

dimostrerebbe come la distanza dall'impianto potrebbe risultare decisiva per ridurre il pericolo di leucemia infantile (questi dati sono stati criticati da alcuni studiosi che ritengono siano stati ignorati alcuni fattori in grado di confondere il risultato). D'altronde in nessun paese i "detentori del potere", pubblico o privato che sia, in particolare coloro che decidono di costruire le centrali, abitano stabilmente nei pressi di un impianto nucleare.

20

### 1° grave incidente: THREE MILE ISLAND (USA)

Qui avvenne il primo grave incidente nucleare nel marzo del 1979. La prima unità da 800 MW era entrata in servizio nel 1974 mentre la seconda, da 900 MW, venne avviata solo a fine 1978, tre mesi prima che restasse coinvolta dall'incidente. Nell'unità n.2 si verificò un guasto nell'impianto di raffreddamento che portò alla parziale fusione del nucleo del reattore e alla fuoriuscita di piccole quantità di gas e di iodio radioattivi che contaminarono l'ambiente circostante. La gravità del danno al reattore (fig. 24) portò alla definitiva

chiusura dell'unità 2, mentre non si registrarono gravi conseguenze alle persone, né all'interno né all'esterno dell'impianto. Lo smontaggio e la messa in sicurezza (in contenitori d'acciaio) del solo reattore, a causa della complessità rappresentata dalla presenza di 100 tonnellate di combustibile e corium (miscela fusa di uranio, prodotti di fissione, acciaio, titanio e materiale delle barre di moderazione) continuò sino al 1993 e costò circa 1 miliardo di dollari. Il resto dell'unità n.2 è e resterà sotto monitoraggio sino al 2035 quando inizierà il suo definitivo smantellamento (forse unitamente all'unità n.1) con una previsione di spesa (anno 2009) di 837 milioni di dollari.

### 2° grave incidente: ČERNOBYL (URSS)

L'impianto comprendeva 4 reattori tipo RBMK, per una potenza complessiva di 3.515 MW. L'incidente avvenne nella primavera del 1986 nel reattore n.4, in funzione da soli 3 anni.

La reazione di fissione in questo tipo di reattore era moderata a grafite e il calore veniva estratto con l'acqua. In questo tipo di reattore vi erano tre difetti progettuali gravi, tra cui quello per cui se per un



fig. 25

guasto la temperatura sale in modo incontrollato e la grafite viene esposta accidentalmente all'aria, questa inizia a bruciare ad altissima temperatura, aggiungendo danno al danno.

Il 26 aprile era in corso un vero e proprio esperimento per esaminare il comportamento in condizioni critiche: il comportamento dell'impianto in caso di blackout della rete elettrica. Erano stati esclusi i sistemi di spegnimento automatico e di raffreddamento di

emergenza del nocciolo, mentre si era abbassata troppo la potenza del reattore ben oltre quanto previsto dall'esperimento stesso. A potenze così basse il reattore si "avvelena" temporaneamente e per far risalire il livello di potenza gli operatori furono obbligati a ridurre anche il flusso dell'acqua, aumentando l'instabilità. Dopo un guasto e una serie di manovre errate, alle 1,23 il cuore del reattore arrivò, nel giro di 20 secondi, a

fig. 26



circa 10 volte la potenza nominale. Nel nocciolo, non più raffreddato, la temperatura dei metalli e della grafite raggiunse livelli ben superiori a quelli di fusione del materiale (si ritiene superiori ai 2.200°C), l'acqua di raffreddamento cominciò a bollire, aumentò la pressione interna e cominciò a reagire con la grafite formando una bolla d'idrogeno che esplose. L'esplosione distrusse il reattore, la sala turbine e l'intero edificio di contenimento (fig. 25) che, peraltro, era un capannone costruito con i normali criteri dell'edilizia industriale. Pezzi e rovine furono scaraventati tutt'intorno. La grafite prese fuoco e si creò una colonna di fumo che trasportò in aria tonnellate di particolato radioattivo e prodotti di fissione. Il quadro peggiore che si possa immaginare.

Il 15% ricadde sul posto, il 50% nei dintorni della centrale stessa; il resto fu trasportato dalle correnti atmosferiche prima al nord verso la Scandinavia (la Finlandia per prima registrò livelli abnormi di radioattività in atmosfera), poi verso il centro-sud d'Europa, sfiorando le Alpi e l'Adriatico.

Nei giorni successivi, manualmente con semplici pale e senza particolari protezioni, centinaia di operai e militari (i cosiddetti "liquidatori"), solo in parte consapevoli del pericolo mortale a cui si esponevano, proseguirono a gettare dentro alla voragine i pezzi di grafite, di metallo e di cemento radioattivo sparsi in giro sul tetto della centrale. Lavoravano a turni di due minuti, ma ciò non bastò a evitare loro le drammatiche conseguenze delle radiazioni che assorbono. Molti di loro erano volontari provenienti anche da lontano, a cui era stato promessa una pensione militare.

Nel frattempo altri "liquidatori" dagli elicotteri scaricavano, dentro la voragine aperta dall'esplosione, migliaia di tonnellate di boro, di argilla e pietrame calcareo per spegnere la grafite e fermare la colonna di aria calda che trasportava in atmosfera materiale radioattivo.

Nel giorno dell'incidente rimasero uccise 31 persone (altre fonti riportano cifre tra 50 e 100). Molte altre (qualcuno stima 10.000), in particolare tra i "liquidatori", negli anni successivi riportarono tumori, deformazioni e in tanti morirono prematuramente.



fig. 27

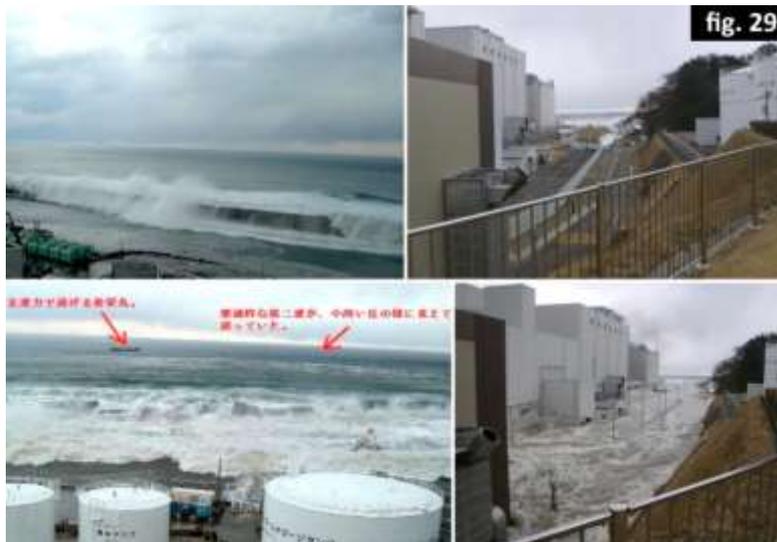
Solo nel novembre dello stesso anno si riuscì a sigillare il reattore esploso in un sarcofago di cemento armato costruito in fretta e furia. Il resto della centrale continuò a produrre energia elettrica. Il reattore n.2 fu spento alla fine del 1991 dopo un incendio. Nel novembre 1996 fu fermato il reattore n.1. Per la chiusura del n.3, e quindi dell'intera centrale, si dovette attendere il dicembre 2000 e fu resa possibile grazie ad aiuti occidentali.

Sotto il primo sarcofago ci sono, oltre a migliaia di tonnellate di materiali radioattivi, 150 tonnellate di uranio e quasi una tonnellata di plutonio. Al posto del reattore è rimasto un ammasso altamente radioattivo di corium (uranio, zirconio, calcestruzzo, serpentinite e altri metalli fusi assieme) a forma di "zampa d'elefante" (fig.26).



Già poco dopo la costruzione il sarcofago in calcestruzzo cominciò a cedere e presentare crepe tramite la quali iniziò a percolare acqua all'interno, creando nuove condizioni di pericolo. Nel settembre 2007, dopo anni di studi e trattative, si raggiunse un accordo internazionale per la costruzione di un nuovo sarcofago ad arco in acciaio, da sovrapporre al precedente. Ci sono voluti 9 anni per completarlo e quasi 2 miliardi di euro, finanziati dalla Banca Europea per la Ricostruzione e lo Sviluppo, dovrebbe durare almeno un secolo, durante il quale dovrebbe avvenire lo smantellamento di ciò che resta del reattore n. 4 e della relativa struttura, rendendo sicuro quel luogo per sempre (fig. 27). Numerose zone di territorio, attorno alla centrale e in un'area che si espande a nord sino a una trentina di chilometri di distanza, sono e resteranno chiuse per lungo tempo; altre sono sotto diversi tipi di controllo a seconda dei livelli di radioattività che presentano (fig. 28). Anche

se in buona parte di esse sono vietati gli insediamenti umani, le condizioni di bisogno hanno spinto parecchie persone anziane a ignorare il divieto e a ripopolare alcune abitazioni.



### **3° grave incidente: FUKUSHIMA DAIICHI (GIAPPONE)**

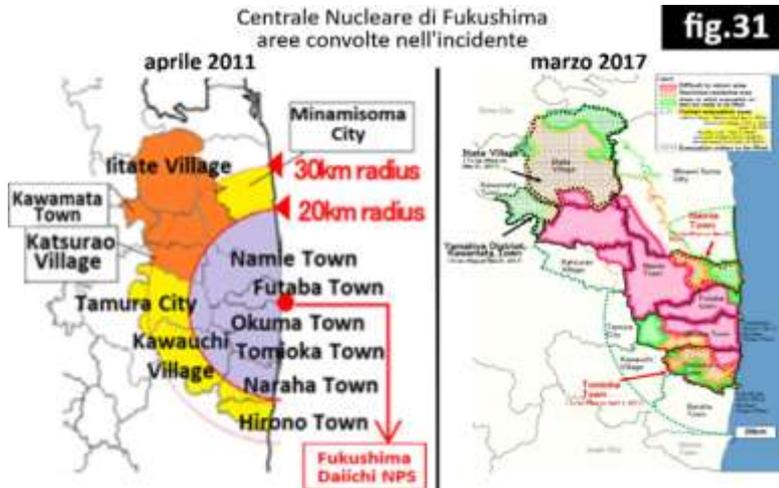
La centrale, costruita in riva all'oceano, è composta da 6 reattori BWR per un totale di 4,7 GW. È una delle più grandi del mondo ed è entrata in servizio gradualmente, tra il 1971 e il 1979. L'11 marzo 2011, alle 14,46, il Giappone viene investito da un terremoto con epicentro in mare, classificato a livello 9 della scala Richter. Le unità 1,2,3 sono in funzione, le unità 4,5 e 6 ferme per manutenzione programmata. I reattori attivi si spengono automaticamente arrestando la reazione di fissione. Il decadimento degli elementi chimici



della fissione continua però a produrre una piccola quantità di calore che va assolutamente smaltito per evitare surriscaldamenti pericolosi. Anche i reattori in manutenzione necessitano di costante raffreddamento per lo stesso motivo. Le pompe di raffreddamento sono elettriche ma nessuno dei reattori in quel momento produce energia, mentre la violenta scossa di terremoto ha fatto collassare l'intera rete elettrica nell'entroterra. La centrale, in previsione di simili condizioni di criticità, è equipaggiata con generatori di riserva,

azionati da motori diesel, che entrano in servizio. Poco dopo però la costa viene investita da un devastante tsunami. L'onda, alta 14 metri, supera i muri costruiti a difesa (7 metri) e sommerge tutta l'area dell'impianto. Le sale dei generatori di riserva, poste a piano terra, vengono allagate. I generatori diesel si bloccano e il sistema di raffreddamento si arresta (fig. 29).

Il calore originato dal decadimento dei prodotti radioattivi, non più smaltito, inizia ad accumularsi e già nella notte si evidenziano i primi problemi all'interno dei reattori. L'acqua evapora e gli elementi di combustibile cominciano a trovarsi all'asciutto. La temperatura degli elementi di combustibile scoperti sale



e la lega di zirconio che riveste le barre di uranio inizia a fondere. Una parte del combustibile si disallinea, perde stabilità e comincia a dar vita a una reazione a catena che in breve porta alla fusione parziale del nocciolo. La temperatura continua ad aumentare e l'acqua si decompone in idrogeno e ossigeno. L'idrogeno, gas leggerissimo, sale verso l'alto e si accumula nella cupola del reattore da dove, per evitare pericoli al contenitore primario, viene volutamente fatto uscire verso l'edificio di contenimento secondario. Si cerca di far

defluire all'esterno la bolla d'idrogeno che si forma sotto il tetto, ma un innesco accidentale causa la prima esplosione all'impianto n. 1. La struttura esterna del reattore salta in aria (fig. 30), viene scaraventata in ogni direzione e polveri e vapori contaminanti entrano in atmosfera.

Negli altri reattori, anch'essi privi di sistemi di raffreddamento, si decide di gettare acqua sull'edificio dall'esterno con degli idranti. È un accavallarsi continuo di tentativi, sostanzialmente inutili, per impedire che la temperatura all'interno aumenti. Si verificano presto nuove esplosioni che distruggono gli edifici esterni dei reattori 3 e 4. Dopo alcuni giorni, si dà ormai per certa la parziale fusione del nocciolo nei reattori 1,2,3 e forse anche 4. Le temperature in caso di fusione parziale restano molto più basse di quelle che si originano da una fusione totale, come accadde a Chernobyl. Un aspetto che potrebbe sembrare positivo in quanto non si crea l'effetto "plume", il pennacchio ad alta temperatura che da Chernobyl arrivò ai livelli più alti della troposfera distribuendo materiale radioattivo in gran parte d'Europa. Ma i fumi, le ceneri e i vapori radioattivi, che dai reattori di Fukushima si sono diffusi a una quota più bassa, pur avendo causato un vasto Fallout giunto a lambire la costa americana, hanno causato pesanti conseguenze soprattutto sulla popolazione giapponese, in quanto la radioattività più intensa si è depositata sul territorio nazionale. L'area maggiormente contaminata si trova in direzione nord-ovest rispetto alla centrale (fig.31). Larga in qualche tratto una quindicina di chilometri, si allunga per oltre quaranta chilometri. L'accesso è tutt'ora interdetto per più di metà della sua estensione, anche fino a trenta chilometri dalla centrale. In alcune zone, evacuate subito dopo l'incidente per prudenza, il governo sta valutando se permettere nuovamente il ritorno della popolazione.



Se possibile, ancora più complesse di quelle della terraferma sono tutt'ora le questioni legate all'aspetto idrico. Per qualche tempo dopo l'incidente l'acqua versata sui reattori, nel tentativo improvvisato e

pressoché inutile di raffreddarli, si sommò alla pioggia che investiva liberamente le macerie e, soprattutto, alle acque di falda, trasportando grandi quantità di materiale radioattivo nel Mar del Giappone, dove progressivamente l'inquinamento si è diffuso e diluito risultando rilevabile su una superficie di centinaia di migliaia di chilometri quadrati dell'Oceano Pacifico. Da allora, per anni, ogni giorno alcune centinaia di tonnellate di acqua di falda hanno continuato a infiltrarsi nei reattori attraverso le crepe delle fondazioni, contaminandosi e trasportando la radioattività in mare. Sono stati spesi oltre 300 milioni di dollari per costruire un muro sotterraneo "ghiacciato" attorno ai tre edifici lesionati, con l'obiettivo di deviarne almeno una parte direttamente in oceano. Il diaframma "ghiacciato" è riuscito a ridurre a circa 100 tonnellate giornaliere il flusso d'acqua che fluisce liberamente negli edifici e che si aggiunge a quella fatta entrare appositamente nei reattori per raffreddare il combustibile fuso che rimane troppo caldo e radioattivo per essere rimosso. Con l'utilizzo di pompe e diaframmi sotterranei viene poi raccolta, parzialmente filtrata, e stoccata. Più di 1 milione di tonnellate di acqua contaminata (in particolare da trizio) è ormai conservata in una selva di serbatoi d'acciaio di grandi dimensioni (fig. 32), a cui ogni 4-5 giorni bisogna aggiungerne uno nuovo. Il processo di decontaminazione produce fanghi contaminati, per ora raccolti in migliaia di contenitori provvisori.

Non si potrà continuare così a lungo, considerando che per lo smantellamento completo dell'impianto serviranno ancora alcuni decenni, né si può immaginare che i serbatoi siano eterni. Si sta valutando come proseguire senza escludere l'ipotesi di scaricare l'acqua in mare. Questa eventualità suscita forti reazioni da parte dell'industria della pesca, da tempo in forte crisi a causa delle sostanze radioattive presenti lungo la costa, e ritiene una tale decisione devastante per il settore.

Tuttavia, il 10 settembre 2019 il ministro dell'ambiente ha dichiarato che lo sversamento dell'acqua contaminata in oceano è l'unica opzione possibile. Il governo ne discuterà e poi prenderà la decisione definitiva.

I livelli di radioattività dell'acqua di mare sono significativi nei pressi della costa; si abbassano per diluizione mentre ci si addentra nell'oceano. Un'ampia area marina è vietata alla pesca, attività principale di molti villaggi costieri di un paese in cui il pescato è un alimento particolarmente importante.

Elementi di preoccupazione investono anche le attività presenti sulla costa ovest degli Stati Uniti, perché in quella direzione si muovono le principali correnti oceaniche e i venti dominanti.



Nell'area della centrale sono in costruzione diversi edifici (fig. 33); alcuni servono a "sarcofaghi" per le strutture dei reattori demolite dalle esplosioni, altri permettono di stoccare le macerie e i detriti di grandi dimensioni originati dalle esplosioni e dagli smantellamenti. Sono iniziate le attività per rimuovere il combustibile non danneggiato, quello esaurito conservato nei reattori e una quantità indefinita di combustibile nucleare fuso, ma è necessario prima terminare di smantellare i residui di tetti, finire di liberare gli edifici dalle strutture

collassate e dai rifiuti di piccole dimensioni, riducendo al minimo la pericolosità per le attività umane. Sono presenti, impilati, anche un migliaio di contenitori d'acciaio, che contengono circa 70.000 metri cubi di attrezzi e vestiario usati dai lavoratori che devono indossare ogni giorno nuovi dispositivi di lavoro e protezione. Sono stati disboscati circa 100 ettari di alberi piantati in prossimità della centrale; tronchi e rami hanno dato origine a 80.000 metri cubi di legname contaminato, per ora accatastato nell'area vicina all'impianto. Prima o poi bisognerà incenerirlo, non per eliminare la radioattività, ma per ridurre il volume. Procedura analoga dovrà essere applicata ai milioni di metri cubi di terreno, scorticato dalla superficie del territorio esposto alle radiazioni nei giorni successivi all'incidente, e temporaneamente conservati in sacchetti di plastica depositati in file ordinate nei campi e nelle città abbandonate dei dintorni.

Nel 2016 il governo ha aumentato la stima dei costi di circa 76 miliardi di dollari, portando il costo complessivo del disastro di Fukushima oltre 200 miliardi di dollari. Il Japan Center for Economic Research,

un think-tank privato, sostiene però che (limitandosi a seppellire la centrale sotto un sarcofago di cemento) i costi potrebbero aggirarsi tra 315 e i 728 miliardi di dollari (per risolvere anche tutti gli aspetti collaterali), di cui 474 miliardi sarebbero assorbiti dal decommissioning della centrale e dal trattamento e smaltimento delle acque radioattive **(30)**.

La situazione in Giappone dal punto di vista elettrico è diventata molto critica e il paese ha dovuto ricorrere a decisioni gravi e imprevedute. Dopo l'arresto iniziale di tutti gli impianti nucleari, alcuni sono stati chiusi in

Japan's net electricity generation by fuel, 2000-2017  
terawatthours (TWh)

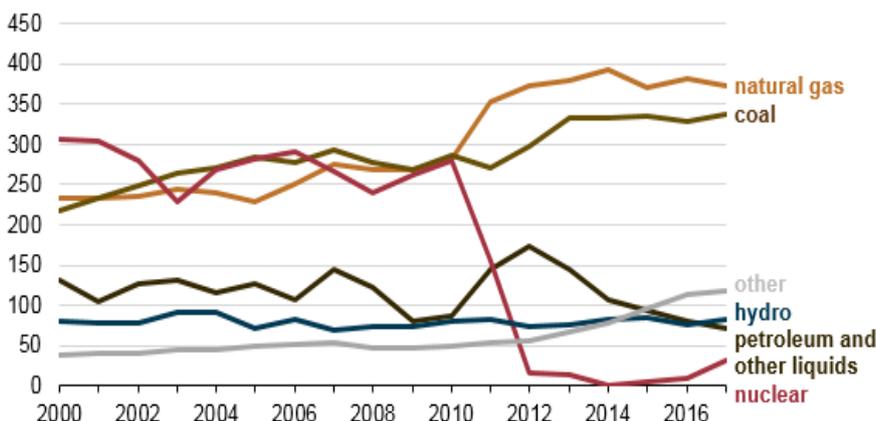


fig. 34

via definitiva. La mancata produzione nucleare è stata sostituita aumentando le importazioni di carbone e di gas per il funzionamento delle centrali termoelettriche. Attualmente risultano teoricamente operativi 37 reattori. I primi due sono stati riavviati in agosto e ottobre 2015, mentre altri sette sono stati riavviati successivamente. 17 reattori sono in attesa di essere autorizzati a ripartire. Sui

rimanenti la discussione è aperta tanto che proprio di recente è stata decisa la chiusura definitiva dei 4 reattori della centrale di Fukushima Daini, che si trova a 12 chilometri da quella in cui si verificò l'incidente. In questo modo il Giappone resta con soli 33 dei 54 reattori nucleari funzionanti prima del 2011 e il contributo dell'energia elettronucleare al sistema energetico giapponese da sostanziale è diventato marginale (fig. 34).

Il permanere di una situazione di grande incertezza e di difficoltà in Giappone è dovuto alla sfiducia che la popolazione nutre ora sulla capacità del sistema di mantenere sotto controllo la tecnologia elettronucleare. La fiducia è stata messa definitivamente in discussione dalla impossibilità di riparare i guasti dell'incidente e dagli enormi costi che il paese sta sostenendo per limitarli.

Sono in molti a sostenere che Fukushima abbia determinato una crisi pressoché irrimediabile dell'industria elettronucleare. Potrebbe non essere così. Ma da tempo il settore è appesantito da numerosi elementi che tengono lontani i grandi investitori privati e suscitano forti timori nelle popolazioni. L'interesse che persiste per questa tecnologia appare legato a interessi e obiettivi di carattere militare.

Qualcuno si spinge a spiegarne la necessità, più ideologica che reale, di trovare soluzione al declino del petrolio "convenzionale", quello "facile" a basso prezzo **(31)**. In effetti la carenza di questo greggio pregiato farà sentire le sue dirette conseguenze più nel settore dei carburanti e delle molecole indispensabili alla realizzazione di prodotti (chimica, plastiche, fertilizzanti, tessuti, ecc.) piuttosto che in quello della produzione di elettricità. In questo ambito carbone e gas pesano molto più del petrolio.

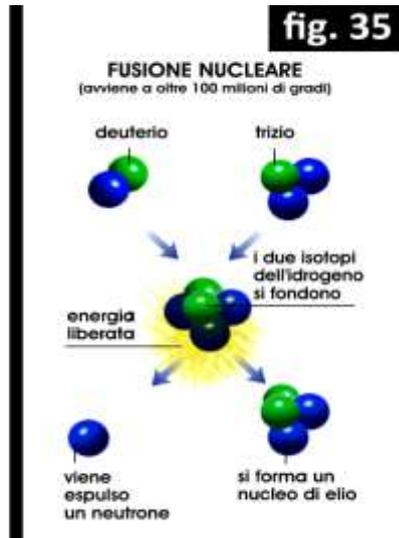
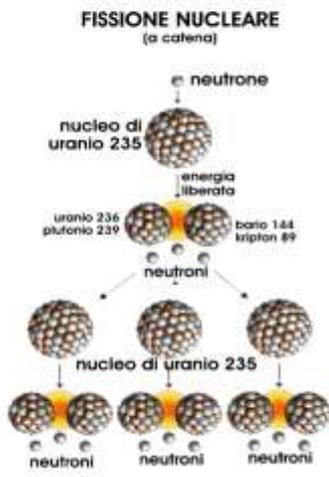
Altri stanno sostenendo che la tecnologia elettronucleare potrebbe essere la più efficace per limitare la crescita del global warming sostituendosi allo sviluppo delle energie rinnovabili, ma come abbiamo visto in precedenza il beneficio sarebbe relativo e gli aspetti negativi e pericolosi, che abbiamo appena presentati, ne intralciano decisamente lo sviluppo.

Per alcuni serissimi motivi (rifiuto sociale, costi di costruzione troppo elevati, costi di dismissione e di stoccaggio delle scorie sconosciuti e indefinibili, sicuramente ben più alti del previsto, elevata pericolosità in caso d'incidenti, mancanza di siti per la conservazione "eterna" delle scorie, disponibilità limitate di uranio minerale) la costruzione di nuovi impianti si configurava anche prima dell'incidente di Fukushima come quasi impercorribile: una non-soluzione, insomma. Successivamente il quadro si è ulteriormente aggravato: ora questo tipo di tecnologia risulta totalmente fuori mercato e il suo limitato sviluppo dipende dalle convenienze militari o politiche degli Stati che ne assumono direttamente tutti gli oneri.

È il caso di ricordare, infine, che, come sta succedendo per Chernobyl e Fukushima, i danni presenti e futuri degli incidenti più gravi ricadono da sempre solo sulla collettività.

## IL VELLO D'ORO: LA FUSIONE

Tutti gli impianti elettronucleari esistenti utilizzano il processo di fissione che viene avviato usando l'Uranio 235 o qualche altro elemento, che talvolta trae origine proprio dal processo stesso.



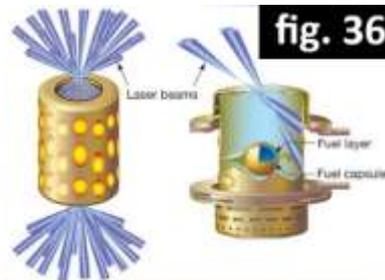
La fusione è invece un processo completamente diverso (fig. 35), uno dei più comuni presenti nell'universo perché si verifica spontaneamente da miliardi di anni nel sole e nelle stelle. Per attivarlo artificialmente bisogna riuscire a vincere la repulsione tra due nuclei e farli fondere tra loro. L'insieme dei prodotti che si originano in entrambi i processi (fissione o fusione) ha una massa inferiore a quella degli elementi da cui si parte (nucleo di uranio per la fissione e isotopi dell'idrogeno per la fusione). La massa mancante si trasforma in energia in base alla formula  $E = mc^2$  (dove "c" è la

26

velocità della luce) ed è questo l'obiettivo principale a cui puntano entrambe le tecnologie ideate dall'uomo.

Il processo di fissione, com'è noto, è ormai ben controllato da più di mezzo secolo.

Ben diversa è la situazione del processo di fusione poiché sulla Terra non esistono le condizioni naturali necessarie affinché esso si verifichi in modo spontaneo o lo si possa realizzare con relativa facilità. Una delle condizioni estreme indispensabili perché la fusione si realizzi è rappresentata da una temperatura superiore ai 100 milioni di gradi. Da qualche decennio la ricerca per ottenere la fusione segue due diverse strade, quelle del confinamento inerziale e magnetico.



### Confinamento inerziale

In questa direzione si muovono diversi progetti di ricerca, il più importante dei quali è il NIF (National Ignition Facility) nel Lawrence Livermore National Laboratory in California (fig. 36).

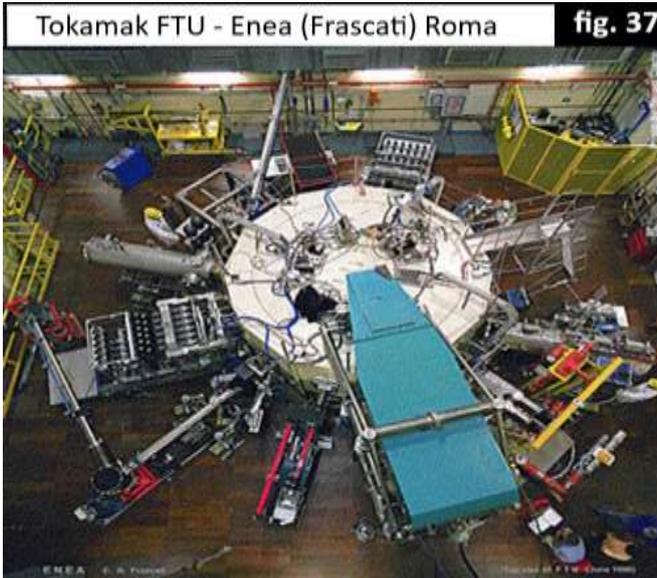
Tutta l'energia di 192 raggi laser del NIF è diretta all'interno di un cilindro d'oro chiamato Hohlraum, che ha le dimensioni di un centesimo di dollaro. Una minuscola capsula all'interno dell'Hohlraum contiene atomi di deuterio (idrogeno con un neutrone) e trizio (idrogeno con due neutroni) che servono per alimentare il processo di

accensione. La compressione dei raggi laser di grande potenza determina l'innesco di una microesplosione con la quale il deuterio e il trizio si saldano e danno vita a un nucleo di elio e a un elettrone. Un flusso continuo di energia è teoricamente ricavabile dalla ripetizione in successione di innumerevoli microesplosioni come quella descritta. Il processo iniziale di fusione è stato realizzato più volte in passato con grande dispendio energetico. Il 28 settembre 2013 qualcuno aveva festeggiato il raggiungimento di una produzione, seppur minima, di energia maggiore di quella impiegata per avviare il processo, ma successivi approfondimenti hanno escluso questo risultato. Resta quindi aperto il problema di arrivare al guadagno energetico significativo, controllarlo e costruire una macchina che riesca a riprodurre l'ignizione in

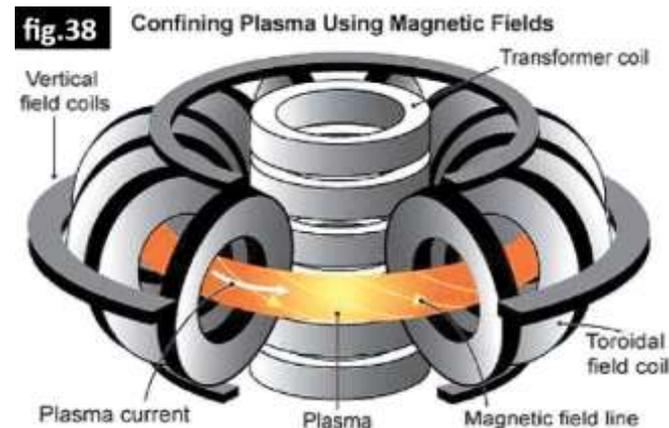


sequenza continua, per mesi, o meglio anni, all'interno di una struttura da cui sia possibile estrarre l'energia prodotta (sotto forma di calore) e produrre con quest'ultima l'energia elettrica da mettere in rete.

### Confinamento magnetico



Numerosi studi e prove sono stati fatti in passato e sono in corso in tutto il mondo (Italia compresa), su impianti sperimentali tipo "tokamak" (fig.37). In questo caso, all'interno di una grossa struttura toroidale (una "ciambella" vuota – fig. 38), una miscela di deuterio e di trizio viene riscaldata con impulsi radio e fasci di particelle fino a separare gli elettroni dai nuclei, trasformando il gas in plasma. Il plasma, sottoposto a enormi campi magnetici e tenuto confinato in una regione dello spazio, assume un'altissima energia cinetica riscaldandosi a temperature superiori ai 100 milioni di gradi Celsius (quasi una decina di volte la temperatura presente al centro del sole). I nuclei di deuterio e di trizio si fondono dando origine a un nucleo di elio e a un neutrone, perdendo una parte della massa che si trasforma in energia.



Il calore, così originato, verrebbe utilizzato per trasformare acqua in vapore, azionare una turbina e produrre elettricità come in una normale centrale termoelettrica.

A partire dai risultati ottenuti, nei primi anni '90 si mise a punto il progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), una macchina che, dopo un sostanziale ridimensionamento progettuale, si sta costruendo a Cadarache (F) (fig. 39).

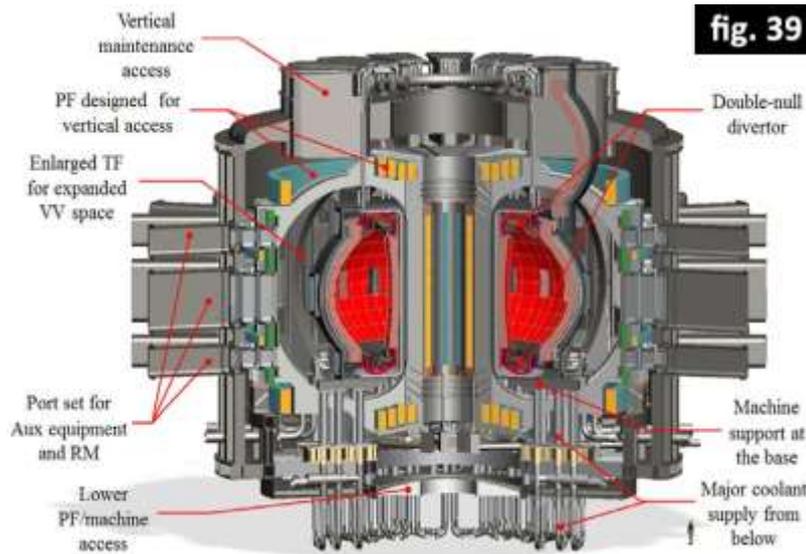
La prima fase, esclusivamente progettuale, che puntava a realizzare un vero e proprio reattore in cui l'ignizione sarebbe stata in grado di autosostenersi escludendo contributi energetici esterni, si concluse nel 1998, ma il costo previsto fu considerato troppo elevato. Si decise di ridimensionare il progetto e ripiegare su un dispositivo con obiettivi più limitati (l'attuale ITER in fase di costruzione), pensato come impianto sperimentale e non più per produrre energia. Dopo l'avvio diverse difficoltà hanno rallentato i lavori mentre i continui ritardi contribuivano ad aumentare il costo che, dai 5 miliardi di euro iniziali, è ormai arrivato a superare i 20 miliardi.

In aggiunta alle notevoli criticità legate alla elevatissima complessità tecnologica, l'aspetto organizzativo presenta difficoltà di livello analogo, se non maggiore. Il dispositivo è frutto di accordi politici tra 35 governi, con molteplici livelli decisionali, e i "pezzi" vengono forniti dai partner dei diversi paesi, attraverso proprie agenzie che li commissionano alle varie industrie. L'assemblaggio incontra inevitabilmente problemi e complicazioni.

Assemblare oltre un milione di componenti (dieci milioni di parti), costruite in fabbriche sparse in tutto il mondo, costituisce di per sé una enorme sfida logistica e ingegneristica.

I lavori, iniziati nel 2007, hanno per prima cosa realizzato una piattaforma di 42 ettari, su cui sono in via di completamento, oltre al reattore e all'edificio che lo contiene, 39 edifici scientifici e aree dedicate a ospitare gli esperimenti. Avrebbero dovuto concludersi nel 2016, mala possibilità di avviare gli esperimenti è stata, per ora, posticipata al 2025.

Nel 2019 la condizione dell'impianto è quella che si vede nelle foto (fig. 40). Quando ITER sarà completato, dimostrerà di saper produrre energia termica (non elettrica) per qualche decina di secondi e sarà



**fig. 39**

comunque un prototipo adatto a ripetere sperimentalmente per alcuni anni la fattibilità della fusione. Anche allora, pur se tutto andrà per il meglio, saremo lontanissimi dalla meta. Bisognerà poi costruire una centrale elettrica dimostrativa (DEMO) in grado di essere attivata in continuo da un "motore" derivato da ITER e verificarne la tenuta strutturale nel tempo e la competitività economica.

Tra gli esperimenti che nei vari paesi si stanno effettuando nel campo della ricerca per la fusione nucleare, merita di essere ricordato che,

presso l'EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) a Hefei (Cina), nei primi mesi del 2018 il plasma è stato portato a 100 milioni di gradi Celsius.

Non è dato sapere quale delle due vie attualmente seguite dalla ricerca nel campo della fusione avrà



**fig. 40**

il miglior successo. E se si arriverà al successo.

Di sicuro sembra che l'obiettivo perseguito si collochi su scale temporali non congruenti, se confrontate con il declino già avviato di molte risorse, in particolare del petrolio convenzionale, e con gli scenari a medio termine che stanno mostrando l'esistenza ineludibile di molti "limiti", capaci di determinare profondi cambiamenti nella vita della società umana e nella biosfera. Né pare che da questo versante ci si possa attendere, con la tempistica necessaria, un contributo a rallentare l'aumento della temperatura della Terra dovuta all'incremento dell'effetto serra.

## CONSIDERAZIONI DELL'AUTORE

Avvertivo da tempo il bisogno di organizzare le mie idee sulla fonte elettronucleare.

Ho cercato di sviluppare l'analisi con un atteggiamento, per quanto possibile, "neutro", attingendo a fonti di vario orientamento, senza trascurare alcuno degli aspetti che, su questo terreno, assumono considerevole importanza.

Inizialmente non perseguivo alcun disegno divulgativo ma, nel proseguire gli approfondimenti, mi sono reso

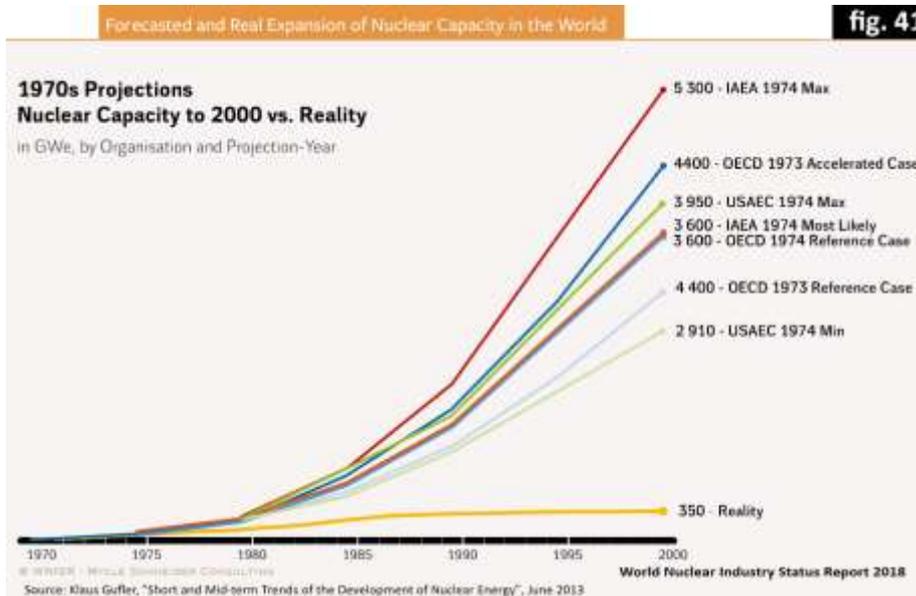


fig. 41

conto che iniziava a comporsi un testo potenzialmente utile anche ad altri.

Ritengo che alla fine emerga un panorama sufficientemente chiaro affinché chiunque, libero da atteggiamenti aprioristici, possa trarre delle personali conclusioni.

Io le ho tratte e le riassume con una semplice frase: **immaginare un nuovo significativo sviluppo della fonte nucleare senza valutare attentamente, a**

**fronte dei possibili benefici, i reali pericoli, l'insieme dei costi – attuali e futuri - e gli scenari dell'uranio, è una ipotesi particolarmente azzardata e molto pericolosa.**

Sembra proprio di assistere alla **inarrestabile lenta agonia di un sogno che, nel pieno della seconda metà del secolo scorso, aveva illuso l'umanità di aver trovata la soluzione definitiva alle proprie necessità energetiche** (fig. 41).

Mestre, 11 ottobre 2019

**Note:**

- 1) i dati di questo paragrafo sono ricavati da "BP-stats-review-2019-all-data.xlsx"  
(<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>)
- 2) Il tep è una unità di misura dell'energia. 1 tep è l'energia equivalente a quella che si ottiene bruciando una tonnellata di petrolio. 1 Mtep = 1 milione di tep. Il Wh è un'altra unità di misura dell'energia. 1 Wh è l'energia complessiva fornita qualora una potenza di un watt (W) sia mantenuta per un'ora (h). 1 TWh = 1000 miliardi di Wh. Tra Wh e tep sussiste la seguente relazione: 1 tep = 11.630.000 Wh.
- 3) J. P. Smith, *President to Ask Congress to Stop Breeder Reactors*, Washington Post, 7 Aprile 1977,  
<https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1977/04/07/president-to-ask-congress-to-stop-breeder-reactors/445d8a02-4290-48a0-9a18-a9a700bdb02d/>
- 4) *Risks of Civilian Plutonium Programs*, Nuclear Threat Initiative, 1 Aprile 2004  
<https://www.nti.org/analysis/articles/risks-civilian-plutonium-programs/>
- 5) Periodico mensile dell'Archivio Disarmo – anno 13 – maggio 2000; Il trattato di non proliferazione nucleare e la conferenza di riesame del 2000  
<http://www.archiviodisarmo.it/index.php/it/2013-05-08-17-44-50/sistema-informativo-a-schede-sis/sistema-a-schede/finish/67/158>
- 6) Si trova evidenza di questo cambiamento in una delle videate proposta dal Global Nuclear Power Database (<https://thebulletin.org/global-nuclear-power-database>) dove viene mostrato il crollo delle costruzioni negli USA – *The United States was particularly affected by construction cancellations. Forty units were abandoned between 1977 and 1989.*
- 7) Réseau Sortir du nucléaire – La cuve – Une déféctuosité majeure au coeur de l'EPR – Une anomalie "très sérieuse" selon le president de l'ASN- <https://www.sortirdunucleaire.org/La-cuve-Une-defectuosite-majeure-au-coeur-de-l>
- 8) Autorité de Sureté Nucléaire – l'ASN autorise la mise en service et utilisasio de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sous certaines conditions - <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Cuve-du-reacteur-EPR-de-Flamanville-mise-en-service-sous-conditions>
- 9) Lifegate – Nucleare, nuovo stop al cantiere infinito del reattore francese di Flamanville - <https://www.lifegate.it/persona/stile-di-vita/nucleare-reattore-flamanville-asn>
- 10) Réseau Sortir du nucléaire – The Roussely Report: saving the French nuclear industry with outrageous measures - <https://www.sortirdunucleaire.org/The-Roussely-Report-saving-the>  
WISE (World Information Service on Energy) – Roussely report: saving French nuclear industry with outrgeous measures - <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/715/roussely-report-saving-french-nuclear-industry-outrageous-measures>
- 11) L'EPR de Flamanville ne sera pas en service avant 2022 : visualisez l'explosion du coût et de la durée de son chantier Par Pierre Breteau - 24 juin 2019 [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/24/epr-de-flamanville-visualisez-comment-le-cout-et-la-duree-du-chantier-ont-triple-depuis-2007\\_5480745\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/24/epr-de-flamanville-visualisez-comment-le-cout-et-la-duree-du-chantier-ont-triple-depuis-2007_5480745_4355770.html)
- 12) Art. 26. Legge 23 luglio 2009, n. 99 "Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia":
- 13) Michael Dittmar, *The end of cheap uranium*, Science of The Total Environment - Volumes 461–462, 1 September 2013, Pages 792-798, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.035>

- 14) L'U235, l'isotopo fissile dell'uranio (praticamente l'unico fissile in natura), è presente in bassa percentuale (circa 0,7%) nel minerale, quasi completamente composto da U238. Bisogna portare l'U235 a concentrazioni tra il 70 e il 90% per le bombe mentre basta arrivare al 5-6% per il combustibile a uso civile.
- 15) Power Technology – Maine Yankee USA Nuclear Power Station Project - <https://www.power-technology.com/projects/maine/>
- 16) United States Nuclear Regulatory Commission - Financial Assurance for Decommissioning - July 25, 2019 <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning/finan-assur.html>
- 17) Nel 2019 la Wood si è aggiudicata una commessa da 1 miliardo di dollari per fungere da partner di progettazione e ingegneria per i prossimi 20 anni. Wood è una delle quattro aziende selezionate in base al nuovo modello di acquisizione di Program and Project Partners (PPP) di Sellafield. Le altre sono: Kellogg Brown and Root (integrazione), Morgan Sindall Infrastruttura (gestione delle costruzioni civili) e Doosan Babcock (gestione delle costruzioni di processo). Insieme, realizzeranno progetti con un valore complessivo fino a 6 miliardi di dollari nel sito di Sellafield.
- 18) Per le centrali termo-elettriche a combustibili fossili e per quelle termo-elettro-nucleari, la potenza espressa in MW va intesa solitamente come potenza elettrica effettiva. Talvolta se si vuole essere più espliciti si distingue il Megawatt elettrico (MWe) e il Megawatt termico (MWt). Sono entrambe unità di misura di potenza, ma differiscono notevolmente in valore sulla base del rendimento medio della singola centrale. In altre parole, una centrale termoelettrica da 2.000 Megawatt di potenza termica nominale (MWt), con un rendimento (medio) del 50%, rilascerà in rete circa 1.000 Megawatt di potenza elettrica effettiva (MWe).
- 19) [https://www.tvsvizzera.it/tvs/muehleberg--berna- tra-tre-mesi-sar%C3%A0-spenta-la-pi%C3%B9-vecchia-centrale-nucleare-svizzera/45243642?utm\\_content=o&utm\\_campaign=own-posts&utm\\_medium=socialflow&utm\\_source=facebook](https://www.tvsvizzera.it/tvs/muehleberg--berna- tra-tre-mesi-sar%C3%A0-spenta-la-pi%C3%B9-vecchia-centrale-nucleare-svizzera/45243642?utm_content=o&utm_campaign=own-posts&utm_medium=socialflow&utm_source=facebook)
- 20) [Morris A.P. et al. 2004, Journal Structural Geology 26, 9, 1707-1725. doi:10.1016/j.jsg.2003.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.12.005)
- 21) <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.882664>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Waste\\_Isolation\\_Pilot\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Waste_Isolation_Pilot_Plant)  
[http://www.sric.org/nuclear/docs/WIPP\\_Leak\\_04152014.pdf](http://www.sric.org/nuclear/docs/WIPP_Leak_04152014.pdf)
- 22) <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2017/01/10/wipp-nuclear-waste-repository-reopens-for-business/#>
- 23) ISIN (Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione) - [https://www.isinucleare.it/sites/default/files/contenuto\\_redazione\\_isin/inventario\\_isin\\_al\\_dicembre\\_2017.pdf](https://www.isinucleare.it/sites/default/files/contenuto_redazione_isin/inventario_isin_al_dicembre_2017.pdf)
- 24) per le tecnologie di generazione elettrica, in relazione ai gas serra, il dato viene espresso in “grammi di biossido di carbonio equivalente” emessi per ogni chilowattora di energia prodotta
- 25) Energy Policy 36 (2008) 2940–295 - Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey - Benjamin K. Sovacool - [https://www.academia.edu/2639807/Valuing\\_the\\_greenhouse\\_gas\\_emissions\\_from\\_nuclear\\_power\\_A\\_critical\\_survey](https://www.academia.edu/2639807/Valuing_the_greenhouse_gas_emissions_from_nuclear_power_A_critical_survey)

- 26) Nuclear power, energy security and CO2 emission – revised draft - Jan Willem Storm van Leeuwen (independent consultant - Ceedata, Chaam, May 2012) - <https://www.stormsmith.nl/Media/downloads/nuclearEsecurCO2.pdf>
- 27) pag. 189 di “Consumo interno lordo di energia in fonti primarie in Italia dal 1963 al 201” – Terna: [https://download.terna.it/terna/8-DATI%20STORICI\\_8d736bdf116e207.pdf](https://download.terna.it/terna/8-DATI%20STORICI_8d736bdf116e207.pdf)
- 28) WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – World Uranium Mining Production - <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- 29) WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – Uranium Enrichment - [https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx?xid=PS\\_smithsonian](https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx?xid=PS_smithsonian)
- 30) Japan Center for Economic Research – Accident Cleanup Csts Rising to 35-80 Trillion Yen in 40 Years (2019/07/03) - <https://www.jcer.or.jp/english/accident-cleanup-costs-rising-to-35-80-trillion-yen-in-40-years>  
The Asahi Shimbun – thin tank puts cost to address nuke disaster up to 81 trillion yen –(10 March 2019) - <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201903100044.html>
- 31) Risorse Economia Ambiente – Il picco in Italia: 15 anni e non sentirli – Luca Pardi (21 gennaio 2018)- <https://aspoitalia.wordpress.com/2018/01/21/il-picco-in-italia-15-anni-e-non-sentirli/>  
Risorse Economia Ambiente – Quando raggiungeremo il picco globale dopo quello del petrolio convenzionale? – Luca Pardi (2° settembre 2018)- <https://aspoitalia.wordpress.com/2018/09/20/quando-raggiungeremo-il-picco-globale-dopo-quello-del-petrolio-convenzionale/>