

COMMISSIONI RIUNITE
AMBIENTE, TERRITORIO E LAVORI PUBBLICI (VIII)
ATTIVITÀ PRODUTTIVE, COMMERCIO E TURISMO (X)

RESOCONTO STENOGRAFICO

INDAGINE CONOSCITIVA

2.

SEDUTA DI MARTEDÌ 19 MARZO 2024

PRESIDENZA DEL PRESIDENTE DELLA VIII COMMISSIONE **MAURO ROTELLI**

INDICE

	PAG.		PAG.
Sulla pubblicità dei lavori:		Colombo Beatriz (FDI)	6
Rotelli Mauro, <i>presidente</i>	3	Evi Eleonora (AVS)	6
INDAGINE CONOSCITIVA SUL RUOLO DELL'ENERGIA NUCLEARE NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA E NEL PROCESSO DI DECARBONIZZAZIONE		Pavanelli Emma (M5S)	5
Audizione di Angelo Tartaglia, già professore di fisica del Politecnico di Torino:		Tartaglia Angelo, <i>già professore di fisica del Politecnico di Torino</i>	3, 6
Rotelli Mauro, <i>presidente</i>	3, 5, 6, 7	ALLEGATO: Documentazione depositata dal professor Angelo Tartaglia	8

N. B. Sigle dei gruppi parlamentari: Fratelli d'Italia: FdI; Partito Democratico - Italia Democratica e Progressista: PD-IDP; Lega - Salvini Premier: Lega; MoVimento 5 Stelle: M5S; Forza Italia - Berlusconi Presidente - PPE: FI-PPE; Azione - Popolari europeisti riformatori - Renew Europe: AZ-PER-RE; Alleanza Verdi e Sinistra: AVS; Noi Moderati (Noi con L'Italia, Coraggio Italia, UDC e Italia al Centro) - MAIE: NM(N-C-U-I)-M; Italia Viva - il Centro - Renew Europe: IV-C-RE; Misto: Misto; Misto-Minoranze Linguistiche: Misto-Min.Ling.; Misto+Europa: Misto+E.

PAGINA BIANCA

PRESIDENZA DEL PRESIDENTE
DELLA VIII COMMISSIONE MAURO
ROTELLI

La seduta comincia alle 13.40.

Sulla pubblicità dei lavori.

PRESIDENTE. Avverto che la pubblicità dei lavori della seduta odierna sarà assicurata anche mediante la resocontazione stenografica e la trasmissione attraverso la *web-tv* della Camera dei deputati.

Audizione di Angelo Tartaglia, già professore di fisica del Politecnico di Torino.

PRESIDENTE. L'ordine del giorno reca, ai sensi dell'articolo 144, comma 1, del Regolamento, l'audizione di Angelo Tartaglia, già professore di fisica del Politecnico di Torino, nell'ambito dell'indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione.

Ringrazio il professor Tartaglia per la partecipazione ai nostri lavori e gli cedo la parola, pregandolo di voler sintetizzare e non dare lettura del documento eventualmente trasmesso alle Commissioni, che sarà comunque allegato al resoconto stenografico della seduta odierna.

ANGELO TARTAGLIA, *già professore di fisica del Politecnico di Torino*. Buongiorno. Entro direttamente nel merito e comincio con un'osservazione relativa ai tempi a disposizione per questa transizione energetica. Si tratta di evitare o di prevenire un collasso del sistema climatico e non semplicemente di contrastare una tendenza al peggioramento, in cui siamo già immersi.

Il tempo caratteristico, in base alla dinamica dei sistemi, per un collasso di questo genere è dell'ordine della decina d'anni, per cui i provvedimenti che si assumono devono essere efficaci in tempi di questo genere.

Riguardo al nucleare, la prima osservazione è che la realizzazione di una centrale *ex novo*, sulla base di dati a posteriori, non a bilancio preventivo, per quanto riguarda le centrali di taglia maggiore, è dell'ordine della quindicina d'anni, le ultime che sono state realizzate, e il costo unitario per ogni centrale è intorno ai 12 miliardi di euro. In realtà, ogni centrale fa storia a sé, quindi valori più alti e valori più bassi, ma gli ordini di grandezza sono questi.

Per riuscire a far diventare significativo il contributo del nucleare parlando del bilancio energetico dell'Italia, ci vorrebbero qualche decina di centrali, ciascuna delle quali con questa taglia, ciascuna delle quali con questi tempi di costruzione e con questi costi complessivi.

Ultimamente si è però parlato molto di piccoli reattori. I piccoli reattori sono una terminologia che, in realtà, si rifà a centrali e reattori che erano tipici degli anni Sessanta e Settanta. Mentre per i reattori tipici attuali si va oltre il gigawatt di potenza, i piccoli reattori sono dell'ordine del centinaio di megawatt, quindi una decina di volte più piccoli.

La prima osservazione è che, andando a reattori piccoli, per avere un contributo significativo, si passerebbe dalle decine alle centinaia di reattori necessari, tutto sempre con riferimento al decennio entro cui realizzarli.

Si è parlato moltissimo anche di piccolissimi reattori, in particolare di SMR (*small modular reactors*), piccoli reattori modulari. Anche in questo caso non è una novità,

perché l'idea dei reattori modulari, già sviluppata da tempo, aveva la finalità di consentire di regolare l'energia ricavata dalle centrali nucleari, in quanto un reattore nucleare non consente la modularità della propria produzione in relazione all'andamento della domanda. Non è possibile, perché un reattore o si spegne o si accende. Nel caso della modularità l'idea era quella di avere tante piccole unità in maniera tale che, spegnendo o accendendo le singole unità, si ottenesse di fatto una modulazione della potenza complessiva.

Chiaramente, scendendo a reattori di quella taglia, avremmo bisogno di migliaia di unità, se vogliamo arrivare a dare un apporto significativo al *mix* energetico nazionale.

Un'altra idea che è circolata, almeno a livello giornalistico, è quella di poter comporre delle centrali sulla base delle esigenze, come fossero dei « Lego ». Non funziona così, perché in una centrale non c'è soltanto il nocciolo della centrale, ma c'è tutto il resto. Il nocciolo è il luogo dove avviene la fissione nucleare. Può essere piccolo o grande, dipende, ma intorno al nocciolo ci vuole un sistema di schermatura, dispositivi di sicurezza, circuiti di raffreddamento di emergenza, circuiti di raffreddamento ordinario, circuiti tali da permettere di estrarre l'energia da convertire in energia elettrica e via dicendo. Tutto questo, che è la centrale intorno al nocciolo, non si smonta e rimonta, come qualcuno apparentemente e ingenuamente potrebbe pensare, con un'idea di piccoli moduli che vanno di qua e di là.

Un'altra considerazione è che, se si arriva alle dimensioni di taglie piccole, quindi a numeri molto grandi di reattori, bisogna abbinare tutto ciò a un sistema di trasporto delicato, dal momento che bisogna, ovviamente, alimentare i reattori con materiale fissile fresco, facendolo venire dai luoghi in cui l'uranio viene arricchito, luoghi che non sono dovunque, in quanto l'arricchimento dell'uranio, avendo valenza strategico-militare, è fatto presso Paesi che sono « politicamente affidabili », a seconda dei campi in cui uno si ritrova. Quindi, c'è un flusso in arrivo da questi luoghi di materiali che

sono in entrata debolmente radioattivi (uranio 238), con tempi di dimezzamento dell'ordine di 4,5 miliardi di anni. Quindi, vi è poca radioattività. Poi, però, c'è un flusso in uscita da questi reattori, che è quello delle cosiddette « scorie », le quali sono ad alta o altissima intensità e contengono ancora una grande quantità di materiale fissile.

Se immagino centinaia di reattori o, peggio ancora, migliaia di reattori, devo immaginare una rete di trasporto con trasporti di questo genere. Nel caso delle grandi centrali il trasporto c'è lo stesso, ma è eccezionale, con tutte le sicurezze e i controlli. Più ne faccio e meno il tutto riesce a essere controllato.

Per quanto riguarda gli effetti ambientali globali, è chiaro che, durante il funzionamento, la fissione nucleare non libera gas serra, quindi non impatta sulla composizione diretta dell'atmosfera. In realtà, l'analisi dell'impatto dal punto di vista climatico va fatta — questo vale per tutte le fonti, non solo per il nucleare — secondo il ciclo di vita, ovvero sia partendo dalla materia prima, realizzando l'impianto e, finito l'impianto, smantellando l'impianto. Nel caso del nucleare c'è in partenza una miniera, o più miniere, perché in generale facciamo riferimento all'uranio, quindi globalmente emissioni anche climalteranti ci sono. Chiaramente bisogna valutare caso per caso. Questo è uno dei problemi che vanno affrontati.

L'altro aspetto, che è risaputo, è che come conseguenza collaterale all'utilizzo di questo tipo di energia c'è quella delle scorie radioattive, di cui dobbiamo sapere cosa fare. Preciso subito che il termine « scorie » va chiarito, perché a volte si sente dire che le scorie si possono ridurre o trattare. Ebbene, un conto sono i prodotti di fissione, altra cosa sono le scorie nucleari. I prodotti di fissione sono dovuti al fenomeno fisico, che è la fissione. Questi, se c'è la fissione, sono necessariamente presenti. Non esiste nessun modo possibile per non avere le scorie se si fa la fissione. Se io rompo una cosa in due, poi ho i due pezzi, punto.

Le scorie di prodotto di fissione di questo genere sono svariate decine di isotopi radioattivi, ognuno con tempi di decadimento diversi. Quindi, è una miscela, quella che viene fuori, che ha una pericolosità a lunga durata. Ma questi sono soltanto i prodotti della fissione. In realtà, le scorie contengono anche tutto ciò che sta intorno al materiale fissile con cui si è realizzata una barra dentro un reattore o con cui si è composta la miscela fluida che serve come luogo in cui si produce la fissione. Tutto quello che sta intorno a sua volta è, anch'esso, radioattivo. In parte, lo era già prima, a bassa radioattività, quando si tratta di uranio 238, ma in parte lo diviene dopo, assorbendo i neutroni emessi dalla fissione. L'assorbimento dei neutroni emessi dalla fissione da parte dell'uranio 238 dà luogo a una serie rapida di trasformazioni, che finisce con il plutonio 239, che è, anch'esso, radioattivo, oltre a essere tossico, ed è, anch'esso, fissile, con un tempo di dimezzamento della radioattività dell'ordine dei 24.000 anni. Poi, ci sono gli altri materiali, il contenimento della guaina, i materiali usati all'interno del reattore per la moderazione e altre cose di questo genere. Tutto questo insieme costituisce le scorie.

Tra le cose che si sono lette o dette trovo dichiarazioni secondo cui con i nuovi reattori in qualche modo — usando, peraltro, un termine improprio — si potranno bruciare le scorie. In sostanza, si pensa di poter abbattere la pericolosità delle scorie. Attenzione, anche questo non è reale. Se io sono in laboratorio, ho un campione davanti a me di un isotopo radioattivo ben definito e lo bombardo con un fascio di neutroni, possibilmente monocromatici, vale a dire di lunghezza d'onda uguale per tutti e di velocità uguale per tutti, scelto appositamente, io posso indurre trasformazioni, che ho previsto, e ottenere il passaggio da una emivita molto lunga a una molto più breve. Se, però, ho di fronte una miscela in cui dentro ci sono decine e decine di isotopi diversi, probabilità di assorbimento, sezioni d'urto molto diverse, ciascuno di loro è anche radioattivo, emette particelle che vengono assorbite dagli altri, che cosa succede? Io non riesco più di tanto a gestirlo.

Se tutto va bene, riesco a cambiare l'unità di misura dei tempi di pericolosità dai millenni ai secoli. Quindi, il problema come tale rimane.

Nessuno di questi problemi, ovviamente, è presente se uso fonti rinnovabili. I tempi di realizzazione di un impianto sono molto più brevi, i costi unitari sono molto più bassi e gli impatti di lunghissimo periodo non ci sono. Pertanto, se ci si vuole muovere verso la transizione energetica, bisogna tener conto di tutto questo e tener conto soprattutto del fatto che non esiste nessuna tecnologia che possa avere effetti miracolosi, se non mettiamo anche un qualche controllo e un razionale utilizzo dei flussi di energia, stabilizzandoli.

PRESIDENTE. La ringrazio, professore Tartaglia, anche per i tempi.

Do la parola ai colleghi che intendono intervenire per porre quesiti o formulare osservazioni.

EMMA PAVANELLI. Ringrazio il professore Tartaglia. Credo che le sue parole siano state molto importanti, soprattutto nella conclusione, in quanto anche noi come Movimento 5 Stelle crediamo fortemente che la soluzione immediata in questo momento sia quella di velocizzare sulle energie rinnovabili.

Per quanto riguarda questi piccoli impianti, la ringrazio per i dati anche tecnici che ci ha fornito, che confermano quello che avevamo pensato perché, oltre alla pericolosità di tali impianti, lei ci ha parlato di una situazione critica dal punto di vista della sicurezza dei trasporti. Personalmente partirei addirittura dagli impianti stessi, perché sono pochissimi i produttori di questi impianti piccoli, che oggi sono maggiormente rappresentati dalla Russia, che ha una sorta di monopolio sia dal punto di vista dell'estrazione, della conversione e della produzione di questi piccoli impianti a livello globale, sia dal punto di vista della gestione delle scorie. Inoltre, sappiamo anche che c'è una questione di sicurezza di questi impianti, che fa sì che chi le produce sta *in loco* anche per controllarle.

Oggi, quindi, pensando anche alla situazione geopolitica, a cui anche lei ha accennato, credo che questo tipo di scelta non possa essere esattamente una garanzia per il nostro Paese dal punto di vista ambientale, di sicurezza nazionale e di dipendenza da Paesi esteri, al contrario, invece, delle energie rinnovabili, che ci consentono di essere molto più indipendenti.

Grazie.

BEATRIZ COLOMBO. Buongiorno e grazie, professor Tartaglia. Leggo qui che lei è stato docente di fisica al Politecnico di Torino. In questa sua audizione ho avuto modo di sentire come il nucleare crei solo problemi, stando a quello che lei ha appena enunciato. Ebbene, la domanda che mi facevo, visto che io non sono un'esperta come lei, è questa: gli altri Paesi dell'Unione europea che utilizzano il nucleare come si comportano nella gestione delle scorie, visto che anche loro hanno a che fare con la transizione ecologica come noi?

ELEONORA EVI. Buonasera, professore Tartaglia. Grazie per il suo contributo.

Anch'io, come la collega Pavanelli, sottolineo il tema - e vorrei che lei ce lo sottolineasse a sua volta - dell'autonomia energetica e dell'indipendenza energetica, che un modello nucleare evidentemente non può portare con sé, dal momento che rimarremmo dipendenti dalle importazioni di materia prima.

La domanda che vorrei farle riguarda, in particolare, l'uso della risorsa idrica. In altri Paesi, penso alla Francia, tanti reattori nucleari sono stati fermati proprio a causa della siccità, dal momento che in mancanza d'acqua risultava impossibile procedere a un corretto raffreddamento dell'impianto. Davanti a una crisi climatica che avanza, nel nostro Paese in particolare con il tema della siccità sempre più forte, le chiedo come questo si possa conciliare con una scelta rispetto all'utilizzo del nucleare.

Grazie.

PRESIDENTE. Non essendovi ulteriori richieste di intervento da parte dei colleghi,

do la parola al professor Tartaglia per la replica.

ANGELO TARTAGLIA, già professore di fisica del Politecnico di Torino. Dico subito, riguardo al problema delle scorie, che dagli anni in cui è stato costruito il primo reattore ad oggi non è stata ancora trovata, in nessun luogo, una soluzione realmente definitiva. Formalmente ci sono due depositi al mondo denominati «definitivi», uno in Finlandia e uno in Francia, quello in Finlandia entrerà in funzione quest'anno, quello in Francia non è ancora entrato in funzione. Questo perché è difficilissimo riuscire a trovare un luogo in cui uno possa affermare che per i prossimi millenni non arriverà l'acqua a portare in giro sostanze radioattive e tale per cui non ci sia il rischio che altri esseri umani, magari un po' fuori di testa o semplicemente ignoranti, tra cinque secoli non arrivino a infilarsi lì.

Oggi le centrali nucleari sono il luogo a fianco al quale si trovano le scorie che sono state sviluppate durante la produzione dell'energia elettrica. Mi spiego. Di solito c'è una grande vasca in cui si immettono gli elementi esauriti, che sono molto radioattivi e liberano calore. Questi elementi - questo sarebbe previsto comunque - dovrebbero stazionare lì per mesi, massimo un anno, ma poi finiscono per rimanerci molto più a lungo. Ovviamente, trovandosi presso delle centrali, sono luoghi controllati e sorvegliati. Ma uno non può immaginare di avere questa soluzione come una soluzione reale che duri secoli, soprattutto se sono sulla superficie della terra. Tra l'altro, se pensiamo alla centrale di Zapozhzhia, in Ucraina, con la guerra in corso uno dei problemi potrebbe essere quello che a qualcuno fuori di testa venga in mente di bombardare il deposito di scorie presso la centrale. Comunque, al di là di quest'ultimo aspetto, oggi chi ha le centrali in casa fa questo.

Sono successe anche cose peggiori di queste. In Svizzera ci sono alcune centrali nucleari e loro fanno esattamente quello che vi ho detto. Tuttavia, in passato avevano cercato sul loro territorio un luogo adatto e non trovandolo per un po' di

tempo hanno cominciato a fare dei contratti con sistemi di trasporto, con tutti i crismi, che arrivavano fino all'Atlantico, dove c'erano delle navi su cui si caricava il materiale, con imprese che si occupavano di tutto e che dicevano « ci pensiamo noi ». Ovviamente quel « ci pensiamo noi » poteva anche significare che arrivavano a metà dell'Atlantico e affondavano il materiale, con i risultati che vi lascio immaginare. Noi adesso, quando mangiamo pesce, mangiamo plastica, ma anche isotopi diversi, derivanti da quello e da altri incidenti che ci sono stati.

La risposta, quindi, è che gli altri non hanno trovato nessuna soluzione. Noi abbiamo le scorie in casa delle centrali che hanno funzionato da noi. Infatti, c'è questa telenovela che non finisce mai: dove andiamo a fare il deposito? Abbiamo fatto delle ricerche geologiche, ci sono siti più adatti di altri, ma noi siamo un Paese densamente abitato e, per di più, con problemi di terremoti e cose del genere, per cui è veramente difficile trovare un sito, che dobbiamo trovare, e lo dobbiamo a chi viene dopo di noi. Questa è la situazione.

Per quanto riguarda il problema dell'acqua, questo è un tema molto importante, perché una centrale nucleare, anche quando la si spegne, o per manutenzione o per qualunque motivo, continua a produrre calore nel nocciolo, proprio perché c'è una radioattività molto alta, assorbita da quello che c'è intorno. Pertanto, si deve essere in grado di assicurare un raffreddamento per evitare che succeda quello che è successo a Cernobyl (per intenderci) anche quando la centrale

viene spenta. Questo vuol dire avere a disposizione grandi quantità di acqua. Infatti, le grandi centrali si trovano generalmente su corsi d'acqua o sul mare. Poi, bisogna vedere in che modo si usano quei flussi d'acqua perché non portino via radioattività (leggermente sì, ma non troppo), ma l'acqua ci deve essere.

Ricordo che un paio d'anni fa la Francia, in una fase di siccità ricorrente, si è trovata in condizione di dover spegnere alcuni reattori, proprio perché non c'era abbastanza acqua per garantirne il raffreddamento. Tornando alla guerra in Ucraina, uno dei problemi della centrale di Zaporizhzhia è il rischio che in tutte queste vicende si smettesse, per qualche motivo, di raffreddarla e che, quindi, questa esplodesse. L'incidente che è successo a Fukushima è derivato dal fatto che a un certo punto, dopo l'ondata e tutti i guai, si è bloccato il sistema di raffreddamento.

L'acqua, quindi, diventa vitale. Se uno non ha l'acqua e pensa di fare i reattori, ha sbagliato tutto, perché non se lo può permettere.

PRESIDENTE. Non essendoci altre richieste di intervento, ringrazio l'ospite intervenuto. Autorizzo la pubblicazione in allegato al resoconto stenografico della seduta odierna della documentazione consegnata dal professor Angelo Tartaglia (*vedi allegato*) e dichiaro conclusa l'audizione.

La seduta termina alle 14.

*Licenziato per la stampa
il 22 aprile 2024*

ALLEGATO

Energia nucleare, transizione energetica, decarbonizzazione

Angelo Tartaglia

- **Impatto climatico**. Il modo con cui fino ad ora in maniera prevalente ci si è procurati l'energia nelle forme utili per la vita e le attività economiche ha comportato, come noto, impatti globali sull'ecosistema terrestre che si manifestano, con una rapidità crescente, in forma di cambiamenti dell'assetto climatico globale, con conseguenze cui la biosfera e, in essa, le nostre società non riescono ad adattarsi in tempo utile. La prospettiva, in assenza di drastici interventi, è indicata dalla dinamica dei sistemi complessi come un brusco collasso (o riorganizzazione) del sistema climatico globale coinvolgente la circolazione atmosferica e la circolazione marina, e quindi anche il regime delle precipitazioni. La transizione energetica necessaria pone al primo posto l'obiettivo della decarbonizzazione, ovvero l'azzeramento delle emissioni climalteranti in atmosfera, e, nel contempo, quello della sostenibilità di processi produttivi e modalità di consumo, intendendosi per sostenibilità la capacità di un processo di continuare a svolgersi a lunghissimo termine senza generare effetti collaterali che compromettano le basi materiali stesse che consentono al processo di continuare.
- **Transizione energetica e sostenibilità** possono essere perseguite sul piano tecnologico, ma tale piano non è di per sé sufficiente, quale che sia la fonte di energia considerata, se contestualmente non si interviene anche sul sistema economico-produttivo e sugli stili di vita e di consumo in modo da renderli compatibili con vincoli fisici non negoziabili, quali le leggi di conservazione e quelle della termodinamica dei sistemi complessi.
- **Decarbonizzazione**. La fissione nucleare in sé non produce emissioni climalteranti durante il suo svolgimento, anche se, nel bilancio del carbonio occorre includere tutto il ciclo di vita della materia prima (generalmente uranio, ma potrebbe anche essere torio) che deve essere estratta da miniere, nonché il ciclo di vita della centrale, inclusa la costruzione e poi la dismissione. In questo caso un impatto climatico c'è comunque.
- **Tempi caratteristici**. I tempi entro i quali occorre dar vita ad una transizione energetica efficace per prevenire il collasso climatico sono ormai molto ristretti: dell'ordine del **decennio**. Il nucleare non può di conseguenza svolgere alcun ruolo rilevante per questa finalità in quanto la realizzazione di una nuova

centrale con potenze superiori al GW richiede, con valutazione a posteriori di quanto avvenuto per centrali recenti, **una quindicina d'anni**. Il costo **dell'investimento**, anche qui basandosi su dati a consuntivo, è dell'ordine della **dozzina di miliardi** di €. Considerando il nostro paese, per far sì che il nucleare svolgesse un ruolo sostanziale nell'approvvigionamento di energia elettrica occorrerebbero decine di reattori di taglia tipica delle centrali più recenti, ciascuno con tempi di costruzione e costi dell'ordine di quelli indicati.

- **Piccoli reattori**. Quando si parla di **piccoli reattori** in realtà ci si riferisce a potenze tipiche dei reattori degli anni '60 e '70 del secolo scorso: centinaia di MW. Perché questi arrivassero ad avere un ruolo importante nel mix energetico nazionale ne occorrerebbero alcune centinaia (fermi restando i tempi di realizzazione per ciascuno incongrui con quelli dell'emergenza climatica).
- **Piccoli reattori modulari (SMR)**. Si è ultimamente spesso scritto di piccoli reattori **modulari** e addirittura di microreattori. Anche in questo caso la taglia (potenza in decine di MW o meno) non è in sé una novità. Comunque, minore la taglia, maggiore il numero necessario: migliaia in questo caso. Quanto alla modularità, anche questa non è una novità. L'idea è stata sviluppata per ovviare ad un problema tipico dei reattori nucleari. La produzione di un reattore non è regolabile a seconda della domanda del momento: è possibile spegnere il reattore (operazione non banale) ma non regolarne la potenza. Di qui l'idea di comporre il nucleo con tante piccole unità di piccola potenza: ogni unità può essere accesa o spenta separatamente e così si riesce a modulare la potenza complessiva del nucleo composito. Non bisogna però cadere nell'illusione di poter comporre reattori "temporanei" in luoghi diversi assemblando occasionalmente numeri variabili di moduli. La fissione avviene in quello che si chiama il **nocciolo** ma tutto intorno la centrale deve avere le schermature, i sistemi di sicurezza, i sistemi di controllo, i circuiti per la refrigerazione e per l'asportazione del calore che poi servirà a generare l'energia elettrica. Tutto questo non è assemblabile e disassemblabile come il nocciolo e va dimensionato sulla potenza massima. I costi relativi sono la causa che ha portato, nel tempo, verso reattori sempre più potenti e centrali con parecchi reattori in modo da realizzare economie di scala adeguate. Sono anche questi costi, insieme a quelli della gestione delle scorie e dello smantellamento della centrale al termine della sua vita utile, che hanno portato il costo attuale del kWh nucleare a superare quello dei kWh ottenuti da rinnovabili quali il sole o il vento.
- **Trasporti e sicurezza**. Ad una rete di centrali nucleari corrisponde un sistema di trasporti speciali per far arrivare, quando richiesto, gli elementi fissili freschi (le barre o altro) e portar via quelli esausti. I primi debolmente radioattivi, i secondi

altamente radioattivi. I primi in provenienza da impianti di arricchimento dell'uranio siti fuori dal territorio nazionale in paesi internazionalmente abilitati, per via della potenziale valenza militare dell'arricchimento; i secondi destinati all'immagazzinamento in qualche sito temporaneo e poi definitivo o anche, prima dell'immagazzinamento, a qualche impianto di riprocessamento per estrarre il residuo materiale fissile. Questi ultimi impianti sono anch'essi dislocati solo in alcuni paesi per le stesse ragioni valide per l'arricchimento; in sé poi sono molto più impattanti in caso di incidenti. La rete di trasporti speciali diviene più complessa e delicata al crescere del numero e della distribuzione territoriale delle centrali.

- **Tipologie di reattori.** Si è parlato molto di reattori di “quarta generazione” (quelli realizzati più recentemente sono detti di generazione III+), ma si tratta più che altro di una qualifica “giornalistica”. Esiste un'ampia tipologia di reattori realizzati, sperimentati, progettati, piccoli, grandi, piccolissimi. L'evoluzione nei decenni ha riguardato aspetti tecnologici relativi all'efficienza e alla sicurezza, non tanto al tipo di reattore. In ogni caso, comunque, si tratta di reattori a fissione e la fissione è necessariamente abbinata ai prodotti della fissione stessa: se si spezza qualcosa in due, poi ci saranno i due frammenti.
- **Le scorie.** I prodotti della fissione sono decine di isotopi diversi, tutti radioattivi con tempi di dimezzamento (emivite) diversi. Le scorie però non sono solo i prodotti della fissione. Il materiale fissile, generalmente uranio 235 (U^{235}), rappresenta all'inizio una percentuale minore della barra (o della miscela) in cui avviene la fissione: meno del 10% (un valore tipico è 3,5%). Nella fissione, oltre ai relativi prodotti, si emettono anche dei neutroni, che, oltre ad alimentare la fissione a catena, vengono assorbiti dal mezzo circostante che diviene a sua volta variamente radioattivo (in parte lo era già, nel caso dell' U^{238} , ma in maniera abbastanza debole). Più del 90% del materiale di partenza è U^{238} e questo, assorbendo neutroni, si trasforma in parte in plutonio 239, a sua volta fissile e con un tempo di dimezzamento di 24000 anni. Aggiungiamo che, siccome i prodotti della fissione sono assorbitori di neutroni, procedendo nel funzionamento a un certo punto la fissione stessa viene interrotta e l'elemento di “combustibile” nucleare deve essere estratto: quando ciò avviene l' U^{235} è ancora più di 2/3 di quello iniziale. Le scorie, a questo punto, sono composte da un miscuglio di prodotti della fissione e dei materiali variamente radioattivi, in cui gli isotopi fissili erano immersi. Le unità di misura della durata della pericolosità di queste scorie sono i millenni (molti).
- **Condizionamento delle scorie.** In laboratorio, dato un certo radioisotopo, bombardandolo con un fascio di neutroni (meglio se monocromatici: tutti con la

stessa velocità) è possibile indurre delle trasformazioni nucleari tali da convertirlo in qualcos'altro con un tempo di dimezzamento inferiore. Se però si ha di fronte un miscuglio di decine di radioisotopi, ognuno con diversa emivita e diversa sezione d'urto (capacità di assorbimento dei neutroni), in cui ogni nucleo è colpito anche dalle radiazioni o particelle provenienti dai nuclei circostanti, la situazione è parecchio diversa. Ad essere molto, ma molto, ottimisti si può sperare di far passare l'unità di misura del tempo di pericolosità dalle migliaia d'anni ai secoli.

- **Durata della fonte nucleare.** Se si dovesse ricorrere in maniera sostanziale e non marginale alla fonte nucleare la durata stimata delle riserve di uranio naturale sfruttabili in maniere economicamente conveniente sarebbe confrontabile con quella del petrolio: decenni.
- **Transizione energetica per altre vie.** A volte si sente o si legge che le “rinnovabili” non potrebbero da sole coprire le necessità del paese. In realtà i dati dicono che una superficie di pannelli fotovoltaici con rendimento del 20% (oggi si va verso il 30%) pari al 2% del territorio italiano sarebbe sufficiente a coprire tutto il fabbisogno energetico nazionale. È il caso anche di ricordare che più del 7% (si va verso l'8%) del territorio del nostro paese è attualmente coperto da capannoni, piazzali, tetti, massicciate, etc. I tempi di realizzazione di impianti a “rinnovabili” sono molto più brevi di quelli relativi alle centrali nucleari. I costi unitari della realizzazione di impianti a “rinnovabili” sono molto più bassi di quelli di realizzazione e poi gestione degli impianti nucleari. Con le “rinnovabili” non si lasciano alle generazioni future eredità pericolose a lungo e lunghissimo termine.
- **Vincolo generale.** Qualunque sia la fonte (rinnovabili incluse) non se ne viene a capo se non si fa in modo di stabilizzare i flussi di energia.



19STC0082960