

Flavio Parozzi è ingegnere nucleare e responsabile delle ricerche sulla sicurezza nucleare di Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) a Milano. Da trent'anni si occupa di sicurezza degli impianti di produzione energetica ed è promotore di programmi di ricerca nazionali e internazionali sulla sicurezza degli impianti nucleari.



ENERGIA NUCLEARE

Fukushima, anatomia di un incidente

Il disastro giapponese è stato provocato da una sequenza di eventi innescata dal maremoto che ha colpito la centrale dopo il sisma

di *Flavio Parozzi*

Il terremoto avvenuto lo scorso 11 marzo nel nord del Giappone è stato di magnitudo 9,0, vale a dire che ha liberato 30.000 volte più energia di quello che ha colpito L'Aquila due anni fa. Il terremoto è stato il più violento mai registrato in Giappone da quando esistono le rilevazioni sismiche e il quarto più forte al mondo nell'ultimo secolo. Secondo quanto previsto dalle procedure di sicurezza, nelle centrali nucleari più esposte al sisma, quelle di Onagawa, Tokai, Fukushima-Daiichi e Fukushima-Daini, i reattori si sono spenti automaticamente. Il sito di Fukushima, fra i più grandi del mondo come potenza installata, è composto da due centrali.

IN BREVE

Il terremoto di magnitudo 9,0

che ha colpito il Giappone l'11 marzo scorso ha provocato lo spegnimento immediato e automatico delle centrali nucleari più esposte al sisma.

Nelle unità di Fukushima-Daiichi il terremoto e il maremoto hanno messo fuori uso il collegamento alla rete elettrica e i sistemi di emergenza di raffreddamento, con conseguente

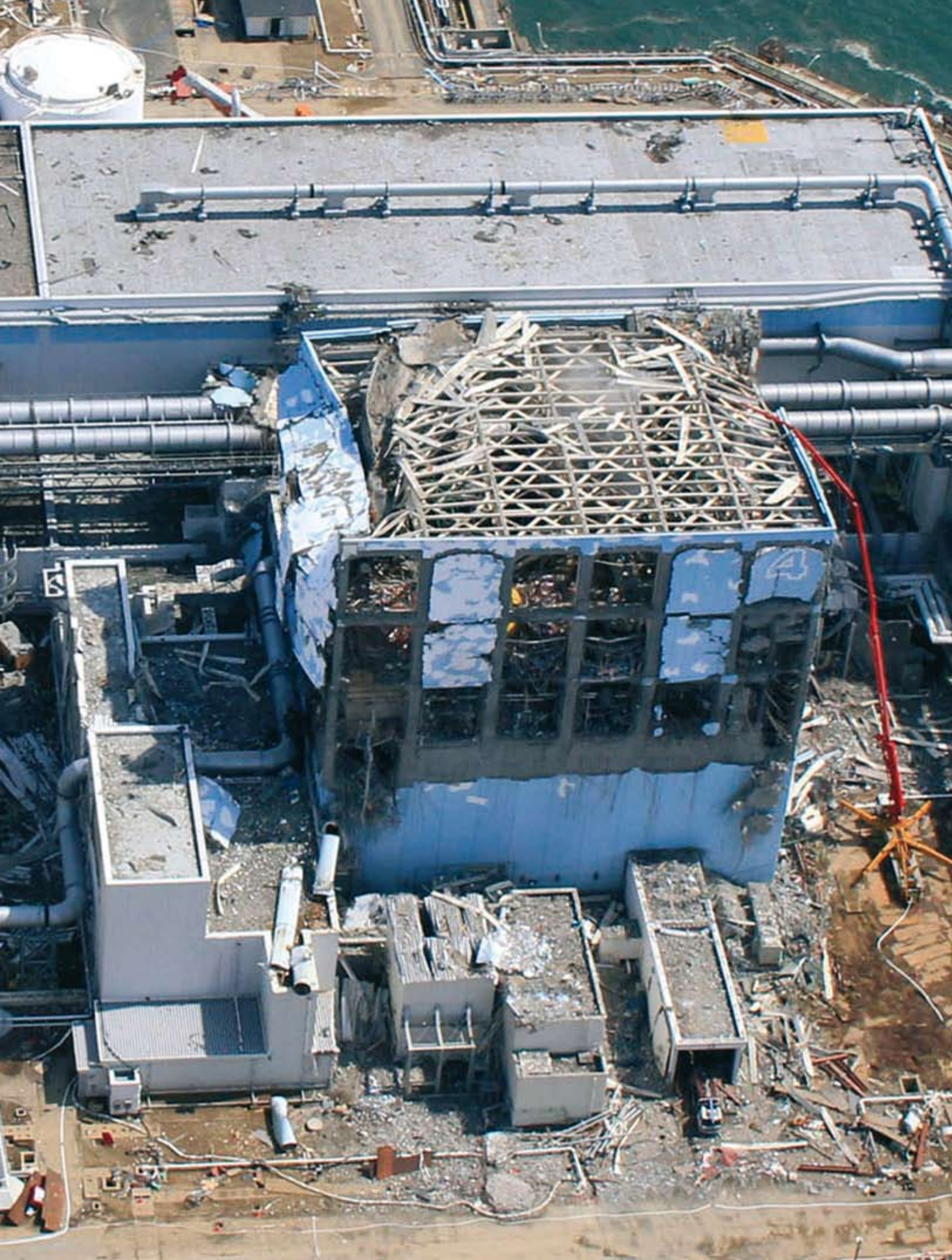
surriscaldamento del combustibile, parziale fusione del nocciolo e produzione di idrogeno che ha causato diverse esplosioni.

In seguito all'incidente si è

registrato il rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente che ha portato all'evacuazione della popolazione nel raggio di 30 chilometri della centrale.

Effetto esplosivo. L'unità 4 della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi fotografata da un velivolo senza pilota il 24 marzo. Si possono notare i danni provocati da un'esplosione interna causata probabilmente da un accumulo di idrogeno.

Air Photo Service/AP Photo/La Presse



La prima, denominata Fukushima-Daiichi, comprende sei reattori ad acqua bollente (*boiling water reactor*, BWR, *si veda il box a fianco*) entrati in servizio negli anni settanta, con una potenza elettrica complessiva di circa 4700 megawatt, mentre la seconda, quella di Fukushima-Daini, è dotata di quattro reattori BWR da 1100 megawatt elettrici ciascuno, entrati in funzione negli anni ottanta. L'incidente è avvenuto nella centrale più vecchia, quella di Fukushima-Daiichi, non a causa del terremoto, al quale la centrale ha resistito abbastanza bene, ma a causa del conseguente tsunami oceanico, che ha messo fuori uso l'alimentazione elettrica necessaria ai sistemi di raffreddamento.

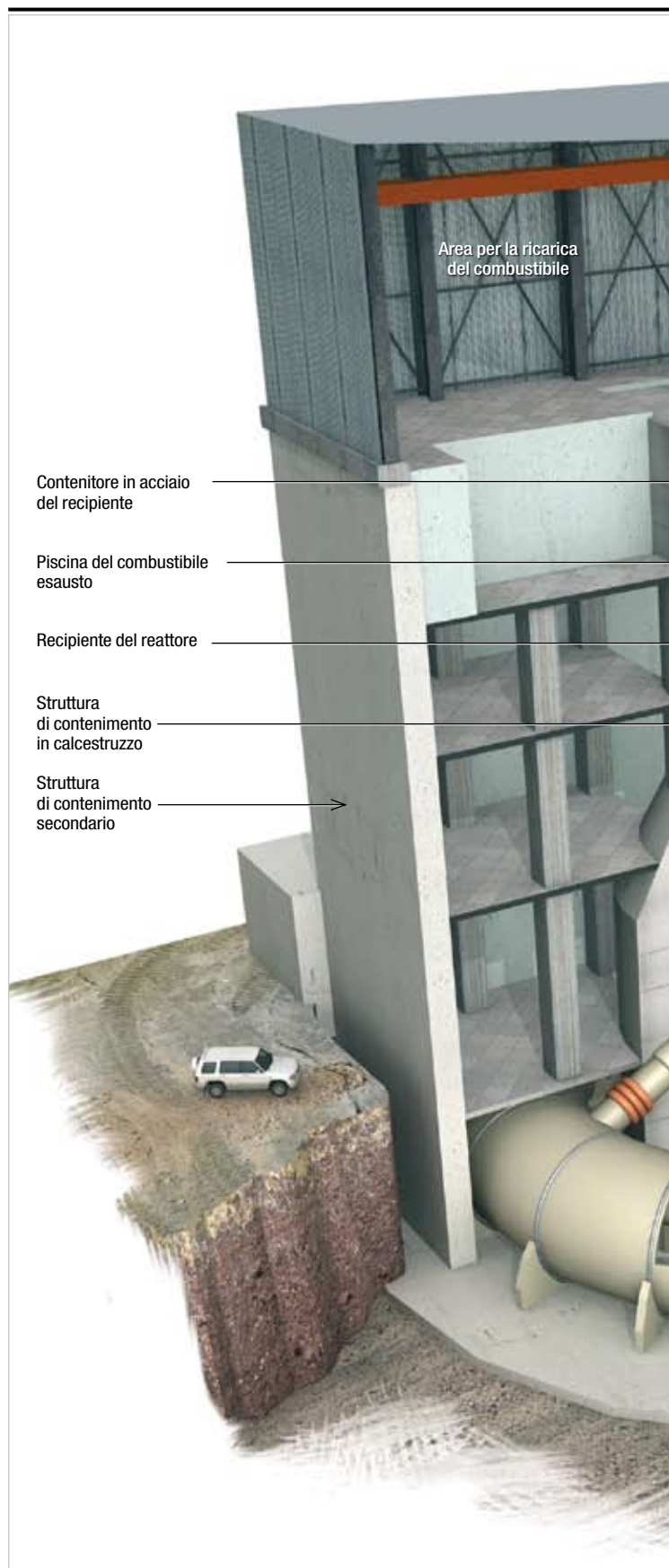
A causa degli elementi radioattivi che si trovano nel combustibile perché prodotti proprio dalla fissione dell'uranio, i reattori nucleari continuano a generare una certa quantità di calore anche dopo l'arresto della reazione a catena. La potenza termica residua è pari a circa il 5-7 per cento della potenza termica nominale del reattore all'istante immediatamente successivo allo spegnimento, si riduce a circa l'uno per cento nel giro di un paio d'ore e continua a diminuire gradualmente. Un reattore con potenza di 1000 megawatt elettrici, che quindi sviluppa una potenza termica di circa 3000 megawatt, quando è spento continua a generare qualche decina di megawatt per molte ore. Non è una potenza enorme, ma richiede che siano in funzione sistemi di raffreddamento per evitare che il combustibile si surriscaldi e possa rilasciare sostanze radioattive nei circuiti dell'impianto o, peggio, nell'ambiente esterno.

Se l'acqua che agisce come fluido di raffreddamento evapora e lascia scoperto il nocciolo del reattore, il contatto tra le barre di combustibile surriscaldate e il vapore generato dall'ebollizione dell'acqua rimasta produce idrogeno. Il vapore e l'idrogeno possono quindi essere rilasciati all'interno del contenitore di sicurezza. In caso di eccessivo aumento della pressione nel contenitore può essere necessario sfiatare all'esterno il vapore e l'eventuale idrogeno. Per assicurare in modo affidabile la rimozione del calore residuo, gli impianti nucleari sono dunque dotati di vari sistemi, uno di riserva all'altro, in grado di fornire potenza elettrica ai sistemi di pompaggio dell'acqua anche quando siano venuti a mancare la produzione di elettricità da parte dell'impianto e il collegamento con la rete esterna.

Che cosa è successo nella centrale

A Fukushima, un'ora dopo il sisma che ha provocato il distacco dalla rete elettrica e lo spegnimento dei reattori, l'onda di maremoto ha messo fuori uso tutti i gruppi elettrogeni di emergenza. Per le successive otto ore i sistemi di raffreddamento dei reattori sono stati alimentati con batterie, ma una volta esaurite anche queste fonti di energia ogni alimentazione elettrica è cessata. Probabilmente, a causa della disastrosa situazione in cui si trovava l'intera regione in seguito al terremoto, non è stata prontamente ripristinata dall'esterno nessun'altra alimentazione. Una volta arrivati sul posto generatori diesel funzionanti è stato possibile iniettare nei reattori acqua di mare, anche se è molto probabile che i circuiti, danneggiati dal terremoto, abbiano iniziato a perdere una parte dell'acqua iniettata, non permettendo quindi di risolvere subito la situazione.

Questa sequenza di eventi ha causato un temporaneo abbassamento del livello dell'acqua nei reattori, con conseguente surriscaldamento del combustibile, danneggiamento parziale del nocciolo e produzione di idrogeno. Questo gas è stato prodotto dalla decomposizione dell'acqua a contatto con le barre di combustibile rivestite in lega di zirconio che hanno avuto il tempo di surriscaldarsi.



Il reattore ad acqua bollente

Il reattore ad acqua bollente (*boiling water reactor*, BWR) è stato sviluppato a partire dagli anni cinquanta negli Stati Uniti dalla General Electric con l'apporto dei centri di ricerca statunitensi, e appartiene alla categoria dei reattori nucleari a neutroni lenti o termici, moderati e raffreddati ad acqua leggera. Dopo la tipologia di reattori ad acqua in pressione (*pressurized water reactor*, PWR) è quella più diffusa. Il combustibile dei BWR è ossido di uranio debolmente arricchito in uranio-235 sotto forma di pastiglie ceramiche contenute in fasci di barre di una lega di zirconio. La pressione di esercizio del circuito del reattore è di 75-80 atmosfere, e il vapore esce dal nocciolo a circa 285-290 gradi Celsius.

La denominazione BWR definisce la caratteristica principale di questo tipo di impianto, ovvero la generazione del vapore direttamente nel reattore. Il vapore è separato dalle gocce d'acqua in componenti collocati sopra il reattore stesso e inviato direttamente alla turbina senza bisogno di generatori di vapore e quindi di un circuito secondario come avviene invece nei PWR. Dopo l'espansione in turbina, il vapore ritorna allo stato liquido in un condensatore grazie allo scambio termico con l'acqua di una sorgente fredda, che può essere quella del mare o di un fiume. L'acqua condensata viene preriscaldata e pompata di nuovo nel recipiente del reattore per ripetere il ciclo.

Il recipiente del reattore è collocato all'interno di un contenitore primario di sicurezza, destinato al contenimento di vapori e polveri radioattivi che potrebbero essere liberati in caso di incidente. Al contenitore primario è collegata una piscina d'acqua per la soppressione degli scarichi di vapore. Intorno al contenitore primario è costruito l'edificio con funzione di contenitore secondario, al cui interno si trovano i sistemi ausiliari. È in questa parte dell'impianto che sono avvenute le esplosioni di idrogeno a Fukushima.

I reattori italiani di Caorso, in esercizio tra 1981 e 1986, e quello mai completato di Montalto di Castro erano di tipo BWR. Entrambi versioni più evolute dei BWR di Fukushima-Daiichi.

Piscina toroidale di soppressione del vapore

Come previsto, il vapore misto a idrogeno prodotto dal reattore è stato inizialmente scaricato nei contenitori di sicurezza a tenuta di gas che racchiudono la parte nucleare degli impianti, provocando un incremento di pressione che in seguito ha costretto a uno scarico verso l'esterno. L'idrogeno, più leggero dell'aria, si è accumulato nella parte più alta degli edifici che racchiudono i contenitori, causando diverse esplosioni, che sembra non abbiano danneggiato in modo significativo i contenitori di sicurezza.

Al momento del terremoto, tre delle sei unità della centrale di Fukushima-Daiichi erano fuori esercizio, e il loro combustibile era immagazzinato in una piscina di raffreddamento esterna. È probabile che la piscina si sia svuotata abbastanza rapidamente a causa dei danni strutturali provocati dal sisma. Anche se con una minore potenza termica di decadimento, il combustibile stoccato nella piscina ha sperimentato una situazione analoga a quella dei reattori, surriscaldandosi e producendo idrogeno. Dalle barre di combustibile danneggiate quindi è avvenuto un rilascio di gas e vapori radioattivi.

La reazione di ossidazione delle barre di combustibile è esotermica, e il calore generato si somma a quello del decadimento radioattivo. Nelle situazioni peggiori, il combustibile può fondersi a causa dell'aumento progressivo della propria temperatura. In questo caso combustibile e materiali strutturali fusi si raccolgono, come avvenuto nell'incidente di Three Mile Island nel 1979, sul fondo del recipiente del reattore (il *vessel*) fino a quando è possibile smaltire in qualche modo il calore generato, per esempio vaporizzando acqua rimasta all'interno o raffreddando le pareti del recipiente mediante allagamento dall'esterno. Nel caso non sia possibile, il fondo del vessel è destinato a cedere, e la miscela di combustibile e di materiali metallici fusi, in gergo tecnico chiamata *corium*, cade nella cavità dell'edificio di contenimento. L'incidente termina quando è possibile ripristinare il raffreddamento del corium.

Perdita di elementi radioattivi

Il bilancio delle conseguenze note sul personale addetto alla centrale di Fukushima è di due decessi e di una ventina di feriti a causa delle esplosioni e di alcune persone contaminate. Il degrado dei reattori si è arrestato a una fase intermedia, grazie all'immissione di acqua, e si è verificata una parziale fusione del combustibile con rilascio delle sostanze radioattive più volatili all'interno del contenitore, come i composti di iodio e di cesio, in parte scaricati poi nell'ambiente esterno.

Gli isotopi dello iodio e del cesio, insieme agli isotopi di molti altri elementi, sono il risultato della fissione dell'uranio grazie a cui è prodotta l'energia atomica, e sono responsabili di una parte notevole della radioattività che si trova nel reattore. Lo iodio e il cesio formano composti abbastanza volatili, e visto che l'ingestione o l'inalazione di isotopi radioattivi sono fattori di rischio, a partire dagli anni ottanta sono stati studiati i fenomeni che condizionano il loro trasporto in fase aeriforme allo scopo di rendere

sempre più efficienti sistemi e procedure che consentono di minimizzare ogni eventuale perdita all'esterno.

Nei giorni successivi all'incidente, a causa dei rilasci radioattivi, intorno alla centrale di Fukushima sono stati registrati picchi rilevanti di radioattività dovuti a questi isotopi, anche se molto inferiori rispetto a quelli registrati a Chernobyl. Tuttavia, quei valori di radioattività hanno portato alla decisione di evacuare la popolazione residente in un raggio di 20-30 chilometri dalla centrale per minimizzare l'esposizione delle persone. Pur nell'indubbia gravità delle conseguenze appena descritte, si deve considerare che l'incidente si è verificato in un contesto di

grande drammaticità, a fronte di un sisma di entità storica. Nella zona colpita dal sisma, lo tsunami ha provocato circa 22.000 vittime, per la maggior parte annegate a causa della tremenda inondazione della costa dove si trova proprio la centrale di Fukushima. E si stimano alcune centinaia di vittime a causa di crolli, cadute e incendi scoppiati soprattutto per le perdite di gas.

Come già detto, l'incidente all'impianto nucleare ha provocato due vittime. L'impatto radiologico, che sicuramente sarà studiato nei prossimi anni, potrebbe portare a un numero di tumori superiore a quello normalmente atteso nella zona, e dovrà essere aggiunto all'impatto delle analoghe perdite dagli impianti petrolchimici, dai depositi di carburanti e dai depositi di rifiuti tossici coinvolti nel disastro. La decontaminazione dell'area circostante la centrale, e soprattutto la messa in sicurezza di quello che è rimasto di

Fukushima-Daiichi, sarà un impegno non indifferente per l'industria giapponese del settore, che dovrà continuare a gestire il parco di centrali nucleari ancora attive fornendo garanzie di sicurezza decisamente maggiori.

La strada della ricerca

Dopo quanto è accaduto, molti persone si chiedono: che cosa possiamo imparare da questo grave incidente e in che misura si devono modificare scelte già fatte o ancora in corso sull'impiego pacifico dell'energia nucleare? Si tratta di una questione di notevole complessità, su cui vale comunque la pena di esprimere alcune riflessioni preliminari.

I reattori di Fukushima-Daiichi sono stati progettati mezzo secolo fa, e non possono essere presi come esempio di una tecnologia che nel frattempo si è ovviamente evoluta. Negli impianti nucleari di progettazione più recente è stata data grande importanza ai sistemi di abbattimento che possono ridurre o impedire il rilascio di iodio e di polveri radioattive nell'ambiente esterno, come spruzzatori o filtri, insieme alla funzione di intrappolamento svolta da edifici di contenimento a tenuta elevata e sempre più robusti.

Il mondo della ricerca dedica grande attenzione ai fenomeni legati al rischio di rilascio di sostanze radiotossiche, e in questo campo gli scienziati italiani hanno avuto in passato e hanno ancora oggi un ruolo di rilievo. Nel corso del tempo, questo lavoro ha prodotto conoscenze senza dubbio notevoli, concretamente usate



Il rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente intorno a Fukushima è stato molto inferiore di quello registrato a Chernobyl



Devastazione edifici ausiliari. Le unità 3 (*sinistra*) e 4 (*destra*) della centrale di Fukushima fotografate il 18 marzo. Entrambe mostrano i gravi danni provocati dalle esplosioni interne agli edifici. A fronte, l'interno del primo piano dell'unità 3 fotografato da un robot il 17 aprile.

oggi nella progettazione di nuovi impianti e nella messa a punto delle procedure di sicurezza.

L'incidente giapponese ha ulteriormente evidenziato che la perdita di alimentazione elettrica è una fonte di rischio importante, e occorre quindi che la rete elettrica vicina alle centrali garantisca la più elevata affidabilità e robustezza possibile. Sebbene fosse un punto di debolezza ben esplorato, l'incidente verificatosi lo scorso marzo ha confermato l'importanza di realizzare sistemi di alimentazione di emergenza il più possibile immuni da eventi esterni quali terremoti e inondazioni. L'incidente di Fukushima richiederà inoltre un pronto riesame dei criteri di progettazione e dell'adeguatezza dei sistemi di sicurezza installati negli impianti più vecchi ancora in funzione. La valutazione della sicurezza dei progetti futuri dovrà invece tenere conto, oltre che degli aspetti probabilistici, assolutamente non sufficienti in particolar modo per l'opinione pubblica, anche di quelli consequenziali, in modo da dimostrare che le situazioni gravi possono essere gestite in modo efficace.

Nel contesto europeo, le ricerche che riguardano questi aspetti costituiscono il tema portante del network SARNET (Severe Accident Research NETwork), coordinato dall'istituto per la sicurezza nucleare francese (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN) a cui aderiscono una cinquantina di organizzazioni tra costruttori di impianti, compagnie elettriche, università e centri di ricerca, e, da parte italiana, Ricerca sul Sistema Energetico (RSE), ENEA e Università di Pisa.

Grazie alla collaborazione dei maggiori esperti europei di sicurezza nucleare, SARNET ambisce a essere il principale punto di riferimento per la definizione delle priorità delle ricerche europee del settore, la creazione di un consenso riguardo i fenomeni che caratterizzano gli scenari di maggiore gravità, la messa a punto di una banca dati, di strumenti e di procedure di analisi comuni, e, non ultimo, per lo scambio di informazioni e la mobilità di studenti e di giovani ricercatori.

I principali temi di indagine ancora aperti riguardano soprattutto le fenomenologie fisico-chimiche legate al degrado e alla fusione del nocciolo del reattore, il confinamento e raffreddamento del *corium* – la miscela di componenti del nocciolo che si forma in seguito alla fusione – i fenomeni esplosivi che potrebbero danneggiare il contenitore, il rilascio e il trasporto delle sostanze radioattive in fase aeriforme. Un esempio di risposta data da SARNET a enti istituzionali e operatori energetici è stata infatti la pronta attivazione di un gruppo di lavoro dedicato all'impatto radiologico dell'incidente di Fukushima. ■

PER APPROFONDIRE

Agenzia internazionale per l'energia atomica (International Atomic Energy Agency, IAEA): www.iaea.org.

Tokio Electric Power Company, gestore della centrale di Fukushima-Daiichi: www.tepco.co.jp/en/index-e.html.

Severe Accident Research NETwork: www.sar-net.eu.