

L'incidente nucleare alla centrale di Fukushima-Dai-ichi

Ovvero, l'uomo contro la natura: storie di guai, storie di eroi

In seguito al terremoto e allo tsunami occorsi lo scorso 11 marzo in Giappone, presso la centrale nucleare di Fukushima-Dai-ichi si è determinata – simultaneamente nei tre reattori in esercizio – una complessa situazione incidentale che, successivamente, ha coinvolto anche le piscine di stoccaggio degli elementi di combustibile irraggiati. Gli incidenti sono stati innescati da una delle condizioni più penalizzanti: il blackout completo degli impianti a seguito di un'onda di tsunami di ben 14 metri che ha provocato lo spegnimento dei diesel di emergenza necessari per garantire l'asportazione del calore di decadimento anche dopo l'arresto della reazione a catena. Le conseguenze radiologiche all'esterno dell'impianto sono rilevanti tanto da indurre l'Agenzia di Sicurezza giapponese a proporre, temporaneamente, una classificazione 7 della scala INES, ma hanno interessato prevalentemente le prefetture attorno al sito di Fukushima

■ Felice De Rosa, Giacomo Grasso, Paride Meloni, Stefano Monti, Massimiliano Polidori

Alle 14:46 ora locale (06:46 ora italiana) dell'11 marzo 2011 il Giappone è stato sconvolto da un violento terremoto (di magnitudo 9.0 della scala Richter, 30.000 volte più energetico di quello che ha colpito l'Aquila), con epicentro localizzato nel Pacifico, 130 km a est della costa dell'isola di Honshu. La localizzazione dell'epicentro in pieno oceano ha inoltre provocato uno tsunami di incredibili proporzioni (con onde oltre i dieci metri di altezza), che ha raggiunto le coste nord-orientali del Giappone fra i 30 ed i 50 minuti dopo l'evento sismico principale.

All'arrivo della scossa di terremoto i sensori sismici

dei quattro siti nucleari più vicini all'epicentro (Onagawa, Fukushima-Dai-ichi, Fukushima-Dai-ni e Tokai) hanno attivato – sui reattori in esercizio – la sequenza automatica di SCRAM; una procedura rapida di spegnimento che inserisce le barre di controllo nel nocciolo del reattore arrestando la reazione nucleare. L'intera sequenza richiede meno di due secondi. Allo stesso tempo, le linee che portano l'acqua e il vapore dalla e alla turbina sono state intercettate da coppie di valvole poste dentro e fuori al contenimento primario, isolando il reattore. Questa misura è operata automaticamente per scongiurare la possibilità di una perdita di refrigerante nella parte convenzionale dell'impianto, in cui tanto la turbina quanto il condensatore – per la loro ingente mole – rappresenterebbero punti deboli del circuito primario durante un sisma. La procedura automatica è stata attuata con successo su tutti i reattori dei quattro siti suddetti ad eccezione delle unità 4, 5 e

■ Felice De Rosa, Giacomo Grasso, Paride Meloni, Stefano Monti e Massimiliano Polidori
ENEA, Unità Tecnica Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile

6 della centrale di Fukushima-Dai-ichi, essendo queste in condizione di arresto già prima del sisma per operazioni ordinarie e programmate di manutenzione.

Dopo lo spegnimento, la potenza prodotta dal nocciolo, posto all'interno del vessel del reattore, scende rapidamente ad una frazione (circa 6%) di quella nominale ma non si annulla a causa del calore generato dal decadimento dei prodotti di fissione. Nonostante la potenza di decadimento si riduca rapidamente (al di sotto dell'1% di quella nominale) già nelle prime ore successive allo spegnimento del reattore, è comunque fondamentale garantire l'asportazione del calore dal nocciolo per preservare l'integrità delle strutture fino al raggiungimento della condizione di "arresto freddo", che corrisponde al completo allagamento del nocciolo e al mantenimento di una temperatura inferiore a 100 °C senza ulteriori interventi.

A tal fine, in ogni impianto è prevista una serie di sistemi di sicurezza propriamente progettati per raffreddare il reattore iniettando acqua fredda nel vessel. Allo stesso modo, è necessario assicurare il continuo raffreddamento anche degli elementi di combustibile esauriti, collocati in una apposita piscina che, nel caso dei reattori in questione, si trova all'interno dell'edificio reattore.

Quasi tutti i sistemi installati negli impianti interessati dal sisma richiedono alimentazione elettrica per il loro funzionamento. All'esterno dei complessi nucleari in esame, il terremoto ha però abbattuto tutte le linee elettriche che alimentano le centrali, determinando il blackout degli impianti. Per scongiurare l'impossibilità di refrigerare il reattore, tutte le centrali sono dotate di generatori diesel di emergenza. Secondo il criterio di ridondanza, questi sono in numero superiore ad uno e indipendenti, singolarmente sufficienti ad assicurare la necessaria fornitura di potenza elettrica ai sistemi di sicurezza. Grazie ai generatori diesel, la refrigerazione degli elementi di combustibile nei reattori in esercizio e nelle piscine di stoccaggio è stata così regolarmente garantita sin dai primi secondi immediatamente successivi al terremoto.

Quando, alle 15:42, lo tsunami si è abbattuto sui quattro complessi nucleari, l'evoluzione della situazione di emergenza si è profondamente differenziata. Mentre ad Onagawa, Fukushima-Dai-ichi e Tokai le conseguenze dello tsunami sono state praticamente nulle, permettendo ai tecnici di continuare le operazioni di gestione dei reattori fino al raggiungimento – pur in tempi differenti – dell'arresto freddo, negli impianti di Fukushima-Dai-ichi si è determinata una condizione di

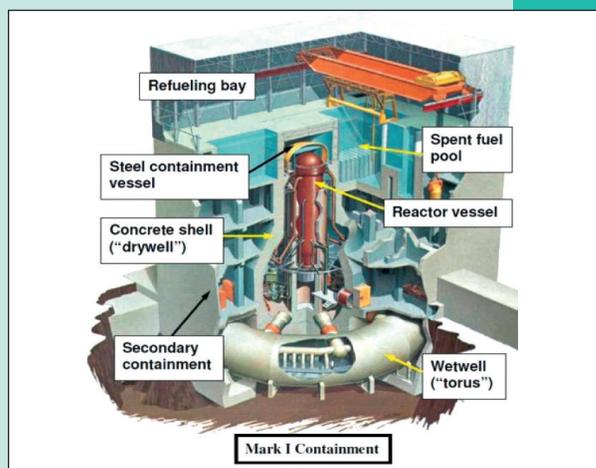


FIGURA 1 Spaccato di un tipico contenimento Mark-I per un reattore ad acqua bollente
Fonte: General Electric

I reattori installati presso la centrale di Fukushima sono del tipo ad "acqua bollente" (*Boiling Water Reactor, BWR*), nei quali la produzione di vapore per l'azionamento della turbina avviene direttamente all'interno del nocciolo del reattore, dove hanno luogo le reazioni di fissione nucleare a catena. Il nocciolo, che contiene gli elementi di combustibile, è racchiuso da un vessel di acciaio (dello spessore di circa 15 cm) da cui si diparte la linea di vapore diretto in turbina ed in cui entra la linea di rimando dell'acqua di alimento. Il vessel è a sua volta rinchiuso in un *contenimento primario* a tenuta stagna, costituito da una parete di acciaio di 1,5 cm di spessore sagomato secondo una caratteristica forma a "bulbo di lampadina rovesciato", e collegato mediante una rete di tubazioni ad una piscina toroidale (*piscina di soppressione delle sovrappressioni*), concepita per condensare il vapore liberato da un'eventuale rottura delle tubazioni di refrigerante all'interno del contenimento primario, riducendo la pressurizzazione dell'ambiente interno a quest'ultimo. L'intero sistema, insieme alla piscina di stoccaggio degli elementi di combustione esauriti, è infine confinato all'interno di un edificio (detto *contenimento secondario* o *edificio reattore*) che, pur non avendo alcuna funzione di contenimento, delimita l'impianto.

completo blackout. Infatti, presso tale sito (di proprietà della Tokyo Electric Power Co., TEPCO), i generatori diesel sono installati all'interno di un edificio interrato nel terrapieno antistante le strutture principali della centrale, a pochi metri dal mare. Le ondate di marea, che presso il sito della centrale di Fukushima-Dai-ichi hanno raggiunto un'altezza superiore ai 14 m, hanno scavalcato le barriere frangiflutti previste per mitigare gli effetti di uno tsunami (l'altezza massima assunta a progetto per le onde era di 6 metri) e inondato l'intero complesso, sommergendo i locali dei generatori diesel che, in breve tempo, hanno smesso di funzionare. La completa perdita di alimentazione elettrica è annoverata tra le peggiori cause iniziatrici di un incidente con conseguenze potenzialmente gravi: i sistemi di protezione di cui è dotata una centrale di seconda generazione come quella di Fukushima sono infatti capaci di assicurare un limitato "tempo di grazia", oltre il quale il raffreddamento del nocciolo non è più garantito e diventa fondamentale ripristinare l'alimentazione elettrica per il riavvio dei sistemi attivi ausiliari. È in questo momento che – di fatto – ha avuto inizio l'incidente vero e proprio; i reattori delle unità 1, 2 e 3 (le uniche in funzione al momento del sisma) hanno seguito, con tempi e modi diversi, un'analogia evoluzione, caratterizzata da quella che, nell'ingegneria dei sistemi, è definita "emergenza progressiva": una con-



FIGURA 2 Le onde si ritirano dal sito della centrale di Fukushima-Dai-ichi dopo lo tsunami
 Fonte: Ministero del Territorio, delle Infrastrutture, dei Trasporti e del Turismo giapponese

catenazione di eventi per cui la perdita di un componente genera una catena di emergenze, con una sorta di effetto valanga.

Sfruttando il tempo di grazia concesso dai sistemi passivi, gli operai della TEPCO hanno approntato linee di iniezione di acqua di mare nel vessel dei tre reattori, collegando le manichette delle autopompe dei vigili del fuoco – accorsi sul sito nel frattempo – ad una derivazione delle linee antincendio. Il passaggio dai sistemi passivi di sicurezza alle linee volanti di iniezione d'acqua non è però stato immediato: durante il periodo di transizione l'asportazione del calore dai tre reattori si è interrotta, provocando una riduzione del livello d'acqua nei vessel e determinando l'esposizione dei noccioli al vapore surriscaldato. In queste condizioni, il vapore ad alta temperatura ha avuto modo di ossidare il metallo delle guaine che rivestono le barrette di combustibile, generando una ingente quantità di idrogeno e deteriorando le guaine stesse fino a far fuoriuscire i prodotti di fissione gassosi e semi volatili (principalmente iodio, xeno, kripto e cesio), fortemente radioattivi, contenuti nelle barrette. Per ridurre la pressione sviluppatasi nei vessel dei tre reattori, si sono quindi operati sfiati di vapore – ricco di idrogeno e contaminato dai prodotti di fissione gassosi – dapprima verso il contenitore primario, quindi, per non minare l'integrità di quest'ultimo, dal contenitore primario all'edificio reattore.

Nei reattori 1 e 3, l'idrogeno presente nei vapori dello sfiato si è accumulato ai piani superiori dell'edificio, raggiungendo le concentrazioni che hanno provocato l'esplosione registrata dalle televisioni giapponesi. È importante sottolineare che l'evenienza di una esplosione di idrogeno nell'edificio reattore era stata prevista in fase di progetto: per questo motivo, il tetto e le pareti laterali dei piani superiori dell'edificio reattore erano stati concepiti come "sacrificiali", appositamente cedevoli per attenuare l'onda d'urto sulle strutture sottostanti. Nell'unità 2, invece, l'entità dello sfiato dal vessel al contenimento primario è stata tale da provocare una parziale rottura nella parte bassa toroidale (piscina di soppressione del vapore), con una fuoriuscita incontrollata di vapore radioattivo nell'edificio reattore e, da lì, all'ambiente esterno. Dalla medesima apertura della piscina di soppressione del vapore è

anche fuoriuscita l'acqua altamente radioattiva che ha allagato i locali dell'adiacente edificio turbina, connesso da un corridoio all'edificio reattore.

A queste operazioni di sfiato sono imputabili i maggiori rilasci radioattivi dai tre reattori, come dimostrato dalla sequenza temporale dei picchi delle misure di radioattività ambientale, costantemente monitorata dagli organismi nazionali ed internazionali di controllo. Proprio in conseguenza di questi eventi, il primo ministro Naoto Kan ha diramato, in via cautelativa, dapprima un ordine di evacuazione degli abitanti che vivono in un raggio di 2 chilometri dalla centrale, per poi estendere progressivamente la zona di evacuazione ad un raggio di 3, 10 ed infine 20 chilometri.

Per quanto, ad un mese dal sisma, l'incidente non possa ancora dirsi concluso, l'iniezione di acqua nei tre reattori e in tutte le piscine di stoccaggio del combustibile esaurito, insieme al ripristino nei giorni successivi dell'alimentazione elettrica dalla rete, hanno arrestato l'evoluzione dell'incidente, portando gli impianti ad una situazione stazionaria, sebbene in presenza di ulteriore rilascio di radioattività trasportata dall'acqua di raffreddamento del nocciolo. Solamente quando sarà possibile ripristinare la corretta circolazione in ciclo chiuso nel circuito di raffreddamento del reattore la sequenza incidentale potrà dirsi definitivamente conclusa.

Le prime stime del termine sorgente indicano un rilascio complessivo di radioattività dai quattro reattori interessati pari a circa un decimo di quello che si ebbe in conseguenza dell'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl nel 1986 dove, peraltro, oltre ai prodotti di fissione, vi fu una notevole dispersione anche di materiale combustibile dovuta all'esplosione del reattore in funzione determinando l'esposizione del nocciolo a cielo aperto. Questa stima della radioattività emessa ha portato l'Agenzia per la Sicurezza Nucleare e Industriale giapponese (NISA) a proporre, temporaneamente, una classificazione al livello INES 7 dell'incidente occorso presso la centrale di Fukushima. Tuttavia, la valutazione ufficiale della gravità dei singoli incidenti occorsi a ogni impianto verrà stabilita dalla IAEA, l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica dell'ONU, unico ente preposto a tale compito, solamente alla completa conclusione dell'incidente,

anche alla luce dell'analisi dettagliata della sequenza di eventi occorsa e delle più precise valutazioni dell'effetto dei rilasci di radioattività sulla popolazione e sull'ambiente.

A titolo di esempio, i valori rilevati al cancello di in-

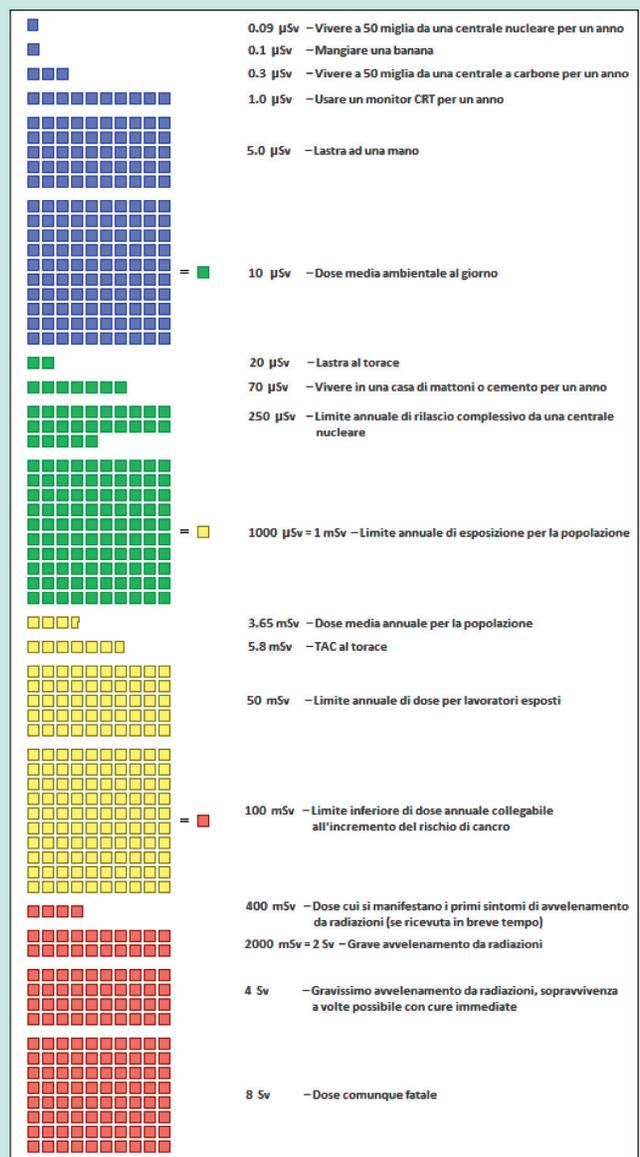


FIGURA 3 Tavola dei livelli di dose di radiazione
Fonte: NRC, INL

gresso di Fukushima, molto elevati nei primi tre giorni, sono poi progressivamente diminuiti: già il 21 marzo – a 10 giorni dal terremoto – si registravano 258 $\mu\text{Sv/h}$ al cancello di ingresso principale mentre nella palazzina di servizio si rilevavano ancora 2.015 $\mu\text{Sv/h}$. Sono certamente valori elevati che hanno generato non poca preoccupazione, ma destinati a diminuire. Ad un mese dal sisma, i valori di radioattività sono infatti scesi a 78 $\mu\text{Sv/h}$ al cancello di ingresso e 560 $\mu\text{Sv/h}$ presso la palazzina di servizio.

Se, all'interno del sito della centrale, i livelli di radiazione sono sensibilmente maggiori del fondo radioattivo naturale, diversa è la situazione per quanto

superiore al fondo. Nell'incidente giapponese, in quasi tutte le prefetture, i livelli di radiazione a 10 giorni dal sisma non mostrano variazioni rispetto ai valori normali. Solo nelle 5 prefetture più prossime al sito di Fukushima si è osservato, a 10 giorni dal sisma, un incremento della radioattività di un fattore compreso tra 2 e 2.5. Questo dato va interpretato però con grande cautela: a Tokyo, per esempio, la rilevazione del 22 marzo (0.138 $\mu\text{Sv/h}$) è di un valore due volte superiore a quello massimo naturale, ma comunque minore rispetto al fondo radioattivo naturale di altre località giapponesi dove c'è presenza di radon naturale. Nella prefettura di Fukushima le verdure a foglia lar-

La scala INES (*International Nuclear and radiological Event Scale*) è uno strumento ideato per comunicare in modo coerente e chiaro al pubblico la significatività – in termini di sicurezza – di ogni evento di natura nucleare o radiologica in generale, inclusi quelli derivanti dall'uso industriale o medico delle radiazioni, dall'esercizio di un impianto nucleare o dal trasporto di materiale radioattivo. Così come la scala Richter, ogni evento è catalogato assegnando ad esso un valore compreso tra 0 (deviazione insignificante) e 7 (grande incidente), valutando in funzione di tre diverse aree di impatto.

Popolazione e Ambiente, considera le dosi ricevute dalla popolazione nelle prossimità del luogo ove l'evento è accaduto, così come la diffusione del materiale radioattivo rilasciato.

Barriere Radiologiche e Controllo, per eventi occorsi all'interno di grandi facility, senza conseguenze dirette per la popolazione o l'ambiente, considera i livelli di radiazione e la diffusione di materiali radioattivi all'interno dell'installazione.

Difesa in Profondità, per eventi occorsi senza alcun impatto diretto sulla popolazione o l'ambiente, considera l'efficacia delle contromisure implementate per prevenire l'incidente.

Ad ogni livello corrisponde una gravità dell'evento associato 10 volte superiore di quella di un evento catalogato al livello immediatamente inferiore.

riguarda la contaminazione dell'ambiente dovuta alla diffusione delle sostanze radioattive.

Pur essendo i rilasci di prodotti di fissione seguiti agli incidenti di Fukushima e Chernobyl confrontabili, gli impatti della radioattività sulla popolazione sono completamente differenti, grazie anche alla tempestiva diramazione dell'ordine di evacuazione dell'area circostante il sito e alle misure di profilassi adottate. Nel caso di Chernobyl, a causa dell'incendio della grafite (non presente nei reattori di Fukushima) che trasportò materiale radioattivo negli strati alti dell'atmosfera, la nube investì l'intera Europa, provocando ovunque un rilevante innalzamento della radioattività rispetto al fondo naturale. Persino nel nord Italia, a circa 1.500 km dalla centrale, si rilevò un incremento quasi 4 volte

ga risultano contaminate e il governo ne vieta l'ingresso nella catena di distribuzione, ma potrebbe essere una misura temporanea. I dati diffusi dalla IAEA infatti confermano che la maggiore contaminazione è dovuta a Iodio 131 (con un valore massimo di 150.000 Bq/kg) ma, in considerazione del fatto che questo isotopo ha un'emivita di 8 giorni, la radioattività è destinata a raggiungere valori trascurabili entro un paio di mesi. I valori di Cesio 137 negli spinaci e nelle cipolle sono prossimi al limite consentito dalla legge per la vendita al pubblico. Questo fatto è rilevante poiché nel caso del Cesio l'emivita è di circa 30 anni, quindi un quantitativo maggiore di Cesio avrebbe significato una contaminazione ambientale di lungo periodo.

