

ScienzaePace

Rivista del Centro Interdisciplinare Scienze per la Pace
Università di Pisa

ISSN 2039-1749

Gli eventi alla centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi

di Alessandro Pascolini

Research Papers

n. 5 – dicembre 2011



Gli eventi alla centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi *

di **Alessandro Pascolini**

Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova e sezione di Padova dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

pascolini@pd.infn.it

ABSTRACT - Gli eventi causati dal terremoto dell'11 marzo 2011 e dal susseguente tsunami alla centrale nucleare giapponese di Fukushima Dai-ichi hanno prodotto il più grave incidente nucleare dopo il disastro di Chernobyl, con enormi implicazioni economiche, sanitarie e sociali in Giappone e ripercussioni a livello mondiale. Il lavoro descrive la centrale, le caratteristiche tecniche e di sicurezza delle sue unità e il loro stato al momento del terremoto. Si segue quindi la storia dei vari impianti a seguito delle ondate di tsunami che hanno causato l'interruzione dei sistemi di raffreddamento, fino a causare la fusione del nocciolo di tre reattori e la dispersione nell'ambiente di sostanze radioattive, il che ha imposto l'evacuazione di circa 100.000 persone dalla zona circostante. Vengono infine tratte delle lezioni a livello internazionale e considerati i possibili scenari futuri. I dati presentati, basati su documenti ufficiali, in particolare i rapporti della commissione internazionale di esperti della IAEA e dai due primi rapporti del governo giapponese, sono aggiornati a fine settembre 2011.

Introduzione

Il terremoto Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki (*Great East Japan Earthquake*) dello scorso 11 marzo, con la susseguente serie di ondate *tsunami*, è stato uno dei più devastanti della storia del Giappone con oltre 25.000 fra morti e dispersi, un molto maggior numero di sfollati, intere città e villaggi distrutti, enormi danni alle strutture e infrastrutture economiche e sociali. Come molti altri impianti industriali, anche le centrali nucleari nella zona sono state esposte ai violenti movimenti tellurici e alle onde multiple di tsunami: Tokai Dai-ni, Higashi Dori, Onagawa, Fukushima Dai-ichi e Fukushima Dai-ni.

Gli 11 reattori operativi al momento del terremoto sono stati

* I dati presentati e discussi nel presente lavoro sono aggiornati alla fine di luglio o, in alcuni casi, a fine settembre quando è uscito un secondo rapporto del governo giapponese. Da allora c'è stato un miglioramento costante della situazione, anche se quest'ultima non è ancora stabilizzata.

regolarmente spenti dai sistemi automatici di controllo sismico degli impianti, ma le alte onde di tsunami hanno creato problemi di diversa gravità alle varie centrali, con gli effetti più devastanti a Fukushima Dai-ichi, ove gli eventi sono stati classificati col più alto grado della scala INES (*International Nuclear Event Scale*)¹ che misura la gravità degli incidenti nucleari. In tre reattori si è raggiunta la fusione del nocciolo e in seguito a danni strutturali ed esplosioni vi è stata dispersione nell'ambiente di sostanze radioattive, il che ha imposto l'evacuazione di circa 100.000 persone dalla zona circostante.

A quattro mesi dall'incidente la situazione dell'impianto di Fukushima non era ancora completamente stabilizzata, per quanto il 29 settembre per la prima volta la temperatura alla base dei vessel di tutte le unità sia scesa sotto i 100°C, soglia vicina al *cold shutdown*. Intanto, mentre continuavano intense le scosse sismiche (517 sopra magnitudo 5), erano ancora impossibili un'analisi dettagliata di tutti i parametri dello stato dei reattori coinvolti e una ricostruzione accurata degli eventi, anche se è stato definito un piano di interventi per portare la centrale in piena sicurezza e ripristinare le condizioni ambientali entro la metà del 2012.

Una commissione internazionale di esperti costituita dall'[Agenzia internazionale per l'energia atomica](#) di Vienna (IAEA)², d'accordo col governo giapponese, ha condotto una missione a Fukushima alla fine di maggio per verificare i fatti e dedurne lezioni per la sicurezza nucleare globale; su queste basi ha redatto un rapporto (IAEA, 2011) presentato alla Conferenza ministeriale sulla sicurezza nucleare svoltasi a Vienna dal 20 al 24 giugno, dove è stato anche discusso un dettagliato rapporto del governo giapponese (Japan Government, 2011). Su tali rapporti, nonché sui comunicati delle [Nuclear](#)

¹ La scala INES misura la gravità di eventi nucleari e radiologici tenendo conto di tre aree di impatto (IAEA, 2009): persone e ambiente: considera le dosi di radiazione alle persone prossime all'evento e la dispersione ambientale di sostanze radioattive; barriere e controllo radiologico: riguarda livelli eccessivi o emissioni di radioattività non previsti ma confinati in impianti nucleari, senza effetti sulla popolazione o l'ambiente; sicurezza in profondità: comprende eventi in cui le misure previste per la prevenzione di incidenti non hanno funzionato come previsto. La scala ha 8 livelli da 0 (deviazione insignificante) a 7 (incidente estremo) e la gravità di ciascun livello è 10 volte maggiore di quella inferiore.

² L'*International Atomic Energy Agency* è un organismo autonomo intergovernativo di scienza e tecnologia dedicato alla cooperazione nucleare mondiale, nella famiglia delle istituzioni afferenti alle Nazioni Unite, istituito nel 1956 con sede a Vienna. La sua missione si articola in tre grandi aree: assistere i paesi membri nello sviluppo di scienza e tecnologie nucleari in vari settori civili e favorire il trasferimento di tali conoscenze e tecnologie; sviluppare standard di sicurezza nucleare e promuovere alti livelli di sicurezza nelle applicazioni dell'energia nucleare e per la protezione sanitaria e ambientale dalle radiazioni (Pascolini, 2006 e 2007); verificare tramite un sistema di ispezioni il rispetto del Trattato di non-proliferazione e di altri accordi di non proliferazione per quanto riguarda la non diversione di materiali e strutture nucleari da usi pacifici a impieghi militari. A luglio 2011 i paesi membri sono 151, il segretariato tecnico è composto da 2300 persone e il direttore generale è il diplomatico giapponese Yukiya Amano.

[Industrial Safety Agency](#) (NISA) e della [Nuclear Safety Commission](#) (NSC) giapponesi, si basa il presente contributo, che riguarda solo la centrale Fukushima Dai-ichi ed è aggiornato a luglio 2011.

1. La centrale Fukushima Dai-ichi

La centrale di Fukushima Dai-ichi, appartenente alla *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO), si trova nei pressi della città di Okuma, sulla costa nord-orientale del Giappone ed era fra le più grandi al mondo con i suoi 6 reattori ad acqua bollente (*Boiling Water Reactor* - BWR) per una potenza totale di 4,7 Gwe. La tabella 1 riassume le caratteristiche essenziali delle 6 unità; al momento del sisma le prime 3 erano in funzione, mentre le altre erano sottoposte a manutenzione programmata: precisamente, dall'unità 4 era stato rimosso tutto il combustibile e il reattore era riempito d'acqua, mentre le unità 5 e 6, sottoposte a controlli in attesa di rientrare in funzione, erano nello stato di "arresto freddo", ossia spenti, con gli elementi di combustibile completamente coperti d'acqua, a pressione atmosferica e temperatura attorno a 30 °C.

	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5	Unità 6
potenza (MWe/ MWt)	460 /1380	784 /2381	784/2381	784/2381	784/2381	1100/3293
tipo	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
sistema di contenimento	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark II
entrata in funzione	1971	1974	1976	1978	1978	1979
elementi di combustibile nel nocciolo	400	548	548	0	548	764
carico di uranio (t)	69	94	94	94	94	132
barre di controllo	97	137	137	137	137	185
elementi di combustibile nelle piscine di stoccaggio	292 esausti 100 nuovi	587 esausti 28 nuovi	514 esausti 52 nuovi	1331 esausti 204 nuovi	946 esausti 48 nuovi	876 esausti 64 nuovi
potenza termica delle piscine di stoccaggio	60	400	200	2000	700	600

(kW)						
tipo di combustibile	LEU	LEU	LEU e MOX	LEU	LEU	LEU
stato	attivo	attivo	attivo	spento	spento	spento

Tabella 1. I reattori di Fukushima Dai-ichi al momento del sisma

Il combustibile impiegato è ossido d'uranio leggermente arricchito nella componente uranio-235 (*Lightly Enriched Uranium* - LEU), che è l'isotopo che subisce fissione: mentre nell'uranio naturale l'uranio-235 è presente solo per lo 0,72%, per il loro funzionamento i reattori BWR richiedono un arricchimento di circa il 3%³. Oltre al LEU si può impiegare una miscela di ossido di uranio naturale (o impoverito) con circa il 5% di ossido di plutonio (*Mixed Oxides* - MOX), che costituisce l'elemento fissile: nell'unità 3 sono presenti 32 moduli con MOX⁴.

Il combustibile è preparato in pastiglie ceramiche (tipicamente 1 cm di diametro e 1,5 cm d'altezza) impilate in barre lunghe circa 4 m entro guaine di una lega di zirconio, un materiale parzialmente permeabile ai neutroni e resistente alla corrosione; un fascio di 60 barre forma un elemento di combustibile. L'insieme degli elementi, opportunamente posizionali, costituisce il nocciolo del reattore, la fonte dell'energia.

Dopo circa 2 anni di operazione il combustibile si esaurisce dato che il materiale fissile (uranio-235 o plutonio) via via si trasforma nei prodotti di fissione e non produce più energia. A questo punto gli elementi esausti, contenenti prodotti di fissione altamente radioattivi, vengono estratti dal reattore e per circa 3 anni vanno conservati in acqua, che ne scherma le radiazioni e ne asporta il calore prodotto; in seguito possono venir immagazzinati in ambiente secco prima di ulteriori trattamenti.

In ogni unità della centrale esiste una piscina di stoccaggio posta vicino alla testa del reattore per facilitare l'estrazione degli elementi mantenendoli in acqua (il reattore viene aperto in cima e riempito d'acqua). In ogni unità della centrale di Fukushima esiste una piscina di stoccaggio posta vicino alla testa del reattore per facilitare l'estrazione degli elementi mantenendoli in acqua (il reattore viene aperto in cima e riempito d'acqua). Le piscine sono profonde una dozzina di metri, garantendo una copertura di 7-8 m di acqua borata⁵ sopra il combustibile, e le barre vengono conservate in strutture rigide distanziate a impedire il raggiungimento di condizioni di criticità; la temperatura viene

³ Per informazioni essenziali sulle proprietà degli isotopi dell'uranio e sulle tecniche di arricchimento vedi, ad esempio, Pascolini (2008).

⁴ Il Giappone è fra i paesi più interessati al riciclo del plutonio come combustibile MOX (von Hippel, 2010).

⁵ Il boro assorbe neutroni, riducendo il rischio dell'instaurarsi di una reazione a catena.

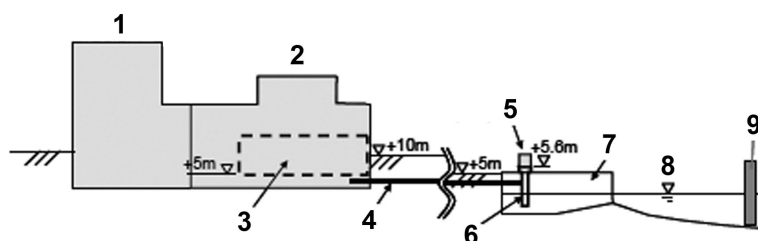
usualmente mantenuta a 30 °C mediante riciclo d'acqua di raffreddamento con pompe elettriche (lo stoccaggio resta sicuro in piena copertura d'acqua fino a 85 °C). Nelle piscine vengono posti anche gli elementi nuovi in attesa di essere inseriti nel nocciolo.

Dopo 18 mesi il combustibile viene trasferito a un'unità di stoccaggio centrale, ubicata presso l'unità 4, dotata di una piscina di 12 m per 29 m profonda 11 m (capacità di 3828 m³), atta a conservare 6840 elementi di combustibile (6375 al momento del sisma). Nella centrale esiste anche un deposito di contenitori di elementi asciutti, posto presso l'edificio turbine dell'unità 5.

La reazione di fissione a catena che produce l'energia primaria viene regolata da barre di controllo fatte di materiale che assorbe neutroni, riducendone il flusso e diminuendo così il tasso di fissioni (nei BWR le barre vengono inserite dal basso); inserendo le barre per una lunghezza adeguata si interrompe la reazione a catena in tutto il volume del nocciolo e si spegne il reattore.

Tutti i reattori di Fukushima sono costruiti sulla roccia⁶ e progettati per resistere a sismi previsti su basi storiche, come per tutti gli altri reattori giapponesi; esaminati dopo il terremoto Miyagi del 1978 (accelerazione 122 Gal per 30 s), non hanno patito danni; nel 2006 la resistenza sismica è stata portata ad accelerazioni orizzontali fra 441 e 489 Gal e verticali fra 412 e 429 Gal, a seconda delle unità. Gli edifici delle unità 1-4 si elevano di 10 m sopra il livello del mare e sono fra loro adiacenti, mentre le unità 5 e 6 sono state edificate in un altro punto della centrale, leggermente più alto (13 m sul mare). I locali delle turbine sono costruiti davanti ai reattori; al piano terra dell'edificio turbine sono collocati i generatori elettrici diesel d'emergenza (EDG) raffreddati ad acqua di mare, come pure i quadri comando delle connessioni e impianti elettrici. Le unità 1-5 hanno 2 EDG ciascuna e 3 l'unità 6: uno degli EDG delle unità 2, 4 e 6 è raffreddato ad aria ed è posto in un edificio accanto al reattore.

Le varie strutture della centrale sono protette da tsunami con barriere frangiflutti efficaci per onde alte fino a 5,7 m sul livello medio mare (figura 1), scelta basata su dati storici ed eventi recenti.



⁶ Per raggiungere una base rocciosa per i reattori a Fukushima si è rimosso lo strato sedimentario di copertura del terreno, abbassando l'altezza sul mare di circa 13 m.

Figura 1. Sezione della centrale di Fukushima in corrispondenza all'unità 1 (1. edificio del reattore; 2. edificio delle turbine; 3. sala dei generatori diesel d'emergenza; 4. tubatura di presa dell'acqua marina; 5. motore della pompa per l'acqua marina di raffreddamento; 6. pompa per l'acqua marina di raffreddamento; 7. fossa per la presa di acqua marina; 8. superficie del mare; 9. barriera a mare alta 10 m).

2. I reattori ad acqua bollente BWR

2.1 I BWR e il sistema di contenimento Mark I

I reattori BWR di Fukushima sono basati su progetto della General Electric americana, sviluppato da Toshiba e Hitachi. Il nocciolo del reattore è immerso in acqua, che svolge due compiti fondamentali: funge da “moderatore”, ossia rallenta i neutroni “veloci” prodotti nelle fissioni (velocità circa 20000 km/s) allo stato di neutroni “termici” (velocità dell'ordine di 2 km/s), estremamente più efficienti a indurre fissioni⁷; costituisce il refrigerante del reattore: asporta il calore prodotto dalla fissione nel nocciolo trasformandosi nel vapore che viene estratto per alimentare le turbine collegate agli alternatori che producono l'energia elettrica.

I reattori operano alla temperatura di 286 °C e alla pressione di 6930 kPa (~68 atm); nella parte superiore del reattore il vapore generato viene essiccato prima di uscire dal recipiente a pressione (*Reactor Pressure Vessel* – RPV) lungo la linea di vapore diretta in turbina; nel vessel entra la linea di rimando dell'acqua di alimentazione. Il vessel (un cilindro d'acciaio dello spessore di circa 15 cm, alto tipicamente 20 m e con diametro di 6 m) costituisce il primo contenitore del reattore e riesce a sopportare pressioni fino a 8240 kPa (~81,6 atm) a 300 °C. A basse pressioni idrogeno e altri gas che si vengono a formare sono ordinariamente sfiatati attraverso filtri che assorbono la quasi totalità degli eventuali radionuclidi liberati dalle barre.

Nei BWR la parte superiore degli elementi di combustibile è immersa in una miscela bifase acqua-vapore che riduce l'effetto di moderazione dei neutroni e la densità di potenza⁸ [nota 8]. I BWR possono essere regolati senza agire sulle barre di controllo ma aumentando o riducendo, mediante pompe di

⁷ Per informazioni essenziali sulla fisica e tecnologia dei reattori nucleari, vedi, ad esempio, Charpak *et al.* (2005).

⁸ Il vapor acqueo non è un efficace rallentatore di neutroni e in ambiente prevalentemente di vapore la reazione a catena si spegne rapidamente: ciò costituisce un fattore di sicurezza intrinseco dei reattori ad acqua, in quanto in assenza di refrigerante il reattore si spegne. Invece, nei reattori moderati a grafite e raffreddati ad acqua la vaporizzazione del refrigerante ha l'effetto di accelerare le reazioni nucleari, aumentando a dismisura la potenza del reattore, come è successo a Chernobyl (Pascolini 2006).

riciclo, il flusso d'acqua in modo da variare il livello della parte in acqua del combustibile rispetto a quella in vapore e quindi il numero delle reazioni di fissione.

Nel sistema di contenimento Mark I (per le unità 1-5) il vessel a pressione (RPV) e i diretti sistemi ausiliari sono installati all'interno di una struttura primaria di contenimento (*Primary Containment Vessel* - PCV) comprendente una camera asciutta sagomata a forma di bulbo di acciaio (spessore 30 mm) rinforzata da uno strato di cemento armato e connessa tramite un sistema di sfiati a una camera umida (cioè contenente acqua in forma liquida) di forma toroidale contenente un serbatoio di sfioro per lo scarico del vapore in caso di emergenza o di sovrappressioni nella camera asciutta (piscina di soppressione delle sovrappressioni); l'acqua nel serbatoio di sfioro (3000 m³ nelle unità 2-5) permette anche di assorbire calore in caso di incidente.

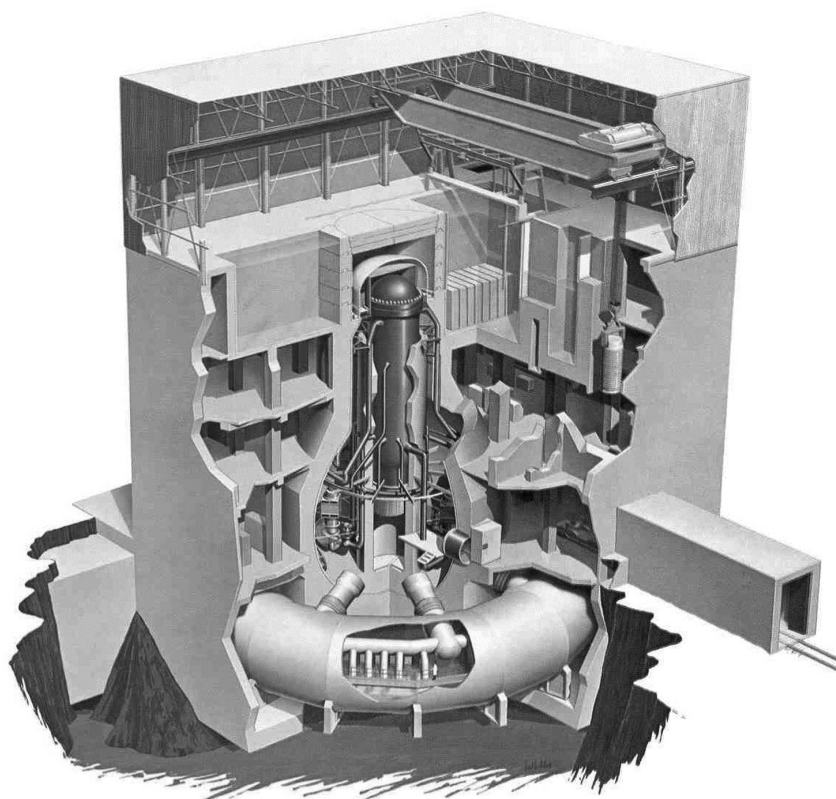
Il PCV ha il compito di proteggere il reattore da ogni interferenza esterna e di contenere l'energia in caso di incidenti con perdita della refrigerazione (*loss-of-coolant accident* – LOCA) ed è in grado di sopportare pressioni fino a 500 kPa (~5 atm). Durante le operazioni normali le camere asciutta e umida sono riempite con azoto inerte a pressione poco superiore a quella atmosferica e il serbatoio di sfioro si trova a temperatura ambiente e sopporta pressioni fino a 300 kPa. Una certa quantità d'idrogeno si forma normalmente per radiolisi dell'acqua; sostanze ricombinanti all'interno del PCV mantengono minima la quantità d'idrogeno libero, mentre l'atmosfera di azoto ne previene reazioni con l'ossigeno.

Una struttura secondaria di contenimento in cemento armato racchiude quella primaria oltre ai sistemi di raffreddamento di emergenza del nocciolo e alla piscina di stoccaggio degli elementi di combustibile; viene mantenuta a una pressione leggermente inferiore a quella atmosferica per evitare eventuali fuoriuscite di gas radioattivi attraverso porosità del cemento e non sopporta sovrappressioni; l'edificio del reattore comprende un altro piano ove è collocato l'impianto per inserire ed estrarre il combustibile ed è protetto da una semplice copertura industriale; quale cautela nell'evenienza di esplosioni di idrogeno il tetto e le pareti laterali del piano superiore dell'edificio sono state concepite come "sacrificabili", ossia cedevoli per attenuare l'onda d'urto sulle strutture sottostanti. La figura 2 mostra uno schema dell'edificio dei reattori 1-5 di Fukushima (l'unità 6 ha una struttura di contenimento Mark II più avanzata).

Figura 2.

Schema degli elementi strutturali delle unità 1-5 della centrale di Fukushima

2.2 I sistemi di raffreddamento del nocciolo



In condizioni operative normali il sistema di raffreddamento primario introduce nel vessel, mediante potenti pompe, acqua leggermente riscaldata per mantenere la copertura del nocciolo compensando il vapore surriscaldato che viene estratto per far girare le turbine; un sistema secondario raffredda il vapore all'uscita dalle turbine condensandolo nell'acqua che ritorna nel nocciolo; il circuito secondario utilizza quale refrigerante acqua di mare prelevata mediante pompe elettriche e il calore residuo del condensatore viene disperso nell'oceano, che costituisce il pozzo freddo dell'impianto (la centrale non utilizza torri di raffreddamento, tipiche di altre centrali termiche).

La refrigerazione del nocciolo deve continuare anche a reattore spento: anche se non vi è produzione di energia a seguito di fissioni, la radioattività del combustibile, dei prodotti di fissione e del materiale attivato dai neutroni produce calore e il reattore conserva una potenza residua, che allo spegnimento raggiunge tipicamente il 6% della potenza d'esercizio, per ridursi nel giro di qualche ora ai valori minimi della configurazione di "spegnimento freddo" se la refrigerazione continua regolarmente. In queste condizioni il raffreddamento del reattore è garantito da uno specifico sistema di rimozione del calore residuo (*Residual Heat Removal* - RHR), connesso alle pompe di riciclo, che utilizza un proprio scambiatore di calore con dissipazione finale in

mare; anche le pompe di questo sistema funzionano elettricamente. A reattore spento la linea di vapore mediante un by-pass raggiunge direttamente il condensatore, evitando le turbine, e il calore finisce in mare.

Se invece non si riesce a estrarre il calore residuo, il nocciolo si riscalda, l'acqua presente evapora o bolle con un continuo aumento di pressione, che può superare la resistenza del vessel fino a farlo esplodere; l'evaporazione porta inoltre alla diminuzione della copertura d'acqua degli elementi di combustibile; a temperature di circa 1200 °C la guaina delle barre si frattura e sopra i 1300 °C si innesca la reazione dello zirconio con il vapore acqueo producendo ossido di zirconio e idrogeno, oltre a liberare ulteriore energia (5,8 MJ per kg di zirconio); a 1850 °C lo zirconio fonde e reagisce con l'ossido d'uranio a produrre una fusione eutettica liberando prodotti di reazione radioattivi: quelli volatili (i gas nobili cripton e xeno, oltre a iodio e cesio) si aggiungono all'idrogeno generato, mentre gli altri si depositano sul fondo del RPV. I metodi che ordinariamente prevengono l'incendio (o esplosione) dell'idrogeno libero non sarebbero in grado di controllare le grandi quantità che vengono generate dallo zirconio nel caso di un LOCA grave, in assenza di sistemi di refrigerazione di emergenza del core (ECCS). Il raggiungimento delle temperature critiche e i fenomeni associati sono estremamente probabili nel giro di qualche decina di ore dopo lo spegnimento, se non viene garantito il necessario raffreddamento.

Se il raffreddamento non viene ripristinato, la temperatura del combustibile cresce e fra i 2500 e 2850 °C le barre del combustibile fondono creando il "corium", una miscela fusa di combustibile, zirconio e acciaio che cade sul fondo del vessel e in presenza d'acqua residua solidifica fratturandosi; poiché l'acciaio del vessel fonde a circa 1500 °C c'è la possibilità che il corium penetri nel vessel stesso o lo perfori fino a danneggiare il contenitore primario⁹ [nota 9]. Una potenziale fusione totale del nocciolo sarebbe molto più probabile nel caso di un LOCA mentre il reattore funziona a piena potenza che non a reattore spento.

Anche il materiale esausto nelle piscine di stoccaggio deve venir raffreddato per evitare l'evaporazione dell'acqua di copertura, con conseguenti possibili reazioni dello zirconio con liberazione di idrogeno, che in presenza di ossigeno può incendiarsi ed esplodere danneggiando le barre. Nel caso di grave perdita d'acqua ad alte temperature la reazione zirconio-vapore può auto-sostenersi incendiando la guaina, e il fronte del fuoco si propaga lungo l'elemento di combustibile.

Dato il ruolo cruciale del raffreddamento, i reattori possiedono sistemi

⁹ Nell'incidente di Three Mile Island (1979), unico incidente in cui si ebbe la fusione di circa metà del nocciolo, il corium penetrò per 15 mm nello spessore di 225 mm d'acciaio del vessel, rendendolo incandescente per circa un'ora, ma non lo perforò.

ridondanti di sicurezza per evitare i rischi del surriscaldamento del nocciolo e le possibili conseguenze: ogni unità possiede un *Emergency Core Isolation Cooling System* (ECICS), operante con diversa modalità sia ad alta che a bassa pressione, per iniettare nel vessel acqua dal serbatoio di sfioro e da una vasca esterna; ad alta pressione utilizza turbine a vapore e quando la pressione diminuisce si collega al RHR.

L'unità 1 ha un condensatore d'isolamento (IC) per il raffreddamento passivo del nocciolo con la capacità di rimuovere calore per 8 ore: opera mediante circolazione naturale a gravità di refrigerante attraverso uno scambiatore di calore immerso in una grande vasca d'acqua posta nell'edificio del reattore sopra il vessel stesso e scarica il vapore in un condensatore esterno. Le unità 2-5 possiedono un *Reactor Core Isolation Cooling* (RCIC), che entra in funzione automaticamente in caso di LOCA per fornire acqua al nocciolo (senza un circuito di rimozione del calore): utilizza una piccola turbina alimentata dal vapore comunque prodotto dal calore di decadimento per iniettare acqua da una cisterna esterna o dal serbatoio di sfioro. Tutti questi sistemi richiedono una certa potenza elettrica per aprire le valvole e controllare le operazioni, utilizzando in alcuni casi batterie a corrente continua. Negli anni '90 la TEPCO ha inoltre installato un sistema di fornitura d'acqua al vessel attraverso l'impianto antincendio delle unità, collegandosi al circuito del RHR.

3. L'evento sismico e gli effetti immediati

3.1 Il terremoto e lo tsunami

Il terremoto dell'11 marzo 2011 (14:46 ora locale), con epicentro in mare a 130 km dalla penisola di Ojika alla profondità 24 km, ebbe una durata di quasi 3 minuti; questo raro terremoto doppio raggiunse magnitudine 9 MMS (energia liberata in superficie $1,9 \pm 0,5 \times 10^{17}$ J, accelerazione 2933 Gal) con assestamenti immediati alle 15:06 (7,0 MMS), 15:15 (7,4 MMS) e 15:26 (7,2 MMS); vi furono vari precursori, il più intenso (magnitudo 7,2 MMS) il 9 marzo. Il fenomeno sismico è previsto continuare per alcuni mesi: all'8 luglio sono state registrate 517 scosse di magnitudine superiore a 5 MMS, di cui 85 superiori a 6 MMS e 5 oltre i 7 MMS. Il sisma ha generato una serie di enormi onde di tsunami, che hanno raggiunto l'altezza massima di 38,9 m a Aneyoshi (Miyako) e inondato e devastato un'area di circa 560 km², rendendosi causa di quasi la totalità dei danni e delle vittime.

Alla centrale di Fukushima Dai-ichi il sisma ha raggiunto la magnitudine 7 MMS (accelerazioni massime: orizzontale 550 Gal e verticale 302 Gal), e i sistemi di sicurezza antisismici hanno automaticamente spento tutti i reattori attivi nel giro di 2 s, interrompendo le reazioni di fissione con l'inserzione totale delle barre di controllo; come previsto in caso di spegnimento, la linea vapore è

stata automaticamente dirottata al condensatore, evitando la turbina che, per la sua grande mole, rappresenta un punto debole del circuito primario durante un sisma. La principale conseguenza del terremoto è stata la totale interruzione della fornitura elettrica alla centrale, a seguito di danni alle 6 linee esterne e alle centrali di commutazione interne; entrarono allora immediatamente in funzione 12 generatori diesel d'emergenza (uno era in riparazione).

Nonostante l'intensità del sisma abbia superato i limiti di resistenza di progetto per le unità 2 (accelerazione 550 Gal, contro 438 Gal), unità 3 (accelerazione 507 Gal, contro 441 Gal) e unità 5 (accelerazione 548 Gal, contro 452 Gal), tutti gli impianti hanno funzionato regolarmente durante e immediatamente dopo il terremoto, assicurando le tre funzioni fondamentali di sicurezza: controllo della reattività, rimozione del calore dal nocciolo e confinamento dei materiali radioattivi.

Alle 15:30, 44 minuti dopo il terremoto, la centrale viene raggiunta dal primo fronte dello tsunami, con onde fino a 14-15 m d'altezza, superando di gran lunga la protezione prevista e inondando tutta la centrale. La violenza delle onde e dei rottami trascinati ha devastato il sito, danneggiando o distruggendo molti edifici, fra cui la centrale elettrica principale, sistemi di chiusura, cisterne, strade e collegamenti interni, con allagamenti fino a 5 m di altezza e deposizione su tutto il sito di sabbia, melma, detriti e rottami; due persone rimangono uccise, che si aggiungono a una vittima causata dal terremoto.

I danni più gravi riguardano le funzioni di sicurezza della centrale: vengono immediatamente distrutti gli impianti di presa dell'acqua marina per i sistemi di raffreddamento sia dei condensatori dei circuiti principali che di quelli degli impianti ausiliari e in particolare dei RHR; sono interrotte le connessioni alla rete idrica esterna e al pozzo finale di calore (l'oceano), rendendo così impossibile lo scarico definitivo del calore prodotto; gli edifici delle turbine sono allagati mettendo fuori uso i 10 generatori ausiliari ivi installati e anche le connessioni elettriche degli EDG operanti ad aria delle unità 2 e 4, per cui rimane operativo un solo EDG presso l'unità 6; anche le batterie delle unità 1 e 2 finiscono sott'acqua e non possono venir impiegate; le batterie a corrente continua dell'unità 3 si salvano garantendo illuminazione nella sala controllo e il funzionamento di alcuni strumenti di misura e di controllo per circa 30 ore, finché si scaricano e non possono venir ricaricate per mancanza di corrente alternata; in assenza di potenza elettrica tutti gli edifici, e in particolare le sale controllo, rimangono all'oscuro, gran parte degli strumenti di misura diventano inutilizzabili¹⁰ [nota 10], e poiché sono di tipo analogico (la centrale è degli anni

¹⁰ Nei primi giorni dopo la perdita di potenza elettrica molte misure dei parametri dei reattori vennero eseguite manualmente con strumentazione alimentata da batterie recuperate dalle auto distrutte dallo tsunami. Tali batterie e compressori per martelli pneumatici sono stati anche usati per aprire o ridirigere manualmente valvole dei circuiti idrici e delle linee di sfiato

'70) non è possibile scaricare i dati e utilizzarli in modo remoto nelle successive azioni di diagnosi e di riparazione; vengono meno anche la distribuzione di aria compressa e altri servizi; gran parte delle attrezzature, degli equipaggiamenti di sicurezza, dei dosimetri e dei pezzi di ricambio vanno persi o sono irraggiungibili; ulteriore problema la difficoltà di comunicazioni interne (il centro di controllo delle emergenze riesce a comunicare con le squadre al lavoro solo attraverso un telefono in ciascuna sala controllo) e con l'esterno.

La vastità della devastazione dell'area circostante, con enormi danni alle infrastrutture e alle vie di comunicazione, e i problemi agli altri impianti nucleari più vicini resero problematiche forme di assistenza esterne. In tali gravissime condizioni, i tecnici della centrale si trovarono ad affrontare una situazione senza precedenti per la molteplicità dei problemi simultanei posti dalla sicurezza dei sei reattori, delle sei piscine di stoccaggio delle unità e di quella grande centrale, oltre al deposito di contenitori di elementi asciutti; il numero di persone disponibili al momento dell'incidente (130 operatori e 270 addetti alla manutenzione) era assolutamente insufficiente a gestire il controllo e il recupero di tutte le strutture coinvolte.

Va inoltre osservato che parte del personale aveva perso casa, e anche familiari, nel disastro e inizialmente dovette vivere in abitazioni improvvisate con gravi difficoltà e privazioni. Particolarmente utile si è dimostrato, in particolare durante le prime fasi delle operazioni di emergenza, il robusto edificio antisismico costruito nel 2007, dopo il terremoto che colpì la centrale Kashiwazaki-Kariwa, protetto anche dallo tsunami e dotato di sistemi di aerazione filtranti in grado di assicurare piena abitabilità a oltre 2000 persone anche in caso di emissioni radioattive; qui venne posto il centro di controllo delle emergenze e fu utilizzato come rifugio del personale impegnato nelle operazioni di intervento (inclusi tecnici esterni, i vigili del fuoco e i militari accorsi in aiuto) nei momenti critici che si sono succeduti. Una base logistica per preparare il personale d'emergenza, con alloggi, mense e servizi, attrezzata anche per controlli sanitari, venne creata (17 marzo) nel villaggio J, un centro per allenamento calcistico, a circa 20 km dalla centrale.

3.2 La gestione dell'emergenza

La base legale per la gestione delle emergenze nucleari in Giappone è data dall'*Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness* (ASMCNEP), che precisa responsabilità e attività dei vari attori in caso di emergenze, i ruoli e gli obblighi dei gestori degli impianti, delle autorità locali e di quelle nazionali. Il sistema di risposta all'emergenza si articola su tre

del vapore.

livelli: il governo centrale crea un centro direttivo generale d'emergenza (presieduto dal primo ministro), istituisce (sotto la direzione del vice ministro anziano del ministero dell'economia, commercio e industria (METI) centri d'emergenza locali, prepara piani e procedure nazionali e prende decisioni sulle questioni e contromisure più importanti. I governi locali (prefetture) operano il proprio centro d'emergenza locale e sono responsabili del monitoraggio della situazione, delle azioni protettive urgenti e delle contromisure a lungo termine, coinvolgendo anche le singole municipalità. La società che esercisce una centrale nucleare è responsabile della risposta d'emergenza sul sito e della notificazione degli eventi al governo nazionale, alle prefetture e alle municipalità.

Nel caso dell'incidente di Fukushima, la devastazione del territorio causata dal terremoto e dallo tsunami ha impedito la piena realizzazione delle strutture e procedure previste e il centro nazionale ha svolto anche funzioni di competenza di centri locali¹¹; in particolare il ministero dell'educazione, cultura, sport, scienza e tecnologia (MEXT) ha curato le misure e le analisi della radioattività ambientale.

Il rapporto degli esperti internazionali ha osservato che il sistema di reazione giapponese per la sua complessità strutturale e organizzativa comporta il rischio di ritardi nel prendere decisioni urgenti, ma che le azioni via via intraprese sono state corrette e hanno permesso una risposta efficace all'emergenza, pur nelle situazioni inattese e nella vastità dei problemi da affrontare.

Sulla base di quanto previsto dall'ASMCNEP (articolo 10), la direzione della centrale notificò alle ore 15:46 dell'11 marzo al governo nazionale e alle autorità locali l'emergenza dovuta a "eventi operativi anormali"¹² [nota 12]; come prescritto, il METI istituì nel giro di 60 minuti i centri d'emergenza locali e la prefettura di Fukushima ordinò l'evacuazione della popolazione entro un raggio di 2 km dall'unità 1 della centrale, estesa poi in giornata a 3 km. Intanto il governò proclamò lo stato d'emergenza nucleare e alle 19:03 entrò in piena funzione anche il centro direttivo generale d'emergenza. Il giorno successivo, a causa dell'aumento di pressione nel reattore 1, il raggio della zona d'evacuazione fu portato a 10 km, come previsto dai piani d'emergenza, e,

¹¹ Va ricordato che oltre all'emergenza nucleare il Giappone doveva affrontare contemporaneamente quelle dovute all'evento sismico e allo tsunami, anche per le quali vennero approntate strutture di risposta a tre livelli, gestite da vari ministeri, prefetture e autorità locali. Di fatto non è prevista alcuna forma legale e operativa di coordinamento fra le unità operative delle varie emergenze.

¹² L'articolo 10 dell'ASMCNEP impone la notificazione se il rateo di dose di radioattività supera prescritti valori: in questo caso in cui anche i rivelatori di radiazione della centrale erano fuori uso, la notifica venne fatta a prescindere dalla radioattività, considerando la generale gravità della situazione

dopo l'esplosione nell'edificio dell'unità 1, venne esteso a 20 km. Il 15 marzo, dopo l'esplosione nell'unità 2, venne richiesto agli abitanti nella zona fra 20 e 30 km di rimanere chiusi in casa (disposizione ritirata il 22 aprile), suggerendo l'evacuazione volontaria.

Interventi di soccorso esterno iniziarono dalla notte dell'11 marzo, dando priorità al raffreddamento dei tre reattori appena spenti e al ripristino di potenza elettrica; unità elettro-generatrici mobili giunsero 9 ore dopo lo tsunami, anche se di potenza inferiore a quelle della centrale, e iniziarono i lavori per creare collegamenti elettrici di emergenza agli impianti, essendo inutilizzabili quelli allagati o danneggiati dallo tsunami. Le linee elettriche esterne furono ripristinate il 20 marzo; le unità 5 e 6 vennero collegate il giorno 21; gli impianti dell'unità 4 il giorno seguente e illuminazione alle sale controllo giunse il 22 (alle 22:45) all'unità 3, il 24 (alle 11:30) alla 1, il 26 (alle 16:46) alla 2 e il 29 marzo (alle 11:50) alla 4.

Per il raffreddamento dei reattori e delle vasche di stoccaggio, venuti meno i sistemi interni, si ricorse ad autopompe, cannoni ad acqua, autobetoniere, elicotteri, utilizzando acqua marina; un primo pontone americano con acqua fresca giunse il 22 marzo e il 26 un secondo da 2280 metri cubi; il 26 entrò in funzione una nuova conduttura da un lago artificiale a 10 km dalla centrale, eliminando del tutto il ricorso all'acqua marina. Accanto ai lavori di pulizia e di ripristino delle varie strutture danneggiate, con consolidamenti per far fronte a possibili terremoti, sono state costruite nuove difese da tsunami per mettere al sicuro la centrale da ondate fino a 10 m.

4. L'evoluzione dei reattori e delle piscine da stoccaggio

4.1 Le unità 1, 2 e 3

Non essendo ancora possibile un controllo completo e una misura dettagliata di tutti i parametri importanti per le unità coinvolte, le ricostruzioni degli avvenimenti a quattro mesi dall'incidente, in parte basate su simulazioni numeriche, non si possono considerare definitive, se non per gli aspetti fondamentali. I reattori delle tre unità hanno seguito, con tempi e modi diversi, un'analoga evoluzione, tipica dell'"emergenza progressiva", secondo la dizione dell'ingegneria dei sistemi: una concatenazione di eventi per cui la perdita di un componente genera una catena di emergenze a valanga.

Alle 15:42, un'ora dopo lo spegnimento, quando venne meno la potenza elettrica, i noccioli dei reattori producevano (per la radioattività dei prodotti di fissione) ancora circa l'1,5% della potenza termica nominale: circa 22 MW il reattore 1 e 33 MW i reattori 2 e 3, potenza sufficiente a far bollire, rispettivamente, circa 35 e 52 m³ d'acqua all'ora, in assenza di interventi esterni, e quindi a dissipare in poche ore l'acqua di copertura del nocciolo. La

perdita di corrente alternata impedì in tutte le unità l'entrata in funzione dei sistemi di raffreddamento RHR e quelli d'emergenza ECICS nelle unità 1 e 2.

Nell'unità 1 allo spegnimento del reattore venne fatto intervenire il condensatore d'isolamento (IC) per accelerare il raffreddamento; l'IC rimase l'unico sistema disponibile per raffreddare il nocciolo dopo lo tsunami, ma cessò di funzionare dopo qualche ora e venne predisposta la fornitura d'acqua attraverso il sistema antincendio, che iniziò dalle 5:46 del 12 marzo mediante autobotti dei pompieri.

Una ricostruzione dell'evoluzione del nocciolo compiuta a posteriori dalla TEPCO e dalla NISA sulla base di simulazioni computerizzate porta a concludere che già dopo tre ore dallo spegnimento l'acqua di copertura era scesa a lambire la sommità degli elementi e dopo altri 90 minuti tutto il nocciolo rimase scoperto, portando al danneggiamento delle barre e alla fusione della parte centrale del nocciolo dopo 5 ore dallo spegnimento; dopo altre 10 ore tutto il nocciolo si considera fuso e il combustibile caduto alla base del vessel, che tuttavia appare ancora intatto.

La reazione dello zirconio con l'acqua produsse una grande quantità di idrogeno, che si mescolò con il vapore liberato dall'ebollizione dell'acqua di copertura e con prodotti di reazione radioattivi volatili (soprattutto iodio, xenon, cripton e cesio) liberati dalle barre danneggiate e fuse. Questi gas ad alta pressione furono fatti fuoriuscire in maniera controllata col vapore dal vessel (per abbassarne la pressione interna) e condensati nella vasca di soppressione, aumentando la pressione nella struttura di contenimento primario, fino a 900 kPa nel RPV e 850 kPa nel PCV; si rese così necessario sfiatare il vapore anche all'esterno del PCV per ridurre la pressione entro i limiti di sicurezza, utilizzando la specifica condotta; mancando potenza elettrica si ricorse a strumentazione di fortuna ma l'operazione (ore 14:30 del giorno 12 marzo) ebbe un minimo effetto e la maggior parte dei gas si raccolse nell'ultimo piano dell'edificio, ove l'idrogeno reagì (in presenza di uno o più inneschi) con l'aria esplodendo (ore 15:36).

L'esplosione scoperchiò l'edificio dell'unità 1, con gravi danni al piano servizi, disseminando ulteriori rottami e liberando materiali radioattivi in tutto l'edificio, nella centrale (in particolare nelle sale controllo delle unità 1-4, ove gli operatori dovettero alternarsi frequentemente) e nell'atmosfera.

Intanto, verso le 14:30 del 12 marzo, si esaurì la disponibilità d'acqua fresca delle autobotti (80 t) e dalla sera dello stesso giorno si procedette a iniettare nel vessel acqua di mare borata (per ridurre il rischio di reazioni a catena) utilizzando il circuito antincendio e le pompe mobili dei vigili del fuoco; questa forma di raffreddamento rimase l'unica fino al 23 marzo quando si rimise in funzione la normale linea di fornitura d'acqua, alimentata dal 25 con acqua fresca (con periodiche aggiunte di boro). Il 24 marzo il vessel raggiunse la

temperatura massima di 400 °C, superando il limite di progetto di 302 °C, e si procedette ad aumentare il flusso d'acqua; da allora la temperatura del vessel ha iniziato a scendere e da aprile rimane sotto i 120 °C; a fine luglio la temperatura è di 105 °C e la sua pressione è quella atmosferica. Per prevenire ulteriori esplosioni d'idrogeno dai primi di aprile si inietta azoto nel vessel. Il 26 aprile iniziarono le ispezioni mediante robot dell'edificio dell'unità e il 20 maggio vi fu un primo sopralluogo di tecnici per misure delle condizioni del reattore. Nell'edificio dell'unità è stato installato un sistema di filtrazione dell'aria per ridurre l'emissione radioattiva. Il piano terra dell'edificio è sommerso d'acqua contaminata alta 4m.

Nell'unità 2 l'ECICS si fermò alla perdita di potenza elettrica e, mediante riallineamento manuale del sistema di valvole, venne messo in azione il sistema RCIC, che, come descritto precedentemente, per la pompa utilizza una turbina azionata dal vapore che esce dal vessel e poi si scarica nel serbatoio di sfioro. Il RCIC continuò a funzionare regolarmente mantenendo sommerso il nucleo fino alle 13:25 del 14 marzo, quando l'acqua della vasca di soppressione iniziò a bollire.

La perdita del raffreddamento causò una rapida ebollizione nel vessel e si stima che 76 ore dopo lo spegnimento gli elementi di combustibile rimasero completamente esposti, portando a una fusione parziale del nocciolo una ventina d'ore dopo, con liberazione di idrogeno e radionuclidi di fissione; anche il vessel appare danneggiato.

Sei ore circa dopo la cessazione del RCIC, e fino al 26 marzo, si fornì acqua di mare utilizzando un'autopompa dei vigili¹³ [nota 13] e scaricando il vapore nel serbatoio di sfioro. Tale procedura di raffreddamento, mancando un pozzo termico esterno, portò a un continuo aumento della temperatura e della pressione nella struttura primaria di contenimento PCV fino a 650 kPa; con notevoli difficoltà si procedette a sfogare il gas il 13 e il 15 marzo e si aprì un pannello di sfogo sul tetto per evitare esplosioni di idrogeno analoghe all'unità 1.

Il giorno 15 alle ore 6:14 si produsse una probabile rottura del serbatoio di sfioro, con una brusca decompressione del PCV, probabilmente a causa di un'esplosione d'idrogeno, con rilascio di una notevole quantità d'acqua altamente radioattiva e grave contaminazione atmosferica. Dal 17 marzo la pressione del vessel è quella atmosferica e quella della camera asciutta circa 200 kPa; alla fine di luglio la temperatura del vessel si mantiene a 120 °C. Dal 26 marzo la fornitura di refrigerante avviene in modo simile all'unità 1.

Il 2 aprile venne scoperta una frattura larga 20 cm nel pozzo dei cavi elettrici delle pompe di presa acqua di mare, da cui fuoriusciva acqua altamente radioattiva (1000 mSv/h) proveniente dall'edificio dell'unità; il danno fu riparato il

¹³ Globalmente nel reattore 2 vennero iniettate 9197 t di acqua di mare, periodicamente addizionata di acido borico; la fornitura dovette venir sospesa per qualche tempo, quando l'autopompa finì il carburante.

6 aprile, interrompendo lo scarico d'acqua contaminata in mare.

Il sistema RCIC entrato in funzione al momento dello tsunami anche per l'unità 3 si fermò alle 11:36 del 12 marzo; dopo un'ora entrò in funzione l'ECICS, controllato da batterie a corrente continua, ma si arrestò alle 5:13 del giorno successivo; solo dopo 7 ore fu possibile stabilire un sistema alternativo di raffreddamento (mediante acqua di mare borata attraverso il sistema antincendio) dopo lo sfogo di vapore ad alta pressione (utilizzando batterie d'auto e strumentazione d'emergenza). Nel frattempo, a partire dalle ore 9 del 13 marzo (secondo la ricostruzione della NISA), il nocciolo iniziò a danneggiarsi seguendo l'evoluzione descritta per le unità precedenti, anche se i calcoli indicano che la fusione sia solo parziale e i danni minori rispetto agli altri due reattori.

Il 14 marzo mattina si procedette a un nuovo sfogo di gas per ridurre la pressione, ma l'operazione riuscì solo parzialmente e idrogeno si raccolse in gran quantità nel piano di servizio, producendo una violentissima esplosione alle ore 11:01, che fece saltare gran parte della copertura e delle pareti e demolì la parte superiore dell'edificio, disseminando una gran mole di detriti altamente radioattivi.

Dal 25 marzo, dopo iniezione di 4495 t d'acqua marina, anche per l'unità 3 si passò ad acqua fresca analogamente all'unità 1. Mediante robot si procedette a pulizie (1° luglio) e a un rilievo dosimetrico (2 luglio) nell'edificio del reattore. Il 19 luglio si completò l'installazione di una copertura temporanea sul tetto danneggiato dell'edificio turbine. Alla fine di luglio la temperatura del vessel si mantiene a 108 °C a pressione atmosferica.

4.2 Le unità 4, 5 e 6

Il reattore dell'unità 4 era del tutto privo di combustibile, per cui si sono posti problemi di raffreddamento di emergenza solo per la piscina di stoccaggio, come vedremo più oltre. Il 15 marzo alle 6:00 si ebbe una violenta esplosione al quarto piano dell'edificio dell'unità con distruzione della copertura e di pareti laterali, seguita da un incendio al terzo piano (alle 9:38), risoltosi da solo. L'esplosione coinvolse anche l'edificio dell'unità 3, aumentando i danni alle sue sovrastrutture.

Anche questa esplosione viene considerata dovuta a idrogeno, che in un primo tempo si pensò liberato nella piscina di stoccaggio a seguito di scopertura e danneggiamento degli elementi e successiva reazione dello zirconio con il vapor d'acqua. Successive analisi dei nuclidi presenti in campioni d'acqua prelevata dalla vasca e immagini delle condizioni della vasca stessa escludono questa ipotesi e favoriscono la possibilità che ci sia stato un accumulo di idrogeno a seguito del tentativo di sfiato della pressione dell'unità 3 del giorno precedente; poiché le linee di sfiato hanno un tratto comune è probabile che parte dell'idrogeno si sia diffuso all'ultimo piano dell'edificio dell'unità 4.

I reattori 5 e 6, per la loro posizione più alta subirono meno i danni dello tsunami, tuttavia i locali turbina vennero allagati con la perdita dei 3 generatori d'emergenza e le connessioni elettriche collocate nei seminterrati, rimasero interrotti la presa d'acqua marina e lo scarico in mare del calore, mentre si salvò l'EDG dell'unità 6 raffreddato ad aria. Venuto meno il sistema di raffreddamento RHR, non più connesso al mare, la temperatura nei due reattori salì rapidamente fino a 128 °C (unità 5) e 100 °C (unità 6) e la pressione raggiunse 8 MPa nell'unità 5. Utilizzando l'EDG dell'unità 6 si poterono salvare le funzioni essenziali di entrambi i reattori e controllare pressione e temperatura dal 13 marzo pompando acqua da un condensatore attraverso un circuito di sicurezza e scaricandola nel serbatoio di sfioro.

Il 19 marzo venne realizzato un circuito alternativo di raffreddamento del RHR (utilizzando acqua di mare e pompe temporanee) riportando il 20 marzo entrambi i reattori nella condizione di spegnimento freddo; le unità ricevono potenza elettrica esterna dal 22 marzo (dal 21 l'unità 5) e da aprile si sta procedendo a liberare dall'acqua gli edifici alluvionati, trasportandola a cisterne temporanee, e a ripristinare tutte le funzioni operative.

4.3 Le piscine di stoccaggio

Alla perdita di corrente, anche le pompe dei circuiti di raffreddamento delle piscine di stoccaggio si fermarono, non essendo collegate a un EDG; mediante operazioni manuali in situ sarebbe stato possibile ricorrere ad altri sistemi di raffreddamento, in particolare il RHR, alimentati da EDG, ma le necessarie operazioni non furono eseguite prima dell'arrivo dello tsunami, che mise fuori uso gli EDG delle unità 1-5. L'EDG dell'unità 6 venne utilizzata saltuariamente per raffreddamento forzato delle piscine delle unità 5 e 6.

La grande copertura d'acqua, anche se potenzialmente ridotta in qualche unità a causa di versamenti dovuti al terremoto¹⁴, e la relativamente limitata potenza termica concedeva molti giorni di sicurezza prima che l'acqua potesse ridursi in seguito a ebollizione fino a scoprire la testa degli elementi, e pertanto non furono necessarie azioni immediate; al 14 marzo la temperatura nella piscina dell'unità 4 raggiunse 84 °C e in quella centrale 57 °C.

Le esplosioni che distrussero le coperture delle unità 1, 3 e 4 permisero l'accesso remoto alle relative piscine di stoccaggio per iniezioni periodiche di acqua (inizialmente di mare) con elicotteri, cannoni d'acqua e autopompe (dal

¹⁴ A causa della mancanza di strumentazione e per gli alti livelli di radioattività rimase impossibile determinare il livello effettivo dell'acqua nelle piscine delle unità 1-4 per molti giorni dopo il sisma. La situazione più delicata riguardava quella dell'unità 4, per il grande numero di elementi contenuti: in assenza di raffreddamento, richiede circa 100 m³/d di acqua per recuperare l'evaporazione prodotta dal calore di decadimento.

17 marzo nell'unità 3); dal 22 marzo (per l'unità 4) venne utilizzata un'autobetoniera dotata di un bico di 58 m, che permise più precise operazioni attraverso gli edifici danneggiati (dal 27 per l'unità 3 e dal 31 per la 1). Per l'unità 2 (dal 20 marzo) si poterono utilizzare condutture rimaste accessibili; in seguito sono stati realizzati nuovi circuiti alternativi con scambiatori di calore in prossimità degli edifici per le unità 2, 3 e 4 e si sta lavorando per un'analogia soluzione anche per l'unità 1. La piscina dell'unità di stoccaggio centrale venne abboccata il 21 marzo e i sistemi normali di raffreddamento ripristinati tre giorni dopo.

Da luglio, tutte le piscine hanno piena copertura e temperature fra 30 e 40 °C; osservazioni fotografiche indicano che le condizioni degli elementi sono buone, con danni limitati. Sono state rinforzate le strutture di sostegno della piscina (peso oltre 2000 t) dell'unità 4, il cui edificio è stato danneggiato dall'esplosione.

5. La contaminazione radioattiva

I maggiori problemi sanitari e sociali degli incidenti nucleari sono dovuti alle emissioni radioattive nell'ambiente circostante. L'impatto biologico delle radiazioni ionizzanti è dovuto al trasferimento di energia agli atomi e molecole delle cellule viventi, che possono così venir danneggiate.

Gli effetti di alte dosi¹⁵ possono essere immediati o a lungo termine. Primi disturbi si rendono evidenti per dosi efficaci immediate sopra i 300 mSv; una dose di 1 Sv su tutto il corpo causa una grave patologia (sindrome acuta da radiazione) che oltre 3 Sv ha il 50% di probabilità di risultare mortale entro 30 giorni in assenza di trattamento medico; sopra 8 Sv si ha letalità sicura. Effetti ritardati di dosi superiori a 200-300 mSv includono la formazione di cataratte oculari e l'induzione di leucemia e cancro in vari organi, mesi e anni dopo l'esposizione. Dosi inferiori non hanno effetti deterministici, ma possono aumentare, in modo stocastico, la probabilità di alcune patologie nel corso dell'esistenza.

La radiazione naturale in Giappone (come in Europa) varia a seconda delle località con dosi da 2 mSv a 4 mSv all'anno (in alcune località mondiali

¹⁵ L'unità di misura della radioattività è il bequerel (simbolo Bq): 1 Bq=1 decadimento al secondo. L'unità di misura dell'esposizione alle radiazioni (dose) è il gray (simbolo Gy): 1 Gy corrisponde all'assorbimento di 1 joule di energia per chilogrammo di massa. Poiché non tutte le radiazioni hanno gli stessi effetti biologici, in dosimetria si usa come unità di dose efficace il sievert (simbolo Sv), che si ottiene moltiplicando la dose in gray per coefficienti caratteristici delle varie radiazioni (1 per elettroni, raggi X e gamma, 2 per protoni, fra 5 e 20 per neutroni, a seconda dell'energia, 20 per raggi alfa) e del tipo di tessuti colpiti (0,01 per la pelle, 0,05 per la tiroide, 0,12 per il midollo osseo, 0,2 per le gonadi).

supera i 100 mSv/y). I limiti di dose fissati in Giappone per il personale delle centrali è di 100 mSv in 5 anni, con un massimo di 50 mSv in un anno e 5 mSv in 3 mesi per le donne; per gli operatori impegnati in operazioni di emergenza la dose totale (interna ed esterna) individuale, inizialmente fissata in 100 mSv, è stata portata il 17 marzo dalla NISA a 250 mSv (per tali interventi il limite della *International Commission on Radiological Protection* è 500 mSv).

In condizioni di esercizio normale nei reattori i neutroni producono nell'acqua del primario, per cattura da ossigeno, il radionuclide azoto-16, che decade rapidamente (tempo di dimezzamento 7 s), con emissione gamma di alta energia¹⁶; si possono anche liberare dei gas nobili e il volatile iodio-131 dagli elementi di combustibile, sostanze che vengono filtrate nelle emissioni di gas e vapori.

Nelle barre del combustibile sono presenti molti radionuclidi, dagli isotopi del cripton a quelli del plutonio, e parte di essi sono fuoriusciti dai reattori danneggiati della centrale disperdendosi sia nell'atmosfera che nell'acqua; i principali radionuclidi emessi sono lo iodio-131 e il cesio-137. Lo iodio-131 viene facilmente assorbito dal corpo e si concentra nella tiroide; poiché decade rapidamente (tempo di dimezzamento 8 giorni) nell'inerte xeno-131, richiede protezione nelle fasi iniziali dell'emissione e nel giro di tre mesi non pone praticamente più problemi.

Il cesio-137 è un forte emettitore gamma con un tempo di dimezzamento di 30 anni, per cui contamina a lungo il terreno dove ricade; è solubile e può venir assorbito dall'organismo, ma non si concentra in organi speciali e nel corpo si dimezza in 70 giorni; per una valutazione complessiva dell'emissione radioattiva si converte la radioattività del cesio in iodio-equivalente, moltiplicandola per un fattore 40. Un altro importante radionuclide emesso è il cesio 134, che ha un tempo di dimezzamento di 2 anni.

5.1 Emissioni atmosferiche

Il primo segnale di emissione radioattiva dalla centrale si ebbe il 12 marzo dopo l'esplosione d'idrogeno nell'unità 1, quando si rilevarono iodio e cesio nei pressi dell'impianto, segnale del danneggiamento del combustibile. Ulteriori iodio-131, cesio-137 e cesio-134 continuarono a venir emessi nei giorni seguenti, in particolare dopo le esplosioni nell'unità 3 e il danneggiamento della vasca di soppressione dell'unità 2; considerabili quantità di iodio-131 e xeno-133 uscirono negli sfiati, ma la maggior parte del cesio-137 (oltre il 90%) e del cesio-134 fuoriuscirono dall'unità 2 dopo il 15 marzo.

Va osservato che la maggior parte degli strumenti di misura di

¹⁶ A causa della radioattività gamma dell'azoto-16, durante le operazioni dei BWR non è possibile accedere al locale turbine.

radioattività nella centrale e in tutta la prefettura di Fukushima erano andati distrutti in seguito allo tsunami, rendendo difficile la ricostruzione della dispersione radioattiva nei primi giorni. Dal 15 marzo Il MEXT ha assunto la responsabilità del monitoraggio ambientale con nuova strumentazione e la collaborazione della IAEA e del Dipartimento dell'energia americano, e controlla la radioattività al suolo, in aria e in mare, nell'acqua potabile e nella vegetazione¹⁷.

Misure della IAEA mostrano che i livelli di radiazione nell'atmosfera presentano 3 picchi dal 12 marzo, con una notevole emissione il giorno 15, ma si sono stabilizzati dal 16 marzo a livelli notevolmente superiori al normale, ma tali da permettere le operazioni del personale; da aprile le dosi sono andate diminuendo fino a scendere a metà luglio a circa 1,7 mSv/y ai bordi della centrale; l'emissione totale il 5 aprile era stimata in 154×10^{12} Bq/d, per scendere a 24×10^{12} Bq/d il 26 aprile e di un ulteriore fattore mille (a 4×10^9 Bq/d) a metà luglio; la tabella 2 presenta le concentrazioni di radionuclidi in campioni presi il 26 marzo presso le 4 unità e la tabella 3 riporta misure della NISA in alcuni punti della centrale.

Nuclidi	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4
Iodio-131	$1,5 \times 10^5$	$1,3 \times 10^7$	$3,2 \times 10^5$	$3,6 \times 10^2$
Cesio-134	$1,2 \times 10^5$	$2,3 \times 10^5$	$5,5 \times 10^4$	$3,1 \times 10^1$
Cesio-136	$1,1 \times 10^4$	$2,5 \times 10^5$	$6,5 \times 10^3$	$3,7 \times 10^0$
Cesio-137	$1,3 \times 10^5$	$2,3 \times 10^6$	$5,6 \times 10^4$	$3,2 \times 10^1$

Tabella 2. Concentrazioni (in Bq/m³) di radionuclidi in campioni presi il 26 marzo presso le 4 unità danneggiate di Fukushima.

Data	Dose oraria mSv/h	Data	Dose oraria mSv/h
11 marzo	0,05	21 marzo	2,0
14 marzo	12	24 marzo	0,2
15 marzo	400	4 aprile	0,12
16 marzo	3,4	17 aprile	0,1
20 marzo	3	metà luglio	$1,4 \times 10^{-4}$

Tabella 3. Dosi orarie misurate nella centrale di Fukushima dalla NISA.

¹⁷ Attualmente nelle misure di radioattività ambientale sono impegnate 54 università e 47 prefetture, che eseguono misure ogni ora e presentano i dati giornalmente al MEXT. L'informazione è resa pubblica anche su siti internet.

Tenendo conto dei dati raccolti e di simulazioni numeriche dell'evoluzione dei reattori, la NISA e la NSC hanno prodotto stime della radiazione emessa in iodio-131 e cesio-137 (tabella 4), che risulta circa lo 0,16% del totale presente nei reattori allo spegnimento (circa 81×10^{18} Bq di iodio-131); secondo le ricostruzioni, l'unità 1 ha emesso il doppio di iodio-131 rispetto all'unità 3 e l'unità 2 il decuplo dell'unità 1. La quantità di radiazione individuata ha portato, il 12 aprile, alla classificazione dell'incidente da parte della NISA al massimo grado (7) della scala INES¹⁸, cui precedentemente era stato classificato solo l'incidente di Chernobyl, che comportò un rilascio circa 8 volte superiore (e qualitativamente, soprattutto in termine di tipologia di nuclidi rilasciati, piuttosto diverso). Le stime attuali di rilascio radioattivo sono ancora preliminari, essendo valutata solo l'emissione di iodio-131 e cesio-137, e mancando una precisa ricostruzione dell'evoluzione dei singoli reattori.

	Stima NISA (12 aprile)	Stima NSC (5 aprile)	Stima NISA (giugno)	A Chernobyl
Iodio-131	$1,3 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{17}$	$1,6 \times 10^{17}$	$1,8 \times 10^{18}$
Cesio-137	$6,1 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{16}$	$1,5 \times 10^{16}$	$8,5 \times 10^{16}$
Cesio Iodio-equivalente	$2,4 \times 10^{17}$	$4,8 \times 10^{17}$	$6,1 \times 10^{17}$	$3,4 \times 10^{18}$
Totale Iodio equivalente	$3,7 \times 10^{17}$	$6,3 \times 10^{17}$	$7,7 \times 10^{17}$	$5,2 \times 10^{18}$

Tabella 4. Stime della radiazione totale emessa (in Bq) dalla centrale di Fukushima e confronto con quella emessa a Chernobyl.

5.2 Contaminazione ambientale

La maggior parte della contaminazione radioattiva si estende dalla centrale in direzione nord-ovest, secondo i venti dominanti al momento dell'emissione, interessando in modo significativo e disomogeneo una zona di circa 1000 km²; il 4 aprile nella città di Fukushima il livello di radiazione era di 0,06 mSv/d, 60 volte il valore normale, ma senza rischi per la salute; controlli al di fuori della zona di 20 km il 13 aprile hanno trovato un punto "caldo" presso il

¹⁸ Il livello 7 della scala INES, "incidente estremo", si ha in seguito a rilascio di grandi quantità di radioattività ("superiori a numerose decine di migliaia di terabequerel di iodio-131"), con estesi effetti sanitari e ambientali, tali da richiedere vaste contromisure. Nel caso specifico si sono riconosciuti i seguenti fatti: rilascio radioattivo oltre i limiti, esposizione eccessiva di lavoratori (ma non della popolazione), contaminazione della centrale, danneggiamento delle barriere e del combustibile, persone ferite e problema ancora aperto.

villaggio litate con dosi fino a 0,266 mSv/d, ma altrove la radiazione era inferiore di un fattore 10; alla fine di luglio il massimo livello di radioattività entro 30 km dalla centrale era 0,84 mSv/d osservato a Namie, distante 24 km.

Il governo a metà aprile ha fissato un limite di sicurezza per la popolazione all'aperto di $3,8 \times \text{Sv/h}$ (0,09 mSv/d) e ha decretato l'evacuazione dei territori in cui è prevista, nei prossimi due anni, una dose annua superiore a 20 mSv, che comprendono circa metà della zona entro 20 km dalla centrale e località fino a 40 km in direzione nord-ovest. In tutto sono state evacuate circa 100.000 persone, che potranno far ritorno una volta completamente stabilizzati i reattori danneggiati e bonificato il territorio, bonifica che il governo intende completare entro la primavera del 2012.

Naturalmente tutto il Giappone è stato coinvolto nella ricaduta radioattiva, con dosi decrescenti con la distanza, e misure di radioattività vengono continuamente effettuate. Di fatto in tutto l'emisfero nord sono stati rivelati iodio e cesio radioattivo in relazione alle emissioni dalla centrale; le concentrazioni massime in Europa sono state osservate il 4-5 aprile; al laboratorio ambientale di Monaco della IAEA si sono misurati in tali date $350 \times \text{Bq/m}^3$ di iodio-131, $40 \times \text{Bq/m}^3$ di cesio-137 e $30 \times \text{Bq/m}^3$ di cesio-134, rispettivamente 120, 2000 e 700 volte meno di quelle misurate dopo Chernobyl. Il Comitato scientifico dell'ONU sugli effetti delle radiazioni atomiche (UNSCEAR) ha iniziato uno studio di 12 mesi sul rilascio radioattivo nell'atmosfera e in mare e sulle dosi ricevute dal pubblico e dai lavoratori.

Per impedire che vento e intemperie possano disperdere il materiale radioattivo ricaduto, la TEPCO ha ricoperto 40 ettari della centrale con una resina polimerica che blocca la polvere, dimezzando così la radioattività del suolo; sono stati inoltre rimossi rottami radioattivi dispersi (con dosi da 30-40 mSv/h a 1000 mSv/h) utilizzando mezzi controllati a distanza, riempiendo circa 500 container. Per bloccare le emissioni in atmosfera dall'unità 1 si sta montando una struttura che racchiude completamente l'edificio ($42 \times 47 \text{ m}^2$ di base e alta 54 m) in grado di resistere agli eventi atmosferici (nevicata fino a 30 cm e venti fino a 90 km/h); la struttura è dotata di sistemi di misura e controllo, una condotta d'acqua e sistemi di ventilazione filtranti per $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Analoghe strutture sono previste per le altre 3 unità danneggiate; le unità 1-4 verranno definitivamente dismesse¹⁹, mentre una consultazione popolare deciderà se i reattori 5 e 6 riprenderanno servizio.

Va osservato che man mano si procede al controllo dei vari edifici si

¹⁹ Un progetto di dismissione delle unità 1-4 è stato definito da un consorzio guidato da Hitachi-GE e Toshiba; prevede la rimozione del combustibile in una decina di anni, seguita dal sigillo dei reattori per altri 10-20 anni per permettere il decadimento dei materiali attivati dai neutroni nel vessel, prima di procedere alla demolizione definitiva. Anche l'Areva sta preparando un progetto a tal fine.

scoprono dei punti isolati con altissime concentrazioni di radioattività, che vengono isolati o trattati specificamente.

5.3 Gestione dell'acqua contaminata

Il problema principale per la centrale a partire dalla terza settimana dal terremoto è divenuto la rimozione dell'acqua contaminata presente negli edifici dei reattori e delle turbine, raccolta nei condensatori e nelle fosse e condotti dei cavi e delle tubature, con perdite in mare di acqua con livelli di radioattività superiori a quelli permessi. Alla fine di marzo tutti i volumi disponibili di contenimento attorno alle unità 1-4 (in pratica i condensatori principali e le cisterne di condensazione) erano colmi di acqua contaminata pompata dagli edifici delle unità.

Come già ricordato, fra il 1 e il 6 aprile dall'unità 2 finirono in mare 520 m³ d'acqua con 4700 x 10¹² Bq di attività; altri 250 m³ d'acqua con 20 x 10¹² Bq di attività dall'unità 3 si riversarono nel porto della centrale il 10-11 maggio. Per poter intervenire in condizioni di sicurezza nell'unità 2 era necessario liberarne l'edificio e il locale turbine dall'acqua altamente contaminata ivi presente (fino a 3 x 10¹² Bq/m³ di iodio-131 e 13 x 10¹² Bq/m³ di cesio-137); pertanto il governo²⁰ permise lo scarico in mare fra il 4 e il 10 aprile di circa 10.400 m³ d'acqua leggermente radioattiva (0,15 x 10¹² Bq) dall'impianto centrale di decontaminazione, per far posto a quella più contaminata.

Al 21 maggio erano stati trasferiti 8.000 m³ d'acqua dall'unità 2 all'impianto di trattamento. In tale data giunse alla centrale un pontone-cisterna capace di 10.000 m³ quale contenitore temporaneo per acqua da purificare. Al 12 luglio ci sono ancora circa 100.000 m³ d'acqua che aspettano trattamento (16.980, 25.900, 30.600 e 23.000 m³ nelle 4 unità, rispettivamente), per un'attività globale di circa 750.000 x 10¹² Bq, e 21.000 m³ sono accumulati nella centrale di decontaminazione.

Da giugno opera un nuovo impianto di purificazione dell'acqua contaminata, in grado di trattare 1200 m³ d'acqua al giorno; la prima fase vede la rimozione di oli, la seconda l'assorbimento di cesio su zeolite, la terza la precipitazione di altre impurità mediante vari reagenti; quindi si procede alla desalinizzazione (per osmosi inversa) per produrre acqua fresca da riciclare come refrigerante dei reattori (84 m³/d per le unità 1 e 2 e 216 m³/d per la 3). Al 16 agosto sono stati trattati 49.200 m³ d'acqua, di cui 16.900 riciclati come refrigerante. Sempre da metà giugno si procede alla depurazione dal cesio dell'acqua del porto al ritmo di 30 m³/h, e sono stati installati 109 pannelli di cemento per impedire versamenti in mare.

²⁰ Il governo giapponese presentò scuse formali ai paesi rivieraschi per non averli informati tempestivamente di tale operazione.

La contaminazione radioattiva marina, oltre che ai versamenti deliberati e accidentali, è dovuta alla ricaduta della radiazione atmosferica e al trasporto di materiale radioattivo a seguito delle intemperie; per il suo breve tempo di dimezzamento, lo iodio-131 non è praticamente più presente, mentre il cesio si sta diffondendo verso est lungo la corrente Kuroshio; la grande massa del Pacifico diluirà e disperderà rapidamente questo materiale; misure in mare a 30 km dalla costa mostrano una rapida diminuzione della radioattività fino a livelli estremamente bassi fino da aprile. In luglio è iniziata un'indagine internazionale quadriennale della contaminazione radioattiva dell'ambiente marino in prossimità dell'impianto, condotta dalla IAEA, Australia, Corea del sud e Indonesia.

5.4 Esposizione alle radiazioni

Tutto il personale che ha lavorato sul sito dall'11 marzo (circa 2000 persone impegnate giornalmente, in tutte 7800 al 31 luglio) è stato sottoposto a controllo per l'esposizione alla radioattività, considerando sia la dose esterna che quella interna, mediante contatori per tutto il corpo: l'esposizione media dei 7800 è stata di 7,7 mSv, ma hanno ricevuto dosi superiori a 100 mSv 103 lavoratori, 95 dei quali dosi fra 100 e 200 mSv, 2 fra 200 e 250 mSv e 6 fra 309 a 678 mSv; due di quest'ultimi erano operatori della sala controllo delle unità 3 e 4 che nei primi giorni non avevano respiratori protettivi. Nonostante le dosi superiori al normale ricevute da centinaia di lavoratori, non vi stato alcun caso di sindrome acuta da radiazione e solo pochi interventi sanitari meno gravi. Il 24 marzo 3 lavoratori di una ditta appaltatrice che stendevano cavi nell'unità 3 senza tute protettive complete ricevettero una dose superiore a 170 mSv e due di essi vennero ricoverati per ustioni ai piedi da radiazione beta da acqua contaminata; dopo 4 giorni di trattamento sono stati dimessi senza conseguenze a lungo termine.

Misure preventive e vesti protettive sono state anche prese dai militari e dai vigili del fuoco impegnati in operazioni di soccorso alla popolazione nell'area di 30 km dalla centrale, con controlli dosimetrici della radioattività (limiti di 50 mSv per i militari e di 100 mSv per i vigili del fuoco): nessuna persona è stata trovata aver superato tali limiti.

Per quanto riguarda la popolazione, l'evacuazione della zona fino a 20 km operata fin dal giorno 12 marzo ha evitato ai residenti l'esposizione all'emissione più intensa del 15 marzo, con le possibili conseguenze sanitarie. Il 16 marzo la commissione di sicurezza nucleare (NSC) raccomandò alle autorità locali di far assumere alle persone evacuate di età inferiore a 40 anni una dose (a seconda dell'età) di iodio stabile per prevenire l'ingestione (per esempio con il latte) di iodio-131: pillole e sciroppo (per i bambini) erano state predisposti

nelle zone di rifugio.

Sono stati fissati limiti sulla radioattività dei generi alimentari e scattati controlli in tutte le prefetture; alcuni prodotti agricoli, latte e una specie di pesci della prefettura di Fukushima sono stati trovati temporaneamente eccedere i limiti e esclusi dalla commercializzazione; quantità di iodio-131 eccedenti i limiti previsti per i bambini sono state individuate per un breve periodo nell'acqua potabile di alcune prefetture.

Alcun effetto dannoso per la salute è stato trovato nei 195.345 residenti in prossimità della centrale sottoposti a controllo al 31 maggio e nessuno dei 1080 bambini sotto i 15 anni cui è stata esaminata la tiroide ha superato la dose critica di $0,2 \times \text{Sv/h}$. La prefettura di Fukushima prevede un controllo medico globale di tutta la popolazione (2 milioni). Il governo ha costituito un gruppo di esperti per monitorare le condizioni sanitarie dei residenti; il gruppo comprende personale della prefettura di Fukushima e di facoltà universitarie di medicina, incluse quelle di Hiroshima e Nagasaki.

Anche se l'incidente nucleare non ha causato la perdita di vite umane e non ha creato problemi sanitari, sta tuttavia avendo un grave impatto sociale, in seguito alla forzata evacuazione di una vasta popolazione con le conseguenti privazioni, stress, perdita di lavoro e alterazione dei rapporti umani e della vita comunitaria. L'incidente ha inoltre creato grave apprensione pubblica, sia in Giappone che all'estero, per i possibili effetti sanitari e ambientali della radioattività emessa. È, infine, estremamente rilevante l'impatto economico dovuto alla perdita della centrale e ai costi per gli interventi d'emergenza, che si aggiunge ai danni causati dalle distruzioni del terremoto e dello tsunami.

6. Prime lezioni dall'incidente

L'incidente di Fukushima presenta aspetti unici nella storia degli eventi nucleari, in particolare per la sua complessità dovuta a una serie di gravi fattori concomitanti che hanno concorso a rendere estremamente difficile il controllo della situazione e della sicurezza dell'impianto, del personale e della popolazione: perdita totale di potenza elettrica e del pozzo di calore, allagamento delle strutture, coinvolgimento di più reattori, iterazione di intense scosse sismiche, in un contesto ambientale devastato dal terremoto e dallo tsunami con distruzione delle infrastrutture sociali, inclusi trasporti, telecomunicazioni, forniture elettriche e altri servizi essenziali.

Queste condizioni rendono quello di Fukushima un particolare incidente "severo", ossia un evento che eccede la base di progetto degli impianti per affrontare il quale si richiede un livello superiore di difesa in profondità nello schema di protezione multipla definito dalla IAEA per la sicurezza degli impianti nucleari (IAEA 1999). Questo basilare schema prevede misure a più livelli, ciascuno con margini di efficacia ulteriori, in modo da: prevenire la possibilità di

situazioni anormali (livello 1), impedire l'aggravamento di anomalie in incidenti (livello 2), mitigare l'impatto di incidenti (livello 3). Misure di sicurezza per il raggiungimento dei primi tre livelli sono di norma pianificate nel progetto base degli impianti; per affrontare eventi che portano a incidenti severi servono misure ulteriori (livello 4) che forniscano mezzi per impedire l'ulteriore aggravarsi degli incidenti e per mitigarne gli effetti.

Le analisi presentate a Vienna dai rapporti del governo giapponese e della commissione della IAEA comprendono un esame delle procedure per affrontare appunto gli incidenti severi con indicazioni su come potenziarle a livello nazionale e internazionale, alla luce degli eventi esterni e di quanto si era riusciti a sapere sull'evoluzione dei reattori e dell'emissione radioattiva e sulla gestione dell'emergenza.

Il documento del governo individua le principali carenze strutturali e operative che hanno favorito il decorso negativo dell'incidente nella forma di 28 "lezioni", organizzate in cinque categorie: analisi della severità dell'incidente e revisione della sufficienza delle misure preventive per tali incidenti; revisione dell'adeguatezza delle risposte a tale severo incidente; riesame delle risposte alla situazione d'emergenza per disastro nucleare; controllo della robustezza delle infrastrutture di sicurezza degli impianti elettronucleari; esame della solidità della cultura di sicurezza.

La prima categoria comprende una serie di interventi necessari: rafforzare le misure preventive contro terremoti eccezionali e tsunami, aggiornando le previsioni e considerando i rischi di allagamento; garantire le forniture elettriche con maggiore diversificazione delle fonti e ridondanza delle alternative di emergenza; assicurare robuste funzioni di raffreddamento per i reattori, le strutture di contenimento e le piscine di stoccaggio; modificare le misure di gestione dell'emergenza, superando gli sforzi individuali in norme legali e introducendo tecniche probabilistiche di gestione del rischio; riconsiderare i problemi di sicurezza globali degli impianti con più di un reattore, rendendo le varie unità indipendenti sia strutturalmente che per la gestione della sicurezza (evitare cioè a tutti i livelli la cosiddetta causa comune di guasto); rivedere i progetti architettonici, evitando le carenze che hanno portato ad aggravamenti dell'incidente; assicurare l'impermeabilità delle strutture degli impianti critici.

Nella seconda categoria le lezioni prevedono: rafforzare le misure di prevenzione di esplosioni d'idrogeno; potenziare i sistemi di contenimento degli sfoghi di vapore e gas; migliorare l'ambiente per la risposta all'emergenza, per permettere un'azione continua in condizioni operative confortevoli ed efficaci; potenziare il sistema di gestione dell'esposizione del personale alle radiazioni; migliorare l'addestramento del personale a rispondere a incidenti severi; rendere sicura e robusta la strumentazione necessaria al controllo delle

condizioni dei reattori e dei contenitori primari; curare centralmente il supporto logistico di materiali ed equipaggiamenti d'emergenza e la formazione di squadre d'intervento.

Nella terza categoria le lezioni riguardano: la gestione di emergenze simultanee differenti coinvolgenti sia disastri ambientali che incidenti nucleari prolungati; il rafforzamento del monitoraggio ambientale; la definizione di una precisa divisione del lavoro e delle responsabilità fra le varie organizzazioni centrali e locali; il miglioramento della comunicazione al pubblico di informazioni relative agli incidenti; la creazione di strutture e procedure per agevolare la collaborazione internazionale e rendere tempestiva la comunicazione alla comunità internazionale; l'identificazione con previsioni adeguate degli effetti dei materiali radioattivi rilasciati; la definizione chiara delle aree di evacuazione e delle linee guida di protezione sanitaria nelle emergenze nucleari.

Nell'ultima categoria si considera: il rafforzamento delle istituzioni responsabili della regolamentazione della sicurezza, inclusa la separazione della NISA dal NETI per renderla autonoma dal governo; la revisione delle norme legali, dei criteri e delle linee guida, tenendo anche conto delle esperienze internazionali e delle indicazioni della IAEA; il potenziamento delle risorse e competenze umane per la preparazione e la gestione delle emergenze nucleari; la garanzia di indipendenza e di diversificazione dei sistemi di sicurezza; l'uso in modo efficace di metodologie di sicurezza probabilistiche nella gestione dei rischi; la creazione di una robusta cultura di sicurezza in tutte le organizzazioni e persone a ogni titolo coinvolte nell'energia e tecnologia nucleari.

Concretamente il governo si è impegnato a lanciare un piano per rafforzare la ricerca sulle infrastrutture di sicurezza nucleare, rivedere la sicurezza degli impianti esistenti e aggiornare la normativa e le procedure per nuovi impianti e promuovere una discussione nazionale sulle prospettive dell'energia nucleare in Giappone.

Il governo ha costituito un gruppo indipendente di 10 esperti, per lo più del mondo accademico, con due consulenti tecnici per un'analisi critica degli eventi e della gestione dell'incidente di Fukushima; il gruppo ha iniziato i lavori in giugno, creando quattro squadre d'indagine e un rapporto iniziale è atteso per la fine del 2011 e quello finale sei mesi dopo.

Anche il rapporto della IAEA formula "lezioni" di portata generale accanto a "conclusioni" sull'evento specifico. Nelle conclusioni si osserva che non vi è stata una sufficiente difesa in profondità per il rischio tsunami e allagamento, né per la gestione di un incidente severo coinvolgente disfunzioni multiple; che si rende necessario un aggiornamento delle norme e procedure di sicurezza giapponesi tenendo conto anche degli standard di sicurezza previsti dalla IAEA; che il sistema giapponese di preparazione e risposta alle emergenze è bene

organizzato, ma per la sua complicata struttura comporta possibili ritardi nel prendere decisioni urgenti; che la IAEA deve rivedere le guide e i regolamenti di sicurezza per tener conto della gestione di incidenti severi in impianti con più reattori; che occorre considerare il riallineamento delle regolamentazioni di sicurezza nazionali agli standard internazionali aggiornati alla luce delle nuove esperienze; che si rende opportuna una nuova missione internazionale per assistere il governo giapponese nello sviluppo del sistema di regole di sicurezza nucleare.

Le lezioni contengono indicazioni a fronte di carenze emerse nell'incidente: tener conto nella progettazione degli impianti dei rischi legati a eventi naturali, in particolare tsunami e allagamenti di ogni origine, assicurando la sicurezza globale e specifica delle singole strutture essenziali con separazione fisica e ridondanza dei sistemi di sicurezza, con revisioni e aggiornamenti periodici; istituire centri operativi sicuri dotati di strumentazione ed equipaggiamenti per interventi esterni nei casi di incidenti gravi con perdita di funzioni essenziali; per il centro di risposta alle emergenze di ogni sito nucleare individuare un edificio protetto da ogni evento esterno, dotato di sistemi di comunicazione e servizi e in grado di assicurare condizioni di benessere al personale; preparare in modo specifico il personale e risorse per affrontare situazioni di emergenze simultanee in più centri nucleari e di più reattori in uno stesso impianto; creare sistemi resistenti di comunicazione e di monitoraggio per un controllo puntuale dell'evoluzione degli eventi e la trasmissione delle informazioni relative.

Gli esperti nel rapporto prendono atto che “date le estreme circostanze di questo incidente, la gestione locale dell'incidente è stata condotta nel migliore dei modi possibili e seguendo i principi fondamentali di sicurezza” (conclusione 2) e riconoscono che grazie all'impegno e alla dedizione di dirigenti e lavoratori e alla flessibilità e buona organizzazione del sistema sono state possibili risposte efficaci anche in situazioni impreviste e si è prevenuto un impatto maggiore dell'incidente sulla salute del pubblico e dei lavoratori (conclusione 7).

Riferimenti bibliografici

Charpak, G., Garwin, R. L., Journé, V., *De Tchernobyl en Tchernobyls*, Jacob, Parigi, 2005.

IAEA, *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*, 75-INSAG-3, Rev.1, INSAG-12, Vienna, 1999.

IAEA, *INES, the International Nuclear and Radiological Event Scale user's manual*, IAEA, Vienna, 2009.

IAEA, *Report of the IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi Npp Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami*, 24 May – 2 June 2011, IAEA, Vienna, 2011.

Japanese Government, *Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (June 2011)*, Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, Tokyo, 2011.

Pascolini, A., "Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare. Parte prima l'incidente", *Pace Diritti Umani*, III (2), 2006, pp. 23-45.

Pascolini, A., "Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare. Parte seconda: accordi e convenzioni internazionali", *Pace Diritti Umani*, IV (2), 2007, pp. 49-74.

Pascolini, A., *Una pesante eredità della guerra fredda: le enormi scorte di materiali fissili con potenzialità militari*, *Pace Diritti Umani* V (3), 53-93 (2008).

Von Hippel, F. N. (ed.), *The Uncertain Future of Nuclear Energy*, International Panel on Fissile Materials, Princeton, 2010.