

Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare

Parte prima: l'incidente

Alessandro Pascolini*

La notte di sabato 26 aprile 1986 alle ore 1, 23 minuti e 58 secondi l'unità 4 della centrale nucleare di Chernobyl in Ucraina subì un'esplosione catastrofica di vapore con un conseguente incendio e nuove esplosioni, fino a una completa fusione del reattore. Mancando un edificio di contenimento, si produsse una nube radioattiva che sorvolò vaste zone dell'Unione Sovietica e dell'Europa giungendo fino agli Stati Uniti, rilasciando centinaia di volte la radiazione della bomba esplosa su Hiroshima. Larghe parti di Ucraina, Bielorussia e Russia rimasero gravemente contaminate, imponendo l'evacuazione e la risistemazione di oltre 336.000 persone.

È uno degli eventi epocali del secolo scorso, tragico per centinaia di migliaia di persone cui ha completamente cambiato la vita, drammatico per 6 milioni di abitanti di una zona più vasta della Sicilia, terrificante per larga parte dei cittadini europei.

Oltre ai gravissimi danni sanitari, sociali, economici e ambientali locali, l'evento ha scosso profondamente l'opinione pubblica mondiale, introducendo un nuovo terrore nell'immaginario collettivo, e ha minato profondamente la fiducia nella scienza e nella tecnologia, non solo relativamente all'energia nucleare.

Ciò ha portato, fra l'altro, a una revisione dei programmi energetici in giro per il mondo, con un ritorno all'uso massiccio dei combustibili fossili, con gravi conseguenze ambientali ed economiche e tensioni e conflitti internazionali.

D'altra parte, l'evento ha forzato interventi sugli impianti analoghi a quello di Chernobyl per eliminarne le principali carenze tecniche e rafforzarne le condizioni di sicurezza, ha stimolato le autorità nazionali a rivedere in uno spirito radicalmente rinnovato le problematiche della sicurezza degli impianti nucleari e i problemi della radioprotezione.

A livello mondiale è avvenuto un profondo cambiamento nel-

* Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova; Sezione di Padova dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Docente di Scienze per la pace nella Laurea specialistica in Istituzioni e politiche dei diritti umani e della pace dell'Università di Padova.

l'atteggiamento riguardo ai disastri tecnologici. Particolarmente importanti le iniziative di collaborazione internazionali e la definizione di importanti accordi e convenzioni per rafforzare la sicurezza degli impianti e per prevenire e gestire situazioni di emergenza.

Nella prima parte di questo lavoro rivedremo sinteticamente cause ed effetti del disastro, rimandando alla seconda parte un'analisi dello stato attuale delle convenzioni internazionali relative all'uso civile dell'energia nucleare.

1. I reattori nucleari a neutroni termici

Per poter comprendere la successione di eventi che portò al disastro di Chernobyl è necessario considerare la struttura della centrale e le sue caratteristiche. Una centrale elettronucleare è una particolare centrale termica, ossia un impianto che produce calore che poi viene scambiato con una sostanza refrigerante (per lo più acqua), che acquista così energia termica (se è acqua diventa vapore a temperatura e pressione elevate) ed è in grado di muovere delle turbine; il moto delle turbine è connesso a un alternatore che origina la corrente elettrica, che viene infine messa ad alimentare la rete. Una centrale nucleare differisce dalle centrali geotermiche, a gas o a olio combustibile, solo per il generatore di calore, che in questo caso si basa sul processo di fissione nucleare.

Nel processo di fissione un nucleo di uranio in seguito all'interazione con un neutrone si spacca in due emettendo una grande quantità di energia (circa 10 milioni di volte quella del più energetico processo chimico) e alcuni neutroni. In opportune condizioni, questi neutroni possono indurre via via nuove fissioni in un processo di moltiplicazione, di reazione a catena; in un reattore un numero grandissimo di fissioni avvengono simultaneamente in forma controllata, producendo un'enorme quantità di energia.

Gli elementi strutturali essenziali di un reattore nucleare sono pertanto:

- un nocciolo, nel quale si sviluppa e si mantiene la reazione a catena per produrre energia con continuità;
- un efficientissimo sistema di estrazione del calore (raffreddamento) dal nocciolo;

- una schermatura molto efficace per fermare le radiazioni prodotte nel processo di fissione;
- apparati di regolazione della reazione a catena mediante strumenti di controllo, necessari per l'uso pratico del reattore;
- materiali che riflettano all'interno del nocciolo – per evitarne la perdita – i neutroni, che altrimenti sfuggirebbero.

In realtà è soggetto a fissione solo uno degli isotopi rari che compongono l'uranio naturale, l'uranio-235, ossia composto da 235 fra neutroni e protoni, presente nell'uranio naturale solo per lo 0,70%. Pertanto per poter sostenere la reazione a catena occorre o aumentare notevolmente la concentrazione dell'uranio-235 (arricchimento) o creare le condizioni per cui il processo di fissione avvenga con la massima frequenza¹. È possibile raggiungere quest'ultimo obiettivo in quanto, per le proprietà nucleari, la frequenza delle fissioni dell'uranio-235 aumenta enormemente se l'energia dei neutroni incidenti è la minima possibile (energia termica)². Occorre quindi che fra gli elementi dell'uranio nel reattore venga inserita una sostanza che rallenti i neutroni emessi nelle fissioni: tali sostanze, chiamate «moderatori», devono essere leggere e in pratica si riducono a idrogeno (acqua), deuterio (acqua pesante) e carbonio (grafite).

I reattori con moderatore a grafite sono quelli costruibili più facilmente ed economicamente, dato che è possibile produrre grafite purissima con procedimenti non molto costosi e si può usare uranio naturale, o poco arricchito, dato che il carbonio non assorbe neutroni. Difatti la prima reazione a catena artificiale realizzata a Chicago nel 1942 sotto la direzione di Enrico Fermi avvenne in una «pila» a uranio naturale moderato a grafite³.

La moderazione con grafite presenta d'altra parte lo svantaggio delle maggiori dimensioni del reattore, dato che i neutroni devono compiere un più alto numero di urti per rallentare fino a energia termica (118 urti contro i 18 in idrogeno).

Dei 469 impianti nucleari commerciali attualmente in funzione o in costruzione nel mondo, 390 usano acqua bollente o pressurizzata sia come moderatore che come refrigerante, 40 acqua pesante per entrambi gli scopi, 23 grafite come moderatore e gas come refrigerante e 12 grafite come moderatore e acqua come refrigerante: questi ultimi sono del tipo di quelli di Chernobyl, con opportune modifiche apportate dopo l'incidente, e si trovano 10 in Russia e 2 in Lituania⁴.

¹ Va osservato che l'urto di un neutrone con un nucleo di uranio-235 non sempre produce fissione, in quanto sono possibili altri processi, incluso il semplice urto elastico, come fra palle di biliardo. La probabilità dei vari processi dipende in modo molto sensibile dall'energia dei neutroni incidenti.

² L'energia termica corrisponde alla velocità più probabile di un gas di particelle in una distribuzione normale alla temperatura di 20°C e per i neutroni vale circa 0,025 elettron-Volt. L'energia media dei neutroni emessi nella fissione è invece circa 2 milioni di elettronVolt.

³ Giova ricordare che in un giacimento di uranio a Oklo (Gabon) 1950 milioni di anni fa si sono prodotte reazioni a catena per più di un milione di anni, generando circa 500 miliardi Megajoule di energia, il calore rilasciato da un reattore nucleare da 1000 MWe in circa 8 anni di funzionamento.

Allora il minerale conteneva una frazione più alta di uranio-235 (3,44% contro lo 0,7% attuale). Questo alto contenuto dell'elemento fissile in un minerale abbastanza ricco di uranio e la presenza di acqua crearono le condizioni perché il giacimento funzionasse come un vero reattore nucleare.

⁴ I reattori di tipo RBMK attualmente in esercizio si trovano nelle centrali russe di Kursk, Smolensk e San Pietroburgo e nella centrale lituana di Ignatina.

Va osservato che nelle armi nucleari la reazione a catena deve coinvolgere una quantità significativa di uranio-235 in meno di un milionesimo di secondo. Poiché per termalizzare i neutroni necessari si richiedono tempi dell'ordine del centinaio di microsecondi, una bomba deve operare con neutroni veloci, senza moderatore. Il processo è altamente inefficiente e richiede uranio-235 arricchito al 95% in forma metallica, mentre per i reattori commerciali si usa ossido di uranio arricchito a non più del 3%. Queste differenze fondamentali fanno sì che un reattore a neutroni termici che sfugga al controllo potrà fondere ma non potrà mai generare un'esplosione nucleare.

2. Il reattore RBMK-1000 di Chernobyl

Il sito nucleare di Chernobyl, intitolato alla memoria di Lenin, ospitava 4 unità RBMK-1000 (Reaktor Bol'shoi Moshchnosty Kanal'nyi, ossia reattori a canali di potenza elevata) da 1.000 MW elettrici (3,2 GW termici), raggruppate in due edifici che accoglievano due reattori ciascuno. Altri due reattori dello stesso tipo erano in costruzione al momento dell'incidente. Il reattore che ha subito l'incidente è l'ultimo costruito (aveva raggiunto la piena potenza il 14 dicembre 1983).

Il nocciolo di un reattore RBMK-1000 è costituito da 2.488 blocchi di grafite forati a formare un cilindro di circa 12 m di diametro e 7 m di altezza. Entro 1.661 fori, di circa 9 cm di diametro, vi sono tubi di zirconio e niobio spessi 4 mm, entro i quali vengono infilati due elementi di combustibile sovrapposti, alti 3,5 m. Ciascun elemento di combustibile è costituito da un fascio di 18 barrette di zirconio contenenti pastiglie di ossido di uranio, arricchito al 2%. Gli elementi di combustibile vengono direttamente lambiti dall'acqua refrigerante pompata nei tubi a pressione e che comincia a bollire a 2,5 m dal fondo. Il sistema di refrigerazione è costituito nel suo insieme da due circuiti indipendenti, funzionanti in parallelo, ognuno in grado di raffreddare una metà del nocciolo. Il reattore RBMK è dotato inoltre di un sistema di refrigerazione di emergenza.

Le barre di controllo sono 211 inserite in canali nella grafite; sono più complicate che nei reattori ad acqua leggera e svolgono più funzioni. La punta è di grafite, per 1 m sono cave, e il

resto è di carburo di boro in una lega di alluminio, che ha una temperatura di fusione piuttosto bassa.

La grafite non ha un sistema di raffreddamento autonomo ma in comune con le barre controllo. In funzionamento, la temperatura della grafite è di 600°C, quella del combustibile in media 550°C e l'acqua di raffreddamento esce a 284°C.

Dato il basso arricchimento dell'uranio, gli elementi di combustibile devono venir cambiati frequentemente, a reattore in funzione e non a reattore spento, come per gli impianti ad acqua leggera. Un enorme macchinario collocato sopra il nocciolo effettua tali operazioni. A causa delle grandi dimensioni del reattore e dell'apparato di ricambio del combustibile, il RBMK non è dotato di un sistema di contenimento a tenuta di esplosione di gas, la tipica cupola degli impianti ad acqua leggera, ma di un sistema di confinamento compartimentato. Le figure 1 e 2 mostrano, rispettivamente, un diagramma schematico del RBMK-1000 di Chernobyl⁵ e, per confronto, del reattore ad acqua leggera pressurizzata di Three Mile Island, pure soggetto alla fusione del nocciolo, ma che non esplose né emise dosi significative di radiazione⁶.

⁵ S. Bogatov, A. Borovoi, S. Gavrilov, A. Lagunenka, E. Pazukhin, *Half an Hour after the Beginning of the Accident*, Mosca, Kurchatov Inst., 2005.

⁶ Il più grave incidente occorso a reattori nucleari commerciali americani avvenne il 28 marzo 1979 nell'unità 2 dell'impianto elettronucleare di Three Mile Island, presso Middletown in Pennsylvania. Un cattivo funzionamento di poco conto del circuito di raffreddamento secondario causò un aumento di temperatura nel circuito primario, che a sua volta provocò lo spegnimento automatico del reattore. La valvola di sfogo che avrebbe dovuto essere chiusa era invece aperta senza che lo notassero gli strumenti di controllo. Ciò provocò la perdita di una gran quantità di refrigerante del sistema. Gli operatori mal valutavano la situazione e spensero il sistema di raffreddamento di emergenza del reattore, che si surriscaldò fino a una fusione parziale. Gli elementi di combustibile vennero danneggiati e il loro rivestimento in lega di zirconio reagì con l'acqua ad alta temperatura producendo idrogeno. Fortunatamente non c'era abbondanza di ossigeno, e l'idrogeno non esplose. Le perdite economiche furono molto gravi, ma non ci furono né feriti né conseguenze negative per la salute o per l'ambiente, dato che il rilascio di gas radioattivi nell'atmosfera fu minimo (J.S. Walker, *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective*, Berkeley, University of California Press, 2004).

Figura 1. Immagine schematica del reattore RBMK, con indicati i principali elementi strutturali

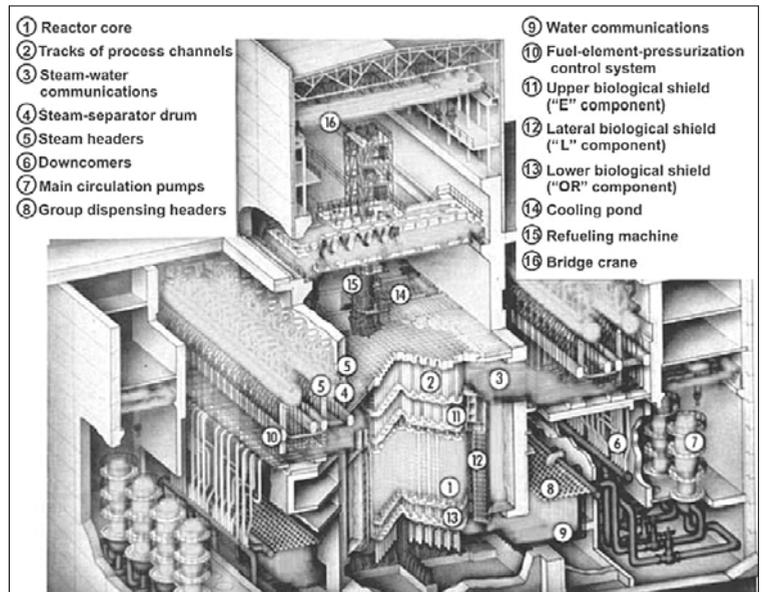
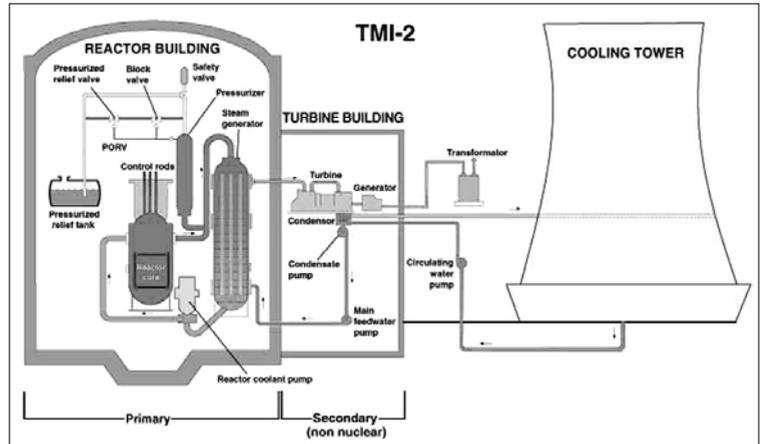


Figura 2. Sezione schematica della seconda unità della centrale di Three Mile Island

3. Aspetti di sicurezza dei reattori RBMK

I reattori del tipo RBMK presentavano significativi punti deboli in relazione alla sicurezza dell'impianto:

- *mancanza di un edificio a tenuta di esplosione di gas*: solo una parte dei circuiti primari è in compartimenti a tenuta;
- *instabilità dinamica del nocciolo*: a bassa potenza vibra;
- *limitata efficacia del sistema di protezione*: insufficiente rapidità di inserzione delle barre di emergenza;
- *insufficienti caratteristiche della refrigerazione di emergenza*: il sistema è complesso e non abbastanza ridondante;
- *instabilità spaziale della potenza*: le grandi dimensioni del nocciolo del reattore sono causa di instabilità locale della potenza dovuta alla produzione di xeno, un gas che assorbe neutroni. Richiede pertanto un efficiente controllo «a zone» realizzato mediante computer on-line, una tecnica estremamente delicata, e presenta un'eccessiva dipendenza della regolazione e controllo dell'impianto da interventi degli operatori;
- *mancanza di tubo di calandra*: nei reattori a tubi in pressione oltre al tubo di forza in zirconio e niobio esiste un secondo tubo, denominato calandra, il quale, in caso di rottura del primo, riesce a contenere la sovrappressione dovuta alla fuoriuscita del vapore. L'intercapedine tra i due tubi costituisce una barriera termica tra il tubo di forza e la calandra; essa permette inoltre il posizionamento di sensori di rivelazione precoce di perdite d'acqua nel caso di fessurazione del tubo di forza. Al contrario,

nei reattori RBMK il tubo di forza è quasi a contatto con la grafite e la rottura del tubo fa riversare l'acqua sulla grafite, che si trova ad alta temperatura, con la possibilità di formare una miscela esplosiva costituita da idrogeno e ossido di carbonio;

– *reazione positiva fra reattività e vapore (instabilità intrinseca)*: nei reattori moderati ad acqua, quando l'acqua si riscalda e la sua densità diminuisce, la moderazione dei neutroni è meno efficace e così l'energia generata diminuisce, fino allo spegnimento della reazione. Questa è una caratteristica di sicurezza intrinseca assente nei reattori RBMK, poiché il moderatore a grafite è sufficiente per rallentare i neutroni e mantenere la reazione a catena, e il refrigerante ad acqua funge anche da assorbitore di neutroni. Quando parte dell'acqua si trasforma in vapore diminuisce l'assorbimento di neutroni da parte dell'acqua, mentre la moderazione assicurata dalla grafite rimane stabile, causando così un aumento ulteriore dell'energia prodotta. In condizioni normali i processi competitivi si equilibrano rimanendo sotto controllo; nel caso di un considerevole aumento della frazione di vapore, l'aumento di potenza a sua volta provoca un'ulteriore evaporazione dell'acqua e un conseguente aumento di potenza. Questo circolo vizioso si sviluppò a Chernobyl producendo un aumento di potenza del reattore centinaia di volte oltre la massima potenza per cui era stato progettato, e il conseguente disastro.

Va comunque precisato che i RBMK possiedono dei sistemi di sicurezza di buon livello⁷:

- gli ambienti contenenti la pompa di circolazione principale e il sistema refrigerante di emergenza, come pure i separatori di vapore, possono resistere ad alte sovrappressioni (fino a 4,5 bar); difatti queste parti dell'edificio non furono distrutte nell'esplosione del reattore;
- nel caso di rottura di un tubo a pressione, il vapore e l'idrogeno che si possono formare vengono raccolti in un sistema chiuso d'acciaio in grado di sopportare alte sovrappressioni;
- i sistemi di controllo che segnalano eventuali situazioni di rischio intervengono automaticamente a spegnere il reattore in caso di necessità. A Chernobyl, come vedremo, questi sistemi vennero deliberatamente disattivati e non poterono salvare l'impianto.

Dopo il disastro di Chernobyl vennero immediatamente approntate modifiche per aumentare la sicurezza dei reattori RBMK

⁷ H. Damveld, *Chernobyl: Five Years of Disaster*, in «WISE News», 5 April 1991.

riducendo il fattore di reazione positiva fra reattività e vapore. Venne aumentato il numero efficace di barre di controllo manuale da 30 a 45, si aggiunsero 80 assorbitori nel nocciolo per impedirne il funzionamento a bassa potenza, e si aumentò l'arricchimento del combustibile dal 2% al 2,4% per mantenere il livello di consumo del combustibile in presenza degli assorbitori. Le barre di controllo sono state riprogettate, il tempo di spegnimento rapido ridotto da 20 a 12 secondi e si sono introdotte precauzioni contro l'accesso non autorizzato ai sistemi di sicurezza di emergenza. In aggiunta a queste modifiche immediate, la sicurezza e la funzionalità dei reattori RBMK sono state aumentate con nuovi sistemi di protezione, nuovi computer e più efficienti sistemi di raffreddamento di emergenza.

4. La sequenza degli eventi che hanno portato al disastro⁸

Il 25 aprile 1986 il reattore dell'unità 4 doveva venir spento per la manutenzione di routine e si decise di approfittare di quest'occasione per fare un esperimento sull'impianto elettromeccanico. Si trattava di verificare se, nel caso di perdita di potenza elettrica, le turbine in fase di rallentamento potessero comunque mantenere in funzione le pompe di raffreddamento di emergenza fino all'accensione dei generatori diesel di emergenza.

Questo esperimento era già stato tentato in occasione del precedente spegnimento del reattore, con risultati inconcludenti, per cui si decise di ripeterlo. Poiché si ritenne che l'esperimento non coinvolgesse la parte nucleare dell'impianto, non ci fu un adeguato scambio di informazioni né il necessario coordinamento con il responsabile della sicurezza del reattore: conseguentemente non vennero adottate nell'esperimento adeguate misure di sicurezza e il personale che condusse l'esperimento non venne messo in guardia dei problemi di sicurezza e dei rischi nucleari.

Alle 13:05 di venerdì 25 aprile iniziò la diminuzione della potenza, verso lo spegnimento dell'impianto, e alle 14 la potenza scese a 1.600 MWt. Al fine di evitare uno spegnimento automatico del reattore, prima di iniziare l'esperimento venne disconnesso il sistema di raffreddamento di emergenza e si spense il sistema di regolazione automatica. Il reattore rimase

⁸ *Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*, Vienna, IAEA, 1986; *Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*, Safety Series No. 75 INSAG-1, Vienna, IAEA, 1986.

operativo al 50% fino alle 23 per fornire energia alla rete. Alle 23:10 si riprese a diminuire la potenza per raggiungere un valore fra 700 e 1.000 MWt (700 MWt è il minimo permesso dalle norme di sicurezza e 1.000 MWt era la potenza ideale per l'esperimento).

Alle ore 0:00 di sabato 26 aprile si passò dal sistema di controllo automatico a quello manuale e, per un errore degli operatori, la potenza crollò a 30 MWt e lo xenon prodotto «avvelenò» il reattore. Gli operatori tentarono di far risalire la potenza eliminando tutti i regolatori automatici ed estraendo le barre di controllo fino al limite di sicurezza di 30 barre, ma riuscirono a stabilizzarlo a circa 200 MWt solo all'una, rimuovendo ulteriori 19 barre. In queste condizioni per bloccare un eventuale innalzamento di potenza con un arresto di emergenza rapido occorrono almeno 20 secondi. Ciò nonostante si decise di procedere all'esperimento.

All'1:07 si aggiunsero 2 pompe per riciclare l'acqua, portando il totale a 8, superando il flusso di sicurezza e abbassando la pressione di vapore sotto i limiti: per evitare lo spegnimento automatico del reattore previsto in tali condizioni si convenne anche questo sistema di sicurezza. Il reattore divenne molto instabile e gli operatori dovettero procedere a continui aggiustamenti ogni pochi secondi per mantenere costante la potenza lasciando inserite solo 6 barre di controllo.

All'1:19 la reattività prese a salire oltre i limiti e il sistema di controllo richiese lo spegnimento immediato. L'allarme venne ignorato e all'1:22:30 si bloccò l'alimentazione delle pompe, per collegarle alle turbine in fase di spegnimento: il flusso d'acqua nel reattore diminuì enormemente e la temperatura salì rapidamente facendo evaporare grandi quantità d'acqua.

All'1:23:04 l'esperimento si concluse e si chiusero le valvole di immissione dell'acqua nelle turbine. Un operatore vide le barre muoversi e all'1:23:40 azionò il sistema di spegnimento urgente, che avrebbe richiesto 20 secondi; ma la potenza aumentò rapidamente a centinaia di volte la potenza nominale per l'effetto positivo del vuoto dovuto all'evaporazione dell'acqua ma favorito anche dalla particolare struttura delle stesse barre di controllo.

L'improvviso aumento di calore deformò le barre di controllo impedendone una completa immissione, ruppe e fuse gli elementi di combustibile e la pressione del vapore nei tubi aumen-

tò enormemente; nel giro di 8 secondi si produsse una prima esplosione di vapore che distrusse il nocciolo del reattore, fece saltare lo schermo biologico di 1000 tonnellate di ferro e cemento, tranciò i 1661 tubi e quindi sfondò il tetto dell'edificio, lanciando detriti radioattivi nell'atmosfera ed esponendo così il nocciolo rovente all'aria. Una seconda esplosione seguì dopo qualche secondo, probabilmente dovuta all'idrogeno prodotto dalla reazione dello zirconio con l'acqua. La reazione dell'ossigeno atmosferico con il nocciolo ad altissima temperatura causò un violento incendio della grafite, che fu la causa principale della dispersione di radionuclidi e di prodotti di fissione nell'atmosfera fino a un'altezza di 1 km. Altri incendi si svilupparono in vari punti nei resti dell'edificio, sul tetto del locale delle turbine e nei vari depositi di materiali infiammabili.

5. Primi interventi

La scala del disastro è stata esacerbata sia dall'impreparazione e incompetenza degli amministratori locali, sia dalla carenza di attrezzature adeguate. I dosimetri presenti funzionanti erano limitati a 1 mRoentgen/s: il personale sapeva solo che la radiazione era superiore a 4 Roentgen all'ora, mentre in realtà si arrivava a 20.000 Roentgen all'ora⁹. Il Caposquadra Alexander Akimov ritenne intatto il reattore e rimase con il personale nell'impianto senza protezione dalle radiazioni a pompare acqua nel reattore fino alla mattina; morrà con la maggioranza della squadra entro 3 settimane. Nonostante le segnalazioni di alti tassi di radioattività da parte del responsabile della sicurezza Vorobiev, e l'indicazione di Anatoly Andreyevich Sitnikov, Vice Capo Ingegnere delle operazioni dei reattori 1 e 2, inviato a esaminare il reattore 4, che il reattore era distrutto, il Direttore della centrale Viktor Bryukhanov e il Capo Ingegnere Nikolai Formin continuarono a rifiutare l'evidenza del disastro nucleare e continuarono a inviare a Mosca false informazioni.

Un primo gruppo di 14 pompieri iniziò a spegnere gli incendi all'1:28, e altre squadre continuarono ad arrivare fino alle 4 del mattino, senza sapere delle radiazioni. Alle 5 gli incendi sui tetti e nell'impianto erano spenti, ma i pompieri accumularono alte dosi di radiazione, pagando un alto tasso di decessi. Molte morti e sofferenze avrebbero potuto venir evitate se non ci fosse sta-

⁹ Il Roentgen è un'unità di misura dell'esposizione alla radiazione, ora in disuso. La dose letale di radiazione è di 500 Roentgen in 5 ore. Attualmente l'unità di dose assorbita è il gray (Gy): 1 Gy corrisponde all'assorbimento di 1 Joule di energia per kg; 1 Roentgen equivale a circa 9,330 mGy. Poiché non tutte le radiazioni hanno gli stessi effetti biologici, in dosimetria si usa come unità il sievert (Sv), che si ottiene moltiplicando la dose in gray per coefficienti caratteristici delle varie radiazioni. La radiazione di fondo naturale in Europa varia a seconda delle località da 2,2 mSv a 4,6 mSv all'anno, il limite per i lavoratori in Europa è di 15 mSv all'anno (50 mSv all'anno per quelli dell'industria nucleare). Primi disturbi si rendono evidenti oltre i 300 mSv; una dose di 3 Sv ha il 50% di probabilità di risultare mortale entro 30 giorni in assenza di trattamento medico.

ta tanta impreparazione e l'irresponsabile rifiuto di fornire al personale le necessarie protezioni¹⁰.

Intanto si rafforzava l'incendio della grafite, contro il quale mancavano sia esperienza che materiali di spegnimento, e che continuerà per altri 10 giorni, inviando nell'atmosfera grandi quantità di detriti radioattivi.

Il primo messaggio di Bryukhanov a Mosca alle 3 del 26 aprile assicurava che la situazione era sotto controllo; alle 6 il Ministro per l'Energia Anatoli Mayorets telefonò al Premier Nikolai I. Ryzhkov, che a sua volta chiamò il Segretario Generale Gorbaciov fornendogli un primo rapporto che minimizzava l'evento e riportava le informazioni errate di Bryukhanov; Gorbaciov indisse una riunione «d'urgenza» del Politburo per il 28 aprile.

Intanto i militari presero l'iniziativa e fin dall'inizio giocarono un ruolo importante, precedendo l'azione dei politici. Il Capo di Stato Maggiore, Maresciallo Sergei F. Akhromeyev, venne informato alle 2:20 della presenza di radiazioni e, recatosi al centro di comando, ordinò al Capo della Difesa Civile di attivare d'urgenza il reggimento di difesa civile stanziato nei pressi di Chernobyl, e inviò sul luogo dell'incidente l'unità speciale mobile per combattere incidenti agli impianti nucleari dislocata presso Kuibyshev, con tutta la strumentazione di misura delle radiazioni e gli altri apparati¹¹. Avendo ricevuto conferma, attraverso canali militari, dell'emissione di radiazioni, alle 10 del mattino telefonò a Gorbaciov informandolo che la situazione era molto più grave di quanto fino allora indicato e riferendogli su quanto stava facendo.

Intanto era stata formata un'unità operativa di esperti, che giunse a Kiev la mattina alle 9, guidata da Valery Legasov, Direttore dell'Istituto Kurchatov di Mosca ove era stato progettato il reattore. Appena giunti a Chernobyl si resero conto che il reattore era distrutto e della gravità dell'emissione radioattiva, smentendo la posizione sostenuta fino allora dal Direttore Bryukhanov.

A Mosca il Premier Ryzhkov creò una commissione governativa di alto livello sotto la direzione di Boris Y. Sherbina, Vice Presidente del Consiglio dei Ministri dell'URSS, con Yevgeny Velikhov, Vice Presidente dell'Accademia delle Scienze, come scienziato-capo. La commissione arrivò a Chernobyl verso le 9 di sera del 26, e scienziati e tecnici dovettero combattere per

¹⁰ G. Charpak, R.L. Garwin, V. Journé, *De Tchernobyl en Tchernobyls*, Paris, Odile Jacob, 2005.

¹¹ S.F. Akhromeyev, K.M. Kornienko, *Glazami Marshala i Diplomata*, Mosca, Mezhdunarodnye Otnosheniya, 1992.

far accettare a politici e burocrati la realtà della situazione e la necessità di misure urgenti per la protezione della popolazione. Nella notte, 24 ore dopo l'esplosione, Sherbina si convinse della distruzione del reattore e della contaminazione radioattiva e ordinò l'evacuazione di Pripjat, la cittadina a 3 km dall'impianto che ospitava le famiglie del personale; per ridurre i bagagli, alla popolazione si disse che l'evacuazione sarebbe durata 3 giorni.

Dal 27 aprile si iniziò a lanciare sulla grafite in fiamme grandi quantità di materiali differenti, ciascuno designato a combattere aspetti diversi dell'incendio e dell'emissione di radionuclidi: composti di boro che assorbono neutroni per prevenire il ristabilirsi di una reazione a catena, dolomia per controllare il fuoco, piombo per bloccare le radiazioni, sabbia e argilla per impedire la dispersione di particolato. Durante la prima settimana vennero lanciate 5.000 t di materiali nel cratere formato dall'esplosione nel corso di 1.800 operazioni di elicotteri in volo¹².

Il 29 aprile si riunì di nuovo il Politburo per esaminare il rapporto della commissione, che finalmente dava una descrizione completa e reale del disastro; si autorizzò la commissione a intensificare le operazioni di bonifica e a indagare sulle cause del disastro.

Lo stesso giorno l'Ambasciatore americano presentò l'offerta del Presidente Reagan a Gorbaciov di assistenza medica e tecnica; l'offerta venne declinata, forse per motivi di orgoglio nazionale, anche se la situazione avrebbe richiesto il massimo aiuto¹³.

I materiali del nocciolo anche dopo lo spegnimento delle reazioni a catena continuarono a produrre energia per l'altissima radioattività e si fusero in una specie di lava che si raccolse sotto la grafite mantenendo un'altissima temperatura anche a causa dell'isolamento termico creato dal materiale gettato dagli elicotteri; questa massa altamente radioattiva 8 giorni dopo l'incidente fuse il pavimento dello schermo biologico e si aprì la via fino al fondo dell'edificio, aumentando l'emissione di radionuclidi¹⁴. L'acqua pompata nel vano tentativo di spegnere il fuoco della grafite si era raccolta in basso dove stava arrivando la massa fusa del reattore e dei detriti: entrando in contatto con l'acqua si sarebbe prodotta un'enorme quantità di vapore e quindi un'esplosione ancora maggiore di quella originaria con una terribile dispersione di materiale altamente radioattivo. Due «liquidatori» con vesti impermeabili furono mandati a scaricare l'acqua,

¹² A.R. Sich, A.A. Borovoi, N.C. Rasmussen, *The Chernobyl Accident Revisited: Source Term Analysis and Reconstruction of Events During the Active Phase*, MIT Nucl. Eng. Dept. report MITNE-306, 1994.

¹³ Il Governo sovietico decise di gestire le conseguenze dell'incidente a livello nazionale per i primi 4 anni, finché nel 1990 riconobbe la necessità di un'assistenza internazionale. In risposta l'Assemblea Generale dell'ONU adottò la Risoluzione 45/190 che invocava la «collaborazione internazionale per affrontare e mitigare le conseguenze all'impianto nucleare di Chernobyl». Presso l'ONU venne creato l'Ufficio per il coordinamento degli affari umanitari (OCHA), con il compito di coordinare la cooperazione internazionale per Chernobyl.

¹⁴ Y.P. Buzulukov, Y.L. Dobrynin, *Release of Radionuclides During the Chernobyl Accident*, in S.E. Merwin, M.I. Balonov (eds.), *The Chernobyl Papers*, 1:3-21, Richland, WA, Research Enterprises, 1993.

senza avvertirli del pericolo: salvarono milioni di persone ma non riuscirono a tornare indietro.

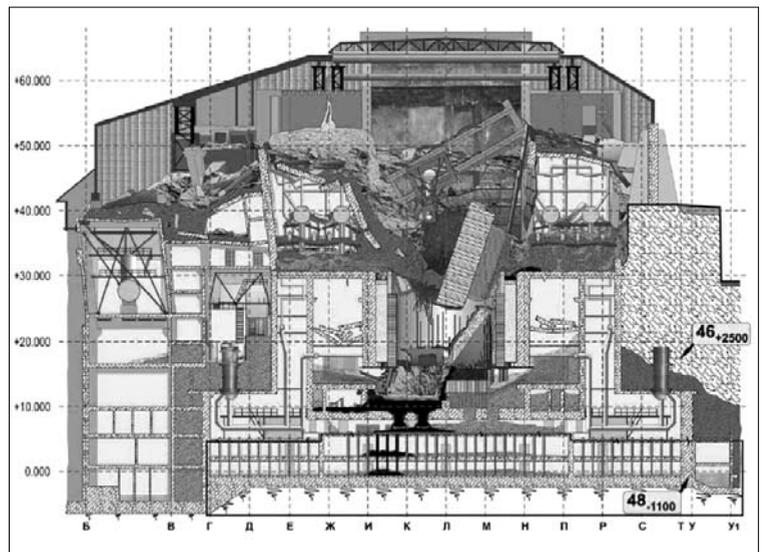
Il 2 maggio la commissione governativa decise di evacuare tutti i residenti in un raggio di 30 km attorno all'impianto: 90.000 persone da 170 fra cittadine e villaggi.

Il 9 maggio l'incendio della grafite era spento e si iniziò la costruzione di una base di cemento armato con un sistema di raffreddamento sotto il reattore, sia per ridurre la temperatura del materiale fuso che per impedire al reattore di penetrare nel terreno e contaminare la falda acquifera. Il lavoro venne completato in 15 giorni da 4.000 operai.

Infine si provvide a sigillare il reattore e i materiali finiti nel cratere con una grande struttura in cemento, il «sarcofago», completato nel dicembre 1986. Dal giugno si era proceduto a una misura accurata della distribuzione della radiazione in una zona più vasta, portando a ulteriori evacuazioni. La figura 3 mostra una sezione del sarcofago con il reattore e le strutture danneggiati¹⁵.

Circa 350.000 «liquidatori» militari e civili, provenienti da tutta l'Unione Sovietica, hanno lavorato a Chernobyl nel periodo 1986-1987 a bonificare la zona bandita di 30 km di raggio; altri 250.000 continuarono il lavoro negli anni successivi; centinaia di enormi «cimiteri» di elicotteri e macchinari vari contaminati

Figura 3. Sezione del «sarcofago» con lo stato del reattore poco dopo l'esplosione



¹⁵ S. Bogatov, A. Borovoi, S. Gavrilov, A. Lagunenکو, E. Pazukhin, *Half an Hour after the Beginning of the Accident*, cit.

rimangono nelle vicinanze dell'impianto, definitivamente abbandonato nel 2000¹⁶.

Dei 240.000 liquidatori impegnati nella fase più critica circa 20.000 hanno ricevuto dosi di 250 mSv, e alcuni più esposti hanno subito dosi fino a 500 mSv, mentre per gli altri la dose media è stata di 165 mSv¹⁷.

6. Le cause del disastro

Ci sono state due versioni ufficiali contraddittorie sulle cause. La prima (agosto 1986) accusò solo il personale del reattore. La seconda (1991) incolpò la progettazione del RBMK, in particolare le barre di controllo.

In realtà dall'esame degli eventi emerge chiaramente che giocarono entrambi i fattori.

I dirigenti non erano qualificati per gestire grandi reattori nucleari: il Direttore Bryukhanov e il Capo Ingegnere Formin venivano da impianti elettrici tradizionali; il Vice Capo Ingegnere Anatoli Dyatlov, responsabile al momento del disastro, aveva esperienza solo di piccoli reattori per sommergibili. Il personale che dirigeva l'impianto e condusse le operazioni non era informato dei problemi strutturali del reattore. Che il reattore RBMK fosse pericoloso a basse potenze era contrario all'intuizione e ignoto al personale. Secondo Dyatlov, informazioni cruciali sulla stabilità del reattore erano state tenute nascoste deliberatamente dai progettisti di Mosca. Il fatto che le barre di controllo, per la loro particolare struttura, nei primi istanti potessero aumentare la reattività anziché diminuirla, era contro l'intuizione e ignoto agli operatori, anche se era già stato osservato precedentemente nell'analogo reattore lituano.

Gli operatori procedettero con scarsa cura e violarono le procedure d'impianto, anche perché non conoscevano le carenze tecniche del reattore, e disattivarono molti sistemi di sicurezza per poter portare a termine l'esperimento, contro ogni regola. Vi fu insufficiente comunicazione fra gli operatori dell'esperimento e i responsabili della sicurezza. Più in generale, enti preposti non esercitarono il necessario controllo e il personale aveva avuto uno scarso addestramento¹⁸.

Quella che è mancata, a tutti i livelli, dalla progettazione del reattore, alla gestione dell'impianto, alla preparazione del perso-

¹⁶ Dopo l'incidente venne costruito uno schermo di 200 m di cemento fra la zona del disastro e il resto dell'impianto che, dopo una breve sospensione, riprese a funzionare. Nel 1991 un incendio nell'impianto turbine rese inutilizzabile il reattore 2. Il reattore 1 venne decommissionato nel novembre 1996 in seguito a un accordo fra il Governo ucraino e varie organizzazioni internazionali. Nel novembre 2000 venne spento anche il reattore 3 e la centrale fu definitivamente chiusa. I 7000 lavoratori che vi hanno continuato a operare hanno rispettato i limiti internazionali di esposizione: per loro e le famiglie è stata costruita una nuova città, Slavoutich, a 50 km dall'impianto. Pripyat è stata completamente abbandonata.

¹⁷ Vedi nota 9, *supra*.

¹⁸ Vi furono molti provvedimenti disciplinari e processi a carico di personale e dirigenti, che portarono a 67 licenziamenti e 27 espulsioni dal partito comunista; 10 anni di prigione vennero comminati a Viktor Bryukhanov, Direttore della centrale, a Nikolai Fomin, Ingegnere Capo, a Anatoly Dyatlov, Vice Capo Ingegnere, ad Alexander Kovalenko, Supervisore del reattore 4, e a Boris Rogozhkin, Capo Squadra al momento dell'incidente; una condanna a 2 anni di prigione ebbe Yuri Laushkin, Ispettore della centrale.

nale e alla conduzione dell'esperimento, è stata una «cultura della sicurezza», l'atteggiamento di base che dovrebbe guidare le azioni di tutti coloro che sono coinvolti nella realizzazione e gestione di sistemi tecnologici complessi, potenzialmente rischiosi¹⁹.

Per Sergej P. Kapitza il programma energetico nucleare sovietico non era sicuro nella sua dimensione umana: gli ingegneri che hanno prodotto e gestivano la «seconda generazione» di impianti nucleari, dopo la prima fase «eroica», erano stati selezionati e avevano fatto carriera più per la loro ortodossia politica che per capacità e meriti, e la loro preparazione aveva risentito della dannosa separazione dell'educazione superiore tecnica dalla cultura scientifica di base²⁰.

7. L'informazione sull'incidente

Una delle maggiori e colpevoli carenze nella gestione dell'incidente fu la comunicazione: la popolazione coinvolta venne informata in ritardo e in modo scorretto, mancarono precise indicazioni delle dosi subite nei vari territori, anche coloro che furono costretti all'evacuazione non ebbero le informazioni essenziali. Mancò infine una tempestiva informazione ai Paesi limitrofi e alla comunità internazionale.

Il disastro di Chernobyl avvenne in un momento di acuto dibattito fra gli alti leader sovietici sulla politica dell'informazione, a seguito del lancio nella primavera 1985 della campagna per una maggiore «Glasnost» da parte di Gorbaciov, che voleva superare la stretta chiusura e il controllo politico di tutte le forme di comunicazione, tipici dell'Unione Sovietica. Larga parte delle strutture centrali e periferiche del partito erano apertamente ostili alla nuova politica che di fatto abbatteva il sistema di comunicazione costruito da Stalin alla fine degli anni venti del secolo scorso.

Va ricordato che nessuna informazione, ad alcun livello, era stata data del grave incidente nucleare occorso nel 1957 sugli Urali a seguito dell'esplosione di scorie nucleari sepolte in modo improprio presso una base militare nella zona di Chelyabinsk. L'incidente produsse centinaia di vittime, migliaia di persone ricevettero significative dosi di radiazione e una vasta zona rimase contaminata²¹.

¹⁹ Una viva descrizione dell'incidente e del ruolo giocato dalle persone coinvolte si trova in G. Medvedev, *The Truth about Chernobyl*, Mosca, VAAP, 1989 (trad. ingl. New York, Basic Books, 1991).

²⁰ S.P. Kapitza, *Lessons of Chernobyl: The Cultural Causes of the Meltdown*, in «Foreign Affairs», Summer 1993, p. 7.

²¹ In realtà riviste scientifiche sovietiche pubblicarono numerosi articoli specialistici sull'effetto della contaminazione radioattiva su piante, animali, acque e terreni, come riportato in Z. Medvedev, *Nuclear Disaster in the Urals*, New York, Norton, 1979.

Nell'aprile 1985, il Ministro per l'Energia Mayorets aveva promulgato un decreto che stabiliva, fra l'altro, che le informazioni concernenti gli effetti negativi delle installazioni energetiche sul personale, la popolazione e l'ambiente non si potessero diffondere al pubblico mediante radio, stampa o televisione. Il 18 luglio 1986 sempre Mayorets proibì al personale civile del ministero di dare qualunque informazione alla stampa sull'incidente di Chernobyl.

La dirigenza sovietica continuava ad avvalersi del sistema di censura Glavlit, creato nel 1922 per il controllo dei mezzi di comunicazione e che sarà abolito solo nel dicembre 1991. I giornalisti quindi si trovavano in una situazione fluida, non essendo chiaro quale posizione avrebbe finito per prevalere nel partito, la cui variegata e frammentaria burocrazia a tutti i livelli cercava di mantenere il controllo dell'informazione²².

Pertanto anche sul fronte dell'informazione i dirigenti sovietici si trovarono impreparati a gestire l'incidente e dovettero improvvisare in un clima di incertezza e con una mentalità atavica di chiusura e diffidenza²³.

Sorprendentemente, il Ministro degli Esteri Eduard A. Shevardnadze, che avrebbe dovuto spiegare gli avvenimenti al mondo, rimase privo di informazioni fino al 28 mattina, e anche allora ebbe difficoltà a ricevere risposte adeguate alle sue domande. Posto sotto pressione da parte del corpo diplomatico a Mosca e dagli ambasciatori sovietici all'estero, solo il 30 aprile poté organizzare un incontro con gli ambasciatori stranieri per informarli sul disastro, ricevendo offerte di aiuto ma soprattutto riserve sul ritardo della comunicazione²⁴.

Intanto, di informare il mondo del disastro si occupò direttamente la nube radioattiva, che fu rivelata nel pomeriggio del 27 aprile a Helsinki e la mattina del giorno seguente in Svezia, dove si trovarono particelle radioattive sui vestiti dei lavoratori dell'impianto nucleare di Forsmark (a circa 1100 km da Chernobyl): verificato che non vi erano perdite nell'impianto svedese, si comprese che un grave incidente era avvenuto in una regione occidentale dell'Unione Sovietica. Da questo momento fu nota a tutto il mondo la dimensione della tragedia²⁵.

All'individuazione del sito si arrivò esaminando immagini raccolte dal satellite Landsat5 passato su Chernobyl prima e immediatamente dopo il disastro; informazioni precise vennero dal satellite SPOT4 che raccolse immagini a partire dal 29 aprile.

²² E.P. Hoffmann, *Nuclear Deception: Soviet Information Policy*, in «The Bulletin of Atomic Scientists», August-September 1986, p. 32.

²³ N. Daniloff, *Chernobyl and Its Political Fallout: A Reassessment*, in «Demokratizatsiya», 1.1.2004.

²⁴ E. Shevardnadze, *The Future Belongs to Freedom*, New York, The Free Press, 1991.

²⁵ J. Greenwald, *Deadly Meltdown*, in «Time Magazine», 12 May 1986, p. 38.

Nella riunione del Politburo del 28 aprile, e in seguito durante tutto il periodo della crisi, si discusse anche il problema della comunicazione interna ed esterna. La maggioranza dei 12 membri avrebbe voluto mantenere minima l'informazione sull'incidente, ma Gorbaciov riuscì a imporsi, con l'appoggio dei soli Heydar Aliyev, Ryzhkov e Shevardnadze, vista la scala del disastro e le proteste che iniziavano ad arrivare dai Paesi occidentali²⁶.

Le informazioni al pubblico cominciarono comunque con estrema precauzione, reticenze e anche falsità e fino al 7 maggio si insistette sull'affermazione che tutto era sotto controllo. Solo dal 6 maggio giornalisti (russi) furono ammessi a Chernobyl, ma fu loro proibito di comunicare alcun aspetto tecnico, e permesso sostanzialmente solo di celebrare l'eroismo della «lotta contro la radiazione». Intanto il Capo del KGB Viktor M. Cebrikov aveva ordinato di controllare il comportamento dei diplomatici e corrispondenti stranieri, preoccupato dei rapporti esagerati che apparivano sulla stampa mondiale, esagerazioni che egli interpretava come una cospirazione antisovietica, ma che in realtà erano largamente causate proprio dalla reticenza russa e dalle difficoltà imposte alla raccolta di informazioni corrette.

Il 28 aprile alle 8 di sera Radio Mosca trasmise un dispaccio della TASS secondo cui era successo un incidente alla centrale di Chernobyl e si stava lavorando per «eliminare le conseguenze» e assistere le vittime. Dopo un'ora il messaggio venne ripetuto in inglese. Il 29 sera la trasmissione televisiva *Vremya* informò della morte di 2 persone e dell'evacuazione di Pripjat, il 1° maggio ripeté che solo 2 persone erano morte e 18 ricoverate in ospedale e che non c'erano stranieri coinvolti; la sera del 4 maggio presentò le prime immagini riprese da un elicottero e il commentatore sottolineò come il film dimostrasse false le affermazioni occidentali di enormi distruzioni.

Il primo rapporto esteso sulla situazione si avrà solo sulla «Pravda» del 6 maggio, e solo il 9 maggio per la prima volta la «Pravda Ukrainy» fornì raccomandazioni su come proteggersi dagli effetti della radiazione, precisando che comunque i livelli di radiazione a Kiev non comportavano rischi alla salute. Le vere dimensioni del disastro cominciarono ad apparire con la conferenza stampa del Direttore della IAEA Hans Blix dopo il suo sopralluogo a Chernobyl (pubblicata il 10 maggio) e con le

²⁶ R. Medvedev, *On Obstacles to the Gorbachev Line*, in «Daily Report: Soviet Union», III, 107 (1986), p. R9.

interviste rilasciate da Velikhov (8 e 12 maggio); il 12 maggio l'«Izvestiya» informò che erano state evacuate 92.000 persone e fornì dati sui livelli di radiazione.

Un deciso cambio di atteggiamento si ebbe con il messaggio televisivo di Gorbaciov la sera del 14 maggio²⁷, che precisò la gravità del disastro e ammise mancanze da parte dei responsabili, anche per la carenza di informazioni. L'obiettivo principale del messaggio era rassicurare la popolazione che la dirigenza sovietica era in grado di gestire la grave «sfortuna» e lodare l'eroismo dei molti cittadini che avevano permesso di evitare conseguenze ancora più dolorose. Non mancarono critiche all'Occidente per le campagne antisovietiche, ma propose anche migliori forme di collaborazione internazionale per la sicurezza dei reattori e la gestione delle emergenze. Il messaggio costituì uno sforzo per stabilire una politica unificata di comunicazione sull'incidente e la gestione delle sue conseguenze, alla luce della nuova glasnost.

Mentre all'interno si continuò a lungo con un controllo dell'informazione sugli aspetti tecnici del disastro, nell'agosto 1986 Valeri Legasov, Capo della delegazione sovietica al congresso internazionale tenuto presso la IAEA a Vienna, fornì una descrizione estremamente accurata e completa sull'incidente e sulle sue cause. In realtà la chiarezza di Legasov e le sue analisi impietose non vennero apprezzate in patria; a causa della freddezza che gli si raccolse attorno e a principi di malattia dovuta alle radiazioni subite egli si suiciderà nel secondo anniversario dell'incidente.

Globalmente, la politica seguita nella comunicazione dal Governo sovietico nella prima cruciale fase dopo il disastro esacerbò e aggravò la situazione, ritardando le cure e generando un'angoscia devastante per la salute nella popolazione coinvolta e creando difficoltà di ogni tipo al di fuori dell'Unione Sovietica.

8. Principali conseguenze del disastro

L'incidente al reattore comportò uno dei massimi disastri del secolo scorso con risvolti molteplici: sanitario, ambientale, economico e sociale con effetti sia locali che globali, destinati a protrarsi per lungo tempo.

La centrale di Chernobyl conteneva al momento dell'esplosione

²⁷ M.S. Gorbachev, *Television Address, May 14, 1986*, in «Daily Report: Soviet Union», III, 94, supp. 95 (1986), p. L1.

circa 150 tonnellate fra combustibile di biossido di uranio e prodotti di fissione, e si stima che fra il 13 e il 30% di questo materiale radioattivo sia stato immesso nell'ambiente.

La radioattività totale emessa è stata quindi di 12×10^{18} Bq, per metà dovuta allo xeno-133, un gas inerte il cui tempo di dimezzamento è di 5 giorni²⁸. Solo fra il 3 e il 4% del materiale solido venne emesso, ma il 100% dei gas nobili e fra il 20 e il 60% dei radioelementi volatili entrarono nell'atmosfera. I radionuclidi di maggior impatto sanitario sono lo iodio-131 (tempo di dimezzamento di 8 giorni), lo stronzio-90 e il cesio-137 (tempo di dimezzamento di circa 30 anni): la nube radioattiva conteneva circa $1,7 \times 10^{18}$ Bq di iodio e $8,5 \times 10^{16}$ Bq di cesio²⁹. Per un confronto, la radioattività del cesio fu 560 volte quella emessa dalla bomba su Hiroshima e quella dello iodio 6 volte.

Gli effetti sanitari immediati più importanti furono dovuti allo iodio, che si concentra nella tiroide, ma sui tempi lunghi l'attenzione è rivolta alla contaminazione da cesio. Va notato che un'informazione tempestiva sulle precauzioni da prendere e una sollecita evacuazione delle zone più colpite avrebbe potuto mitigare notevolmente le conseguenze mediche dovute allo iodio, in particolare i tumori alla tiroide.

La pioggia depositò gran parte dei materiali radioattivi in prossimità del reattore: il 70% in Bielorussia, il resto suddiviso fra Ucraina, Russia e il resto dell'emisfero nord. La distribuzione delle piogge portò a una distribuzione molto disomogenea della contaminazione: anche località lontane 400 km da Chernobyl dovettero venire evacuate.

Le autorità sovietiche suddivisero le zone contaminate in 4 classi, a seconda del livello di radiazione depositata: superiore a 1.480 kBq per m², fra 555 e 1.480 kBq per m², fra 185 e 555 kBq per m², fra 37 e 185 kBq per m². Nella prima zona 135.000 persone ricevettero più di 5 mSv/anno e furono evacuate; nella seconda 270.000 ricevettero fra 2 e 5 mSv/anno: fu favorito il loro allontanamento e furono sottoposte a un continuo controllo medico obbligatorio; nella terza 580.000 persone ricevettero fra 1 e 2 mSv/anno ed ebbero un controllo medico speciale; infine i 4 milioni di abitanti la quarta zona ricevettero meno di 1 mSv/anno ed ebbero un controllo medico regolare. Va ricordato che nei territori considerati la radiazione naturale è di circa 2,4 mSv/anno.

²⁸ Il bequerel (Bq) è la corrente unità di misura della radioattività: 1 Bq corrisponde a una disintegrazione al secondo. I nuclei radioattivi hanno una probabilità fissa di decadere emettendo radiazione e di trasformarsi in un altro nucleo: il tempo di dimezzamento misura il tempo necessario affinché il 50% dei nuclei di un dato tipo decada; ad esempio, dopo 10 tempi di dimezzamento rimane meno di un millesimo del radionuclide iniziale. Più piccolo è il tempo di dimezzamento, prima viene meno il radionuclide. I tempi di decadimento variano enormemente a seconda delle specie nucleari, da milionesimi di secondo a miliardi di anni.

²⁹ Y.P. Buzulukov, Y.L. Dobrynin, *Release of Radionuclides During the Chernobyl Accident*, cit.

Seramente esposti furono i primi liquidatori, che, come abbiamo già visto, ricevettero in media 165 mSv/anno, con punte molto più alte.

Le conseguenze sanitarie dell'esposizione alla radioattività sono state studiate da gruppi di esperti dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) a distanza di 10 e 20 anni dal disastro³⁰. L'ultimo studio si è svolto dal 2003 al 2005 nell'ambito del Chernobyl Forum che ha riunito centinaia di scienziati, economisti ed esperti di problemi sanitari per esaminare l'impatto sanitario, ambientale, sociale ed economico a 20 anni dal disastro. Il Forum è composto da 8 agenzie specializzate dell'ONU, l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), il Programma dell'ONU per lo Sviluppo (UNDP), l'Organizzazione per il Cibo e l'Agricoltura (FAO), il Programma dell'ONU per l'Ambiente (UNEP), l'Ufficio ONU per il Coordinamento degli Affari Umanitari (UN-OCHA), il Comitato Scientifico dell'ONU sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (UNSCEAR), con la Banca Mondiale e i governi della Bielorussia, Federazione Russa e Ucraina. Il Forum aveva il compito di generare asserzioni consensuali autorevoli sulle conseguenze ambientali e gli effetti sanitari attribuibili all'esposizione alle radiazioni prodotte dall'incidente, e di fornire suggerimenti per la bonifica ambientale e sui programmi sanitari speciali e per l'individuazione delle aree che richiedano ulteriori ricerche. Il Forum ha recentemente prodotto un documento di 600 pagine in 3 volumi che presenta i risultati di tre anni di lavoro e di dibattiti³¹.

Le radiazioni in alte dosi producono una patologia specifica, la sindrome acuta da radiazioni (ARS), quelle a dosi limitate aumentano la probabilità di sviluppare neoplasie, cataratte e disturbi cardiovascolari.

Risulta che 134 fra i liquidatori³² ricevettero dosi sufficienti a sviluppare la ARS: 28 di loro morirono nel corso del 1986 e altri 19 in seguito.

Fra le forme di cancro legate alle radiazioni il più frequente e documentato è il cancro alla tiroide che concentra lo iodio. La grande quantità di iodio radioattivo emessa nel disastro, contro cui nei primi giorni non venne messa in atto alcuna protezione – come evitare l'uso di latte prodotto nelle zone più esposte – ha portato a un notevole aumento di tumori tiroidei. Finora sono stati diagnosticati e curati nelle zone interessate circa 5000 casi:

³⁰ B. Bennett, M. Repacholi, Z. Carr, *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes*, Geneva, World Health Organization, 2006.

³¹ Chernobyl Forum, *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts*, New York, UN, 2006.

³² UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume II: Effects*, New York, UN, 2000.

fortunatamente esistono trattamenti medici efficaci, ma 9 decessi di bambini sono attribuibili direttamente alle radiazioni subite.

A questi casi vanno aggiunti 2 operai morti per cause non legate alle radiazioni, portando le morti accertate a 58.

Rimangono gli effetti a lungo termine dell'irraggiamento con il conseguente aumento della probabilità di morbilità. Poiché non vi è alcun modo di distinguere le malattie dovute alle radiazioni dalle corrispondenti patologie dovute ad altre cause, previsioni sugli effetti medici dell'incidente di Chernobyl possono essere solo di tipo statistico, sulla base di quanto si sa sulla probabilità che un dato livello di radiazione induca questa o quella malattia. In realtà, mentre ci sono dati accurati sugli effetti di alte dosi, non ci sono ancora risultati scientificamente provati nel caso di dosi medie e basse, in particolare sotto i 100 mSv.

Molti scienziati ritengono che esista una soglia sotto la quale le radiazioni non producono alcun effetto patologico, mentre altri suggeriscono che si possano estrapolare i dati certi a dosi elevate fino a dosi bassissime utilizzando un modello lineare, ossia di proporzionalità diretta fra dose e probabilità. Quest'ultimo modello è stato adottato dall'Accademia delle Scienze americana³³ e accolto anche dal WHO nelle sue previsioni delle conseguenze dell'incidente.

Lo studio del WHO ha distinto due gruppi di popolazione: un gruppo più esposto, comprendente 240.000 liquidatori, 116.000 evacuati e 270.000 residenti nella zona sottoposta a controllo speciale, e un secondo gruppo comprendente i 5.000.000 di abitanti della zona limitatamente contaminata. Le previsioni di morbilità e mortalità previste dal modello lineare per il primo gruppo indicano un aumento del 3-4% dei casi di cancro durante la loro vita, che potrà portare a 4.000 decessi; per il secondo gruppo ci potrà essere un aumento dello 0,6% delle patologie, con circa 5.000 morti nel corso degli anni.

Alcuni ricercatori hanno osservato che l'adozione del modello lineare impone di considerare anche gli effetti su tutta la popolazione comunque esposta nell'emisfero settentrionale, anche se ha ricevuto minime dosi³⁴: si avrebbero ulteriori 15.000 possibili decessi, una minima frazione delle decine di milioni di morti per cancro previste in tale popolazione per altre cause, ma tuttavia da tener conto nel bilancio di vite umane pagate per il disastro di Chernobyl. Alcune organizzazioni hanno avanzato ulteriori riserve sulla base dei dati e sulle previsioni del Forum³⁵.

³³ National Research Council, US National Academy of Science, *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, BEIR VII Report (2006), Washington, National Academy Press, 2006.

³⁴ R.L. Garwin, *Chernobyl's Real Toll*, in «United Press International», 9 November 2005, p. 19.

³⁵ M. Peplow, *Counting the Dead*, in «Nature», 440, 2006, p. 982; M. Flynn, *Chernobyl: Hardly the Last Word*, in «Bulletin of the Atomic Scientists», 62, 2006, p. 14.

Date le basse dosi, lo studio del WHO non prevede effetti genetici ed ereditari né conseguenze per la fertilità e malformazioni congenite³⁶. Ha individuato invece importanti effetti psicologici e sulla salute mentale. L'incidente ha comportato lo spostamento forzato o volontario di centinaia di migliaia di persone, perdita di sicurezza economica, minacce a lungo termine alla salute, perdita di benessere fisico ed emotivo, aumento della povertà; tutto ciò ha prodotto diffusi timori, ansia, confusione e disordini mentali, anche se non a livelli tali da richiedere trattamenti medici specifici.

Ai problemi sanitari vanno aggiunti i danni economici e ambientali del disastro, che ha comportato la chiusura totale della centrale, gli interventi sul reattore, lo spostamento delle persone, la contaminazione di quasi 200.000 km², una superficie pari a 2/3 dell'Italia. Una zona di 45.000 km², come una grande provincia italiana, è stata completamente esclusa per ogni possibile uso, e lo resterà per almeno 10 tempi di dimezzamento del cesio-137, ossia 3 secoli.

784.320 h sono stati tolti all'agricoltura e 694.200 h alla silvicoltura, migliaia di capi di bestiame sono stati abbattuti. Le foreste sono più sensibili alle radiazioni che le zone agricole per le capacità di assorbimento degli alberi. Una volta irradiate, le foreste conservano a lungo la contaminazione e prodotti delle foreste, funghi, bacche e cacciagione, resteranno a lungo inutilizzabili a causa della radiazione³⁷. Non vi è al momento contaminazione delle falde acquifere, in particolare da stronzio-90, ma può prodursi nel tempo nelle zone a valle di Chernobyl.

A causa delle difficoltà economiche, in seguito anche alla caduta dell'Unione Sovietica, e per inadeguatezza organizzativa, i programmi di sviluppo inizialmente previsti non si sono concretizzati. Conseguentemente i giovani hanno lasciato i territori, anche modestamente irradiati, con le loro famiglie, lasciando solo i più anziani. La mancanza di giovani impedisce lo sviluppo sociale ed economico delle zone contaminate. La carenza di insegnanti e di medici peggiora la qualità dell'insegnamento e dell'assistenza. Imprese e fattorie devono chiudere per mancanza di manodopera qualificata. Ciò a sua volta spinge altre famiglie ad andarsene, in un circolo vizioso.

Se nella prima fase di intervento fu indispensabile che i provvedimenti fossero decisi dalla dirigenza, finita l'emergenza continuare in una gestione dall'alto, trascurando di prendere in con-

³⁶ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Hereditary Effects of Radiation. 2001 Report to the General Assembly, with Scientific Annex, UNSCEAR (2001)*, New York, United Nations, 2001.

³⁷ I pini della «Foresta Rossa» di 375 h nei pressi di Pripjat ricevettero dosi fino a 100 Gy e morirono tutti. Per ridurre la contaminazione del suolo e per evitare la dispersione dei radionuclidi in seguito a incendi delle piante, nel 1987 gli alberi vennero abbattuti e rimosso uno strato di terreno profondo 10-15 cm. Questo materiale – circa 100.000 m³ – è stato quindi sepolto in fosse, riducendo in questo modo la contaminazione del suolo di un fattore 10.

siderazione le esigenze della popolazione e i loro suggerimenti, è fra le cause degli attuali gravi problemi sociali. Le azioni non furono adeguate e produssero una profonda crisi di fiducia nelle popolazioni delle zone inquinate. Attualmente, anche per iniziative internazionali, si stanno intraprendendo azioni che coinvolgono direttamente gli interessati nel processo decisionale e che promettono maggiore efficacia³⁸.

Le stime dei danni economici fino al 2015 raggiungono in Bielorussia i 43,3 miliardi di dollari; i costi legati alle conseguenze del disastro costituivano nel 1991 il 22,3% del bilancio nazionale, per scendere al 10,9% nel 1995 e a circa il 6% attuali. In Ucraina nello stesso periodo i costi arriveranno a 201 miliardi di dollari, pesando sul bilancio nazionale per il 15% nel 1992, per il 6% nel 1996 e per il 5% attualmente. Lo Stato russo fra il 1992 e il 1998 spese circa 3,8 miliardi di dollari, quasi tutti in compensazione delle vittime e dei soccorritori.

Al momento il problema più grave è la protezione e la bonifica del reattore esploso. Dopo 20 anni il «sarcofago» mostra segni di cedimento e infiltrazioni, con il pericolo di nuove emissioni radioattive³⁹. Esiste un programma internazionale per una sistemazione valida almeno per un secolo e una bonifica dei materiali radioattivi, inclusi gli 800 depositi dei macchinari e veicoli usati e del materiale radioattivo raccolto dall'ambiente, racchiuso in container o sepolto, ma i costi del progetto stanno salendo più rapidamente dei fondi disponibili, e sfiorano attualmente il miliardo di dollari. Il Summit G8 nella riunione del 15-17 luglio 2006 a San Pietroburgo ha raggiunto un accordo per «progetti congiunti con l'Ucraina finalizzati a rafforzare la sicurezza delle strutture della centrale nucleare di Chernobyl».

L'incidente e le radiazioni non risparmiarono il resto dell'Europa. La nuvola radioattiva si spostò guidata dai venti: inizialmente si diresse a nord-ovest interessando Scandinavia, Olanda, Belgio e Gran Bretagna; quindi deviò a sud interessando l'Europa centrale, il Nord Mediterraneo e i Balcani. La quantità di depositi radioattivi, essenzialmente isotopi di cesio, dipese soprattutto dalle precipitazioni piovose durante il passaggio della nube. Gli effetti maggiori si ebbero in Austria, Svizzera, Germania meridionale e Svezia, superando in alcune zone i 30 kBq per m², mentre i Paesi meno esposti furono la Francia e la penisola iberica⁴⁰.

Anche le autorità europee vennero prese di sorpresa dall'evento:

³⁸ Committee on Radiation Protection and Public Health, OECD, *Stakeholders and Radiological Protection: Lessons from Chernobyl 20 Years After*, Paris, OECD, 2006.

³⁹ Un piccolo gruppo di scienziati lavora all'interno del sarcofago per osservare l'evoluzione del reattore disastroso. Recentemente sono stati effettuati interventi di rafforzamento di strutture instabili del sarcofago.

⁴⁰ UNDP/UNICEF, *The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery*, New York, UN, 2002.

mancando informazioni accurate e procedure definite per la gestione delle conseguenze dell'incidente, e di fronte a notevoli pressioni pubbliche e politiche, molti Governi presero misure precauzionali eccessive, in particolare riguardo al cibo⁴¹. Ciò aumentò la confusione del pubblico e produsse sfiducia e danni economici evitabili. Comunque in breve tempo iniziative internazionali iniziarono ad armonizzare criteri e approcci alla gestione dell'emergenza.

9. Conclusioni

L'incidente di Chernobyl mise chiaramente in evidenza notevoli carenze delle autorità nazionali, in Unione Sovietica ma anche in Europa, nell'affrontare gravi emergenze tecnologiche, in particolare dovute alla contaminazione radioattiva. In risposta ci fu un nuovo impeto nella ricerca della sicurezza nucleare e in generale una revisione critica delle conoscenze sulla radioprotezione e sugli atteggiamenti verso le emergenze nucleari.

Ciò portò a studi approfonditi degli effetti delle radiazioni e del loro trattamento, a una ripresa della ricerca radio-ecologica e dei programmi di monitoraggio, alla ridefinizione di procedure di emergenza e a criteri e metodi efficaci di informazione al pubblico.

La progettazione e la gestione degli impianti, e in generale dei sistemi, nucleari venne riconsiderata alla luce di una nuova mentalità che privilegia la sicurezza rispetto alle variabili economiche.

Ma la lezione più importante imparata dai governi è stata senza dubbio il cambiamento radicale del loro atteggiamento nei riguardi delle catastrofi di origine tecnologica. Si accettò innanzitutto il fatto che in ogni settore delle applicazioni tecnologiche possono avvenire gravi incidenti, con la conseguente necessità di pianificare in anticipo le necessarie misure di intervento: la sicurezza assoluta di un qualsiasi impianto è una pericolosa utopia. Si riconobbe poi il carattere transnazionale dei grandi incidenti e, quindi, la necessità di azioni comuni e di esercitazioni di soccorso a livello sia nazionale che internazionale.

Si attenuarono inoltre le resistenze dei vari governi ad accettare delle regole generali sulla sicurezza nucleare e vincoli internazionali sulla gestione degli impianti civili e delle eventuali emer-

⁴¹ Nuclear Energy Agency, OECD, *Chernobyl Assessment of Radiological and Health Impacts*, Paris, OECD, 2002.

genze. Negli anni successivi si poterono così concretizzare importanti accordi e convenzioni internazionali e il rafforzamento del ruolo di assistenza e controllo delle agenzie di settore dell'ONU, in particolare dell'IAEA.

Come vedremo nella seconda parte di questo lavoro, esistono ancora problemi aperti e spazio per regole più stringenti ed efficaci, specialmente in questa fase che vede una significativa ripresa dell'energia nucleare in varie parti del mondo.