



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Rapporto di analisi critica degli incidenti occorsi agli impianti di Fukushima

G. Grasso e F. Rocchi

RdS/2012/132

RAPPORTO DI ANALISI CRITICA DEGLI INCIDENTI OCCORSI AGLI IMPIANTI DI FUKUSHIMA
G. Grasso e F. Rocchi ENEA

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, Gestione e Sviluppo, del Sistema Elettrico Nazionale

Progetto: Nuovo Nucleare da Fissione: Collaborazioni Internazionali e sviluppo Competenze in Materia Nucleare

Responsabile del Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

Titolo

Rapporto di analisi critica degli incidenti occorsi agli impianti di Fukushima

DescrittoriTipologia del documento: **Rapporto Tecnico**Collocazione contrattuale: **Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"**

Argomenti trattati:

Sommario

L'ENEA, attivatasi immediatamente per lo studio in tempo reale dell'incidente alla centrale nucleare di Fukushima-Dai-ichi, ha proseguito le proprie analisi sull'evento e sulle sue conseguenze tanto a livello interno, quanto partecipando a congressi e sessioni di lavoro in contesto internazionale.

ENEA si è anche fatta promotrice del primo evento di studio rivolto alla comunità nucleare e radioprotezionistica nazionale, organizzando il Workshop "*One year after Fukushima: rethinking the future*", tenutosi a Bologna ad un anno dall'evento. Tale occasione ha consentito non solo di condividere le più aggiornate informazioni tecniche e di contaminazione relative all'incidente, ma anche di creare una base comune tra i principali attori della scena nucleare italiana, per avviare una riflessione sinergica sul futuro del nucleare dopo Fukushima in un contesto internazionale.

Nel presente rapporto sono analizzate le principali lezioni tratte dall'analisi dell'incidente, e l'impatto che queste avranno sull'intera comunità scientifica nucleare.

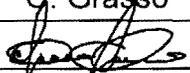
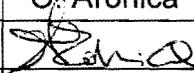
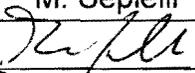
Note

Autori: G. Grasso e F. Rocchi

Unità Tecnica Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile (UTFISSM) – ENEA Bologna

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	19/09/12	NOME	G. Grasso	O. Aronica	M. Sepielli
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP1 - 017	0	L	2	17

Indice

1. Introduzione	3
2. Rianalisi fredda dell'evento e delle sue conseguenze.....	3
2.1. Disamina delle singole evidenze emerse dall'analisi della sequenza incidentale.....	4
2.2. Considerazioni preliminari sull'impatto radiologico dell'incidente sulla popolazione e sull'ambiente.....	4
3. Le lezioni apprese dalla comunità internazionale.....	11
3.1. Irrobustimento delle misure di prevenzione degli incidenti severi.....	11
3.2. Irrobustimento delle misure di risposta agli incidenti severi.....	12
3.3. Irrobustimento della risposta alle emergenze nucleari.....	13
3.4. Irrobustimento dell'infrastruttura di sicurezza e approfondita disseminazione della cultura della sicurezza	13
3.5. Ulteriori considerazioni e raccomandazioni della Dieta Nazionale del Giappone	14
4. Pianificazione delle priorità di ricerca e sviluppo.....	14
5. Conclusioni	15
Bibliografia.....	17

1. Introduzione

In relazione all'incidente alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi, occorso l'11 marzo 2011, causato dal black-out completo determinatosi sul sito a seguito della perdita di ogni forma di off-site power, dell'allagamento dei locali dei generatori diesel di emergenza e dell'esaurimento delle batterie per l'alimentazione in corrente continua delle valvole e della strumentazione d'impianto, sono di seguito riportati i principali risultati delle analisi e considerazioni svolte in prosecuzione delle attività avviate immediatamente a valle dell'evento, che già portarono alcuni ricercatori ENEA alla redazione di un rapporto tecnico sulle specifiche degli impianti interessati e sulla cronologia meditata della sequenza incidentale [1].

Il reperimento di informazioni più dettagliate sull'incidente – dalla sua dinamica, allo stato attuale degli impianti e alla contaminazione ambientale – è stato il fulcro delle suddette attività; attività che includono la partecipazione di alcuni esperti a diverse conferenze sul tema, tenutesi ad un anno di distanza dagli eventi in tutto il mondo.

Parallelamente a ciò, e grazie al supporto di questo Accordo di Programma, è stato possibile organizzare il Workshop Internazionale *"One year after Fukushima: rethinking the future"*, tenutosi a Bologna il 15 e 16 marzo 2012 [2]. Tale evento ha rappresentato il primo momento di condivisione e riflessione per l'intera comunità nucleare e radioprotezionistica italiana, consentendo un confronto tecnico fra esperti su temi che – alla luce delle più recenti, comprensive ed esaurienti informazioni relative all'evento – hanno spaziato dall'analisi della sequenza incidentale, alle misure sull'effettivo rilascio di radioattività dagli impianti e sulla contaminazione del suolo e delle acque, dalla valutazione della gestione dell'emergenza alla disamina delle *lessons learned* sull'incidente, grazie alla nutrita delegazione di relatori pervenuti, composta da alcuni dei massimi esperti nei campi della sicurezza nucleare e del monitoraggio delle radiazioni. La caratura del Workshop ha permesso ad ENEA la segnalazione dell'evento all'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), che ne ha benevolmente accolto la notizia, inquadrando l'iniziativa nel contesto delle attività condotte in tutto il mondo per l'attuazione del "IAEA Action Plan on Nuclear Safety" [3].

Alla luce degli studi e delle considerazioni svolte in seno alla comunità scientifica internazionale, sono di seguito riportate le principali riflessioni sul tema della sicurezza nucleare e le principali raccomandazioni che già stanno determinando l'evoluzione dell'approccio al tema dell'implementazione della sicurezza nucleare.

2. Rianalisi fredda dell'evento e delle sue conseguenze

Come ampiamente descritto già nel rapporto tecnico emesso da questa Unità Tecnica lo scorso anno [1], la causa scatenante l'incidente alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi è stato il black-out completo sull'impianto, determinato dalla combinazione dell'interruzione dell'alimentazione esterna, provocata dalla distruzione dei tralicci e delle stazioni di trasformazione a causa del terremoto di magnitudo 9.0, e alla messa fuori uso dei generatori diesel di emergenza, causata dalla vasta inondazione del sito conseguente all'arrivo di uno tsunami di incredibili proporzioni (circa 15 m). Questa combinazione di eventi ha infatti differenziato il comportamento dei reattori di Fukushima-Daiichi da quello di altri impianti dislocati lungo la costa nord-orientale dell'isola di Tohoku (Fukushima-Daini, Onagawa e Tokai); impianti

spesso analoghi a quelli della tristemente più celebre centrale, che però hanno potuto contare sul mantenimento dell'operatività dei sistemi di raffreddamento di sicurezza dei reattori capaci di preservare l'integrità degli impianti stessi.

2.1. Disamina delle singole evidenze emerse dall'analisi della sequenza incidentale

Entrando più in dettaglio nell'identificazione delle cause puntuali che hanno determinato l'incidente nella sua specifica dinamica, si possono enumerare le seguenti evidenze, emerse dalle analisi e dagli studi condotti già a partire dal giorno dell'incidente:

- mancanza di diversificazione dei sistemi – peraltro *safety-grade* – ausiliari di generazione di corrente elettrica alternata;
- insufficiente disponibilità di fonti di alimentazione in corrente continua (comparata alla durata della mancanza di alimentazione elettrica esterna del sito);
- insufficiente capacità dei sebratoi freddi (*ultimate heat sink*) per l'evacuazione finale del calore di decadimento (comparata al tempo impiegato per l'allestimento di una sorgente fredda alternativa);
- difficile accessibilità dei circuiti d'impianto per l'iniezione alternativa di acqua fredda nel reattore, nel contenimento primario e nelle piscine di stoccaggio degli elementi esausti (determinata dalle particolari condizioni in cui ha versato il sito, devastato dallo tsunami);
- rigidità gerarchica del sistema di gestione delle emergenze;
- sovrapposizione di ulteriori complicazioni data dall'interazione fra gli effetti conseguenti all'evoluzione degli incidenti in corso sui reattori adiacenti, e le operazioni di gestione in corso su ciascun sistema.

È ad ogni modo importante, nell'analisi che seguirà, separare i problemi direttamente connessi con le cause elementari sopra elencate dalle contingenze dell'evento specifico. È infatti evidente che tutte queste cause elementari fanno capo ad una situazione di generale devastazione – dell'ambiente, delle strutture e dei sistemi di comunicazione – determinate principalmente dallo tsunami: situazione che ha portato ad esacerbare quelle che altrimenti sarebbero state solo potenziali debolezze dell'intero sistema.

2.2. Considerazioni preliminari sull'impatto radiologico dell'incidente sulla popolazione e sull'ambiente

Per completare il quadro delle informazioni necessarie a trarre considerazioni di qualsiasi natura sull'incidente, è doveroso passare in rassegna le informazioni relative all'impatto ambientale e sanitario legate allo stesso.

Le attività di monitoraggio, coordinate e in larga parte condotte dal Ministero per l'educazione, la cultura, lo sport, le scienze e la tecnologia (MEXT) sono state avviate immediatamente dopo l'inizio dell'incidente, con la massima capillarità possibile sul territorio, compatibilmente con l'effettiva disponibilità della rete di acquisizione e trasmissione dei dati. Al monitoraggio in tempo reale è seguita una vasta campagna di campionamento dei suoli, delle acque e dei sedimenti, affidata all'Agenzia per l'Energia Atomica giapponese (JAEA), al fine di ricostruire una dettagliata mappa di contaminazione per una valutazione esatta delle conseguenze radiologiche

dell'incidente, ed una pianificazione delle azioni di decontaminazione. In Figura 1 [4] è riportata – ad esempio – una mappa di campionamento dei suoli, con il livello di dettaglio adottato per il monitoraggio fine della contaminazione.

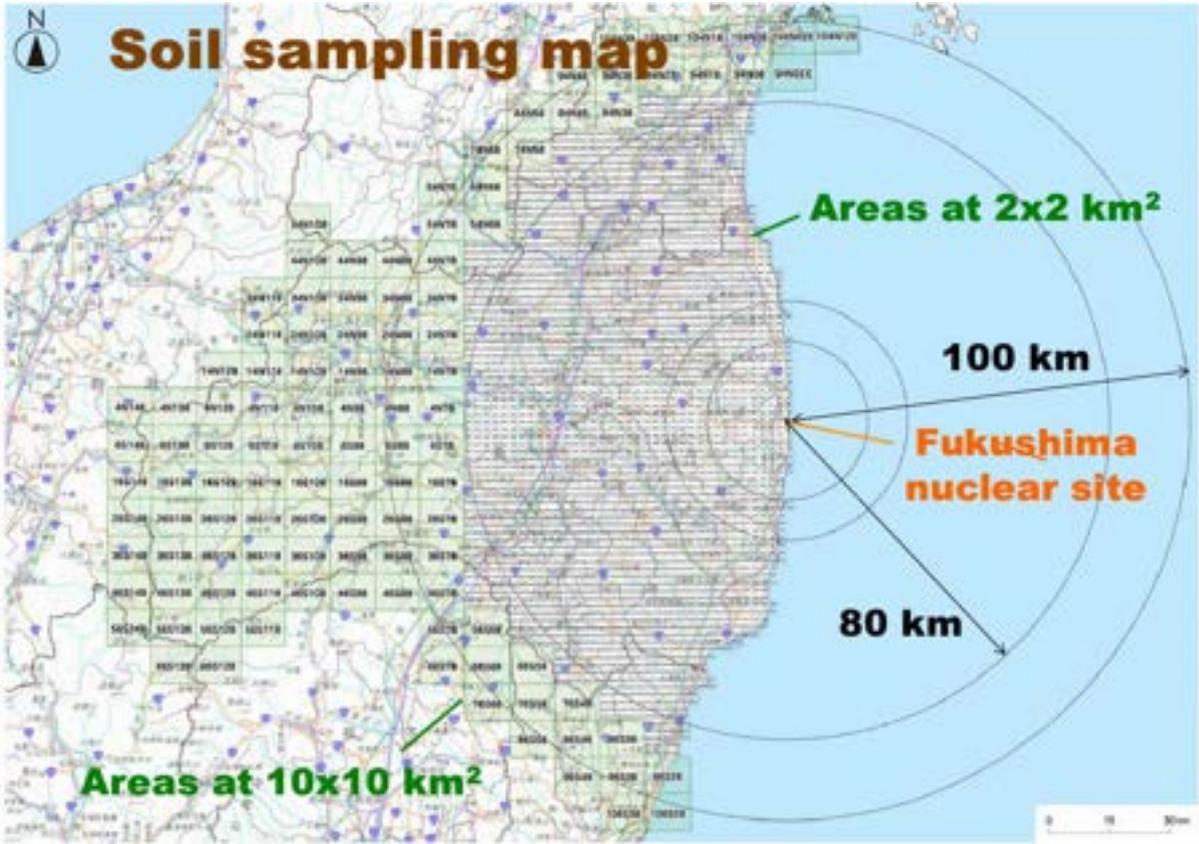


Figura 1. Griglia di campionamento per analisi di deposizione di radioisotopi al suolo.

I risultati delle analisi sono riassunti nelle immagini seguenti [4], con riferimento al campionamento dei suoli (Figure 2 a 5, per gli isotopi responsabili del 99% della contaminazione) ed al monitoraggio ambientale via terra (Figura 6) e via aria (Figura 7).

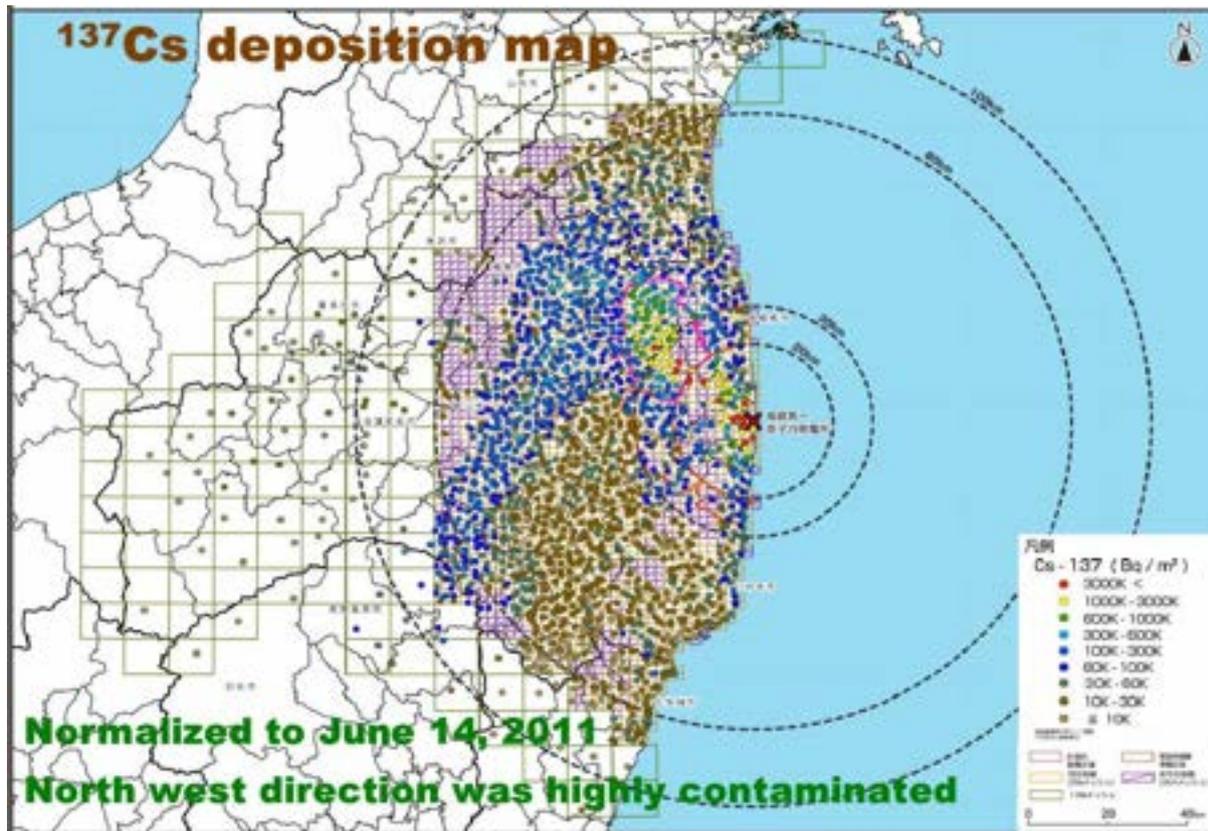


Figura 2. Mappa di deposizione al suolo del ^{137}Cs .

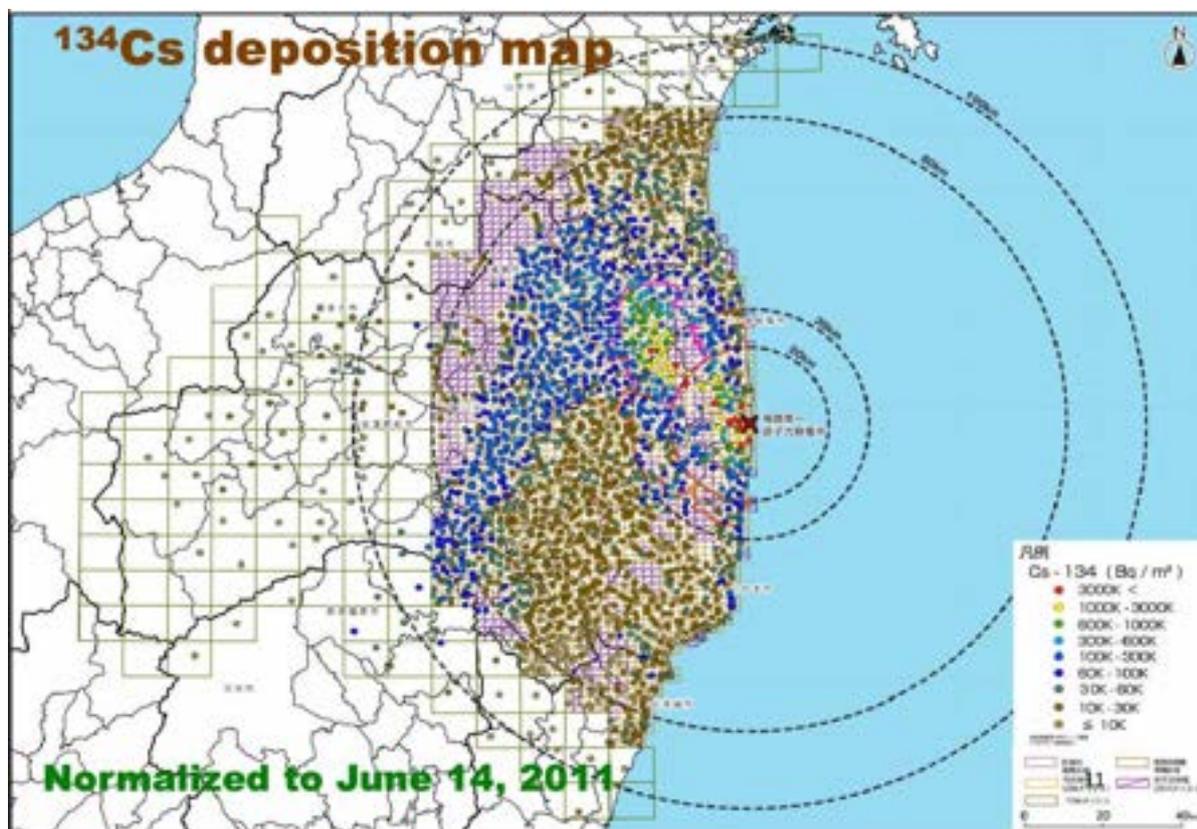


Figura 3. Mappa di deposizione al suolo del ^{134}Cs .

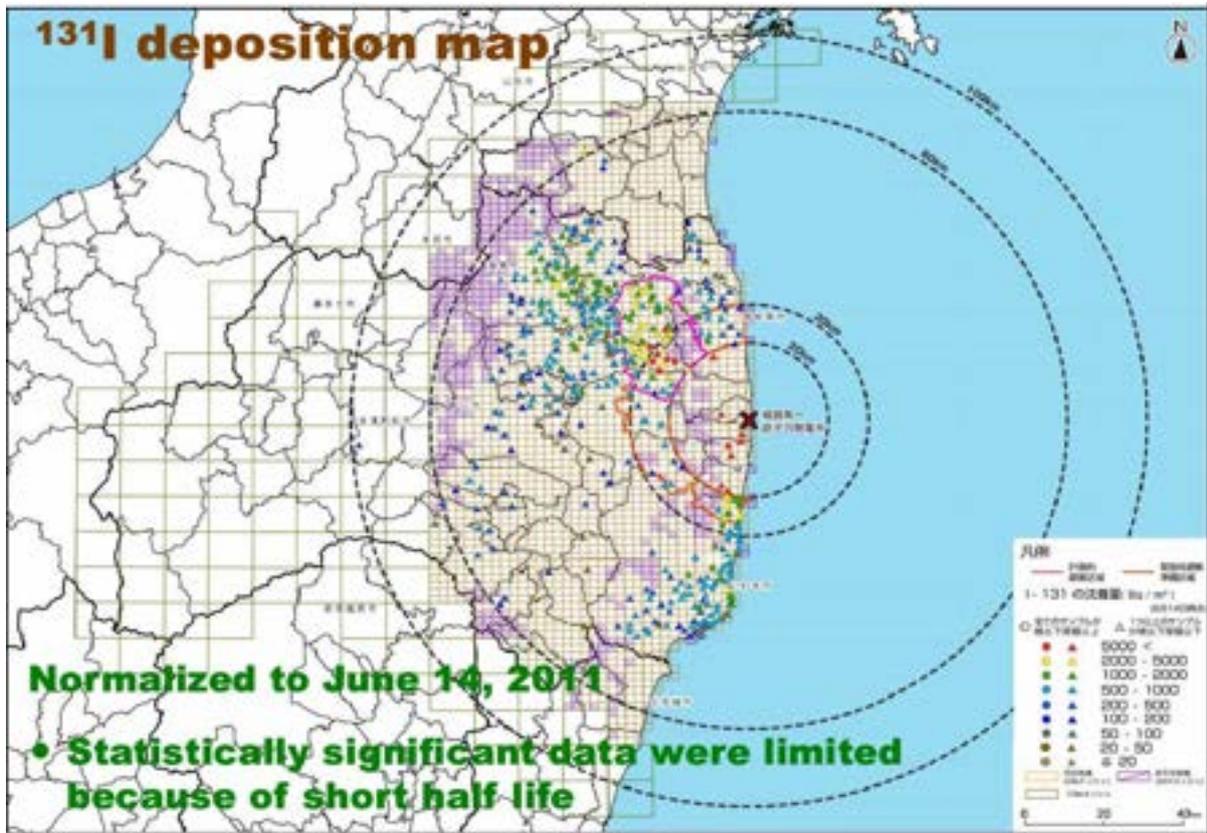


Figura 4. Mappa di deposizione al suolo dello ^{131}I .

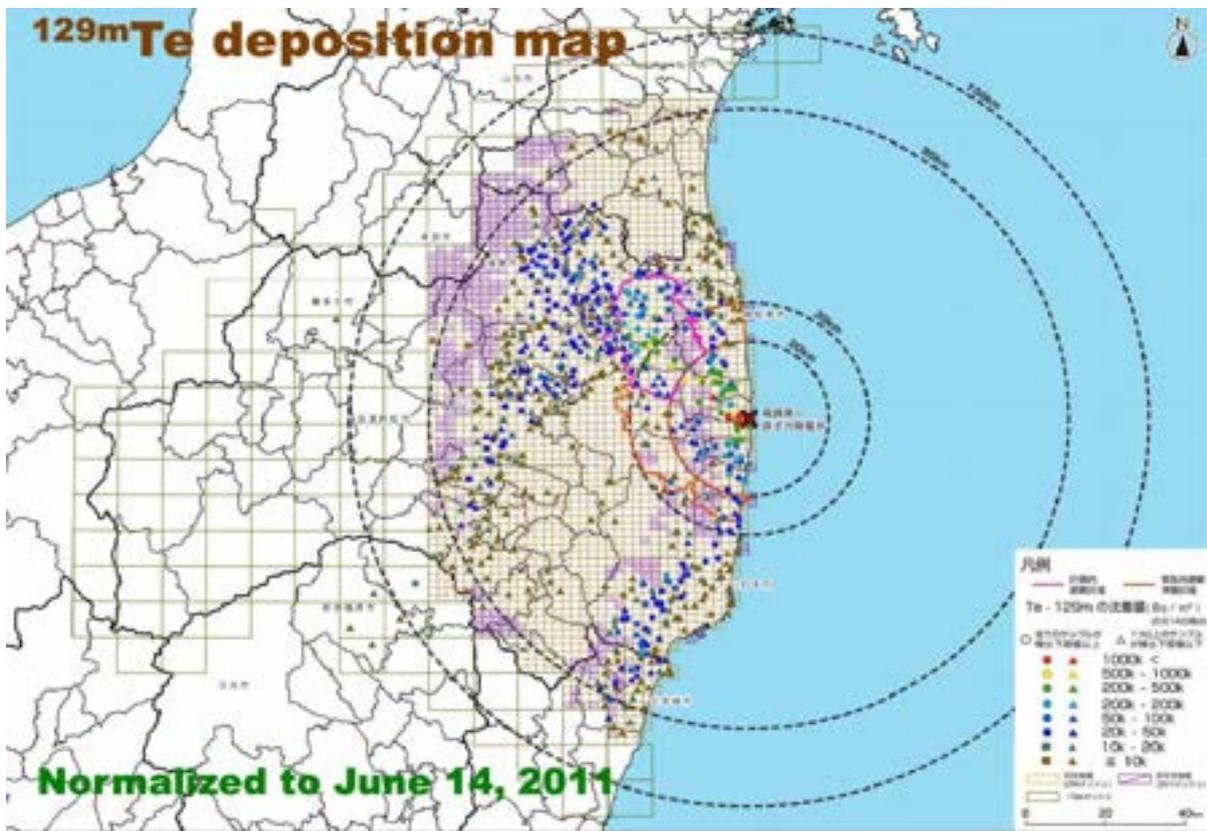


Figura 5. Mappa di deposizione al suolo del $^{129\text{m}}\text{Te}^*$.

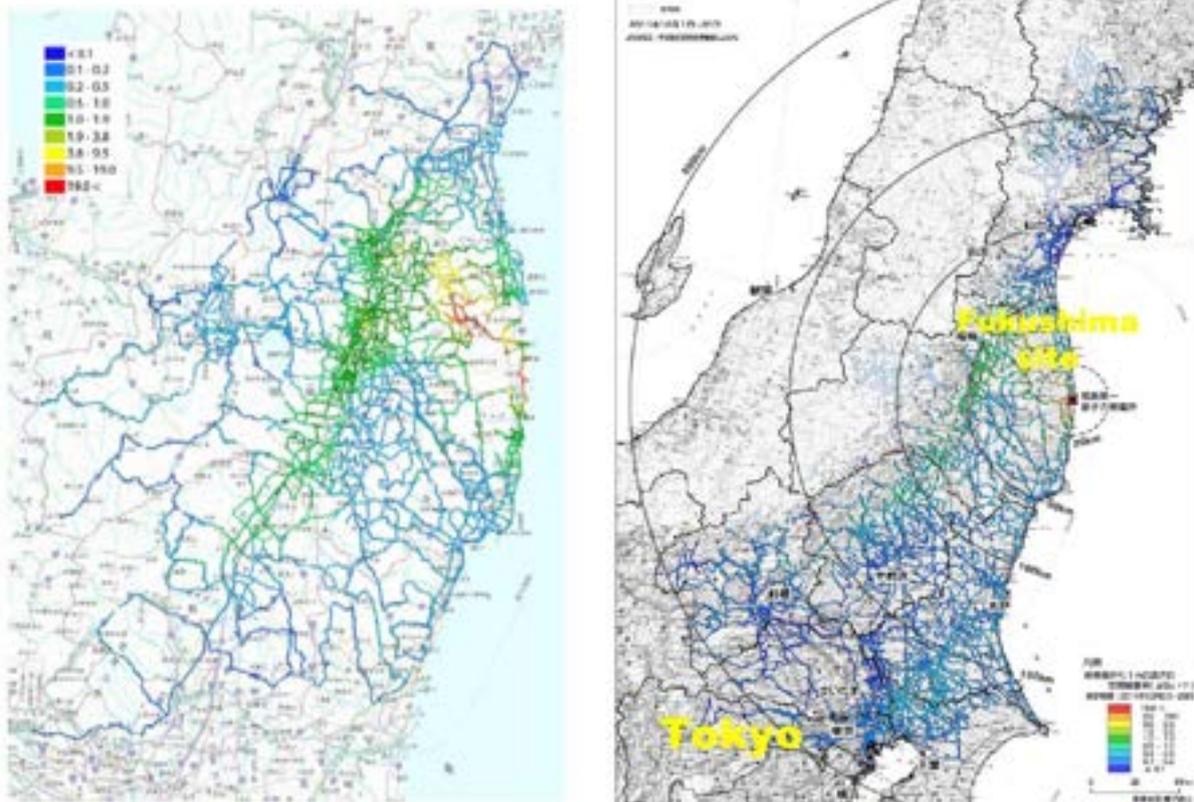


Figura 6. Mappa delle misure di radioattività ambientale rilevate via terra a Giugno 2011 (sinistra) e a Dicembre dello stesso anno (per confronto).

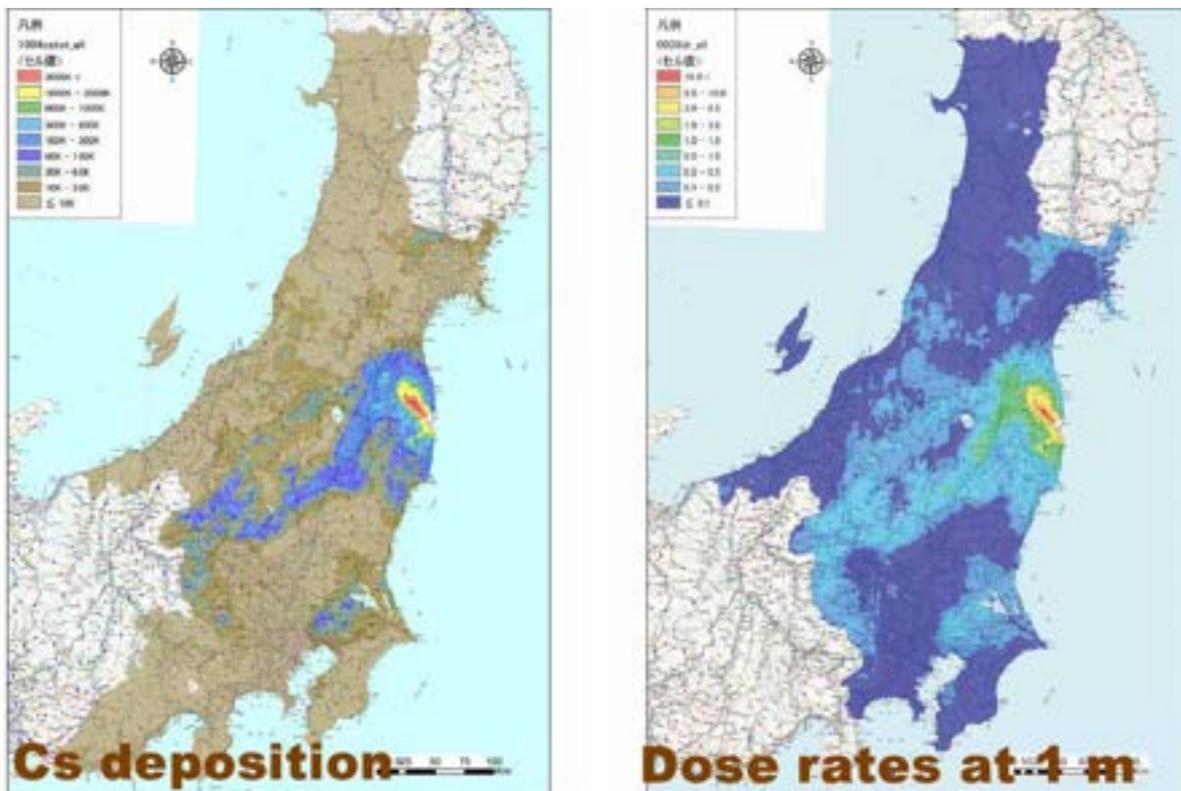


Figura 7. Mappa della deposizione al suolo del ^{137}Cs e misure di radioattività ambientale rilevate via aria.

I risultati di tali analisi hanno permesso di identificare con elevata precisione le zone a diversa contaminazione, individuando le aree di esclusione, quelle di allontanamento volontario e quelle non interessate da contaminazione con effetti sanitari (ovvero, dove il grado di contaminazione ambientale dovuta ai rilasci seguiti dall'incidente si confonde con il fondo radioattivo ambientale). In Figura 8 [4] sono riportate tali aree sulla mappa della regione interessata.



Figura 8. Mappa di deposizione al suolo del 137Cs.

Per meglio apprezzare il livello di contaminazione delle aree adiacenti il sito della centrale di Fukushima-Daiichi, è utile confrontare la mappa di contaminazione di Figura 7 con quella – analoga – ricostruita in seguito all'incidente di Chernobyl (Figura 9).

Da tale figura è immediato evincere non solo che le emissioni avutesi in seguito all'incidente di Fukushima sono di molto inferiori a quelle che si ebbero dopo l'incidente di Chernobyl, ma anche che la contaminazione ambientale si estende su un'area estremamente più piccola, in particolare con riferimento alle aree a più alta contaminazione, per le quali le operazioni di decontaminazione si prospettano più lunghe e difficoltose.

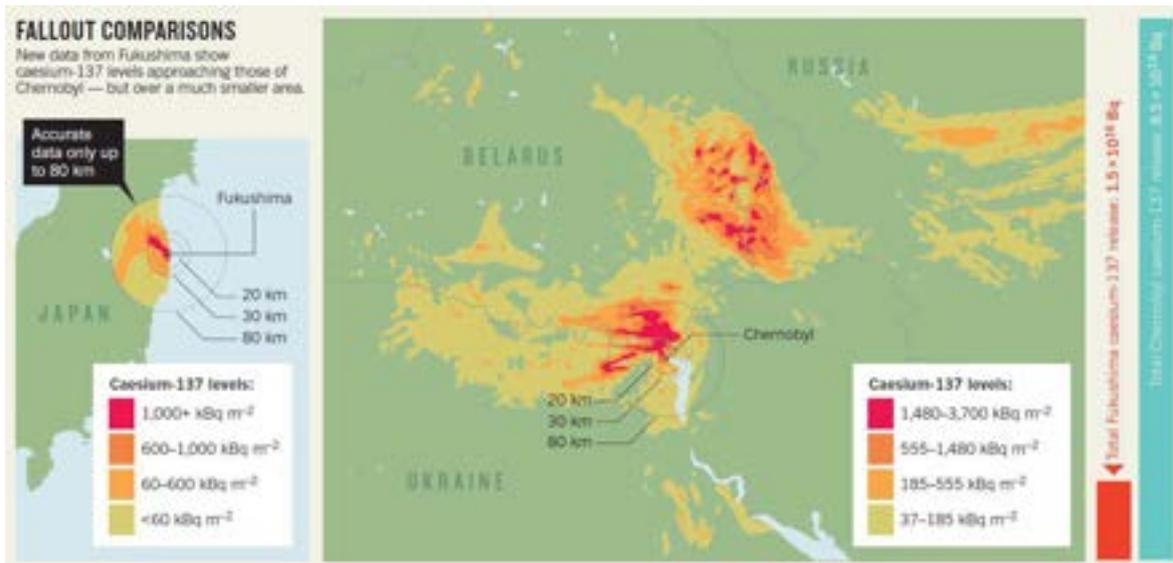


Figura 9. Confronto fra le mappe di contaminazione dovuta agli incidenti di Fukushima e Chernobyl.

Un discorso a parte merita l'analisi delle conseguenze sanitarie dell'evento di Fukushima. Nonostante le condizioni disastrose in cui versava la regione limitrofa all'impianto, in cui svariate città e gran parte delle vie di comunicazione erano state o distrutte dal terremoto o spazzate via dall'onda di tsunami, la pronta diramazione dell'ordine di evacuazione e la sua efficiente attuazione hanno consentito di allontanare la popolazione residente a sufficienza da proteggerla dall'impatto con le radioazioni trasportate dai rilasci, attuati volontariamente dagli operatori della centrale solo a conclusione dell'evacuazione. Questo ha permesso una drastica riduzione della dose inizialmente ricevuta dalla popolazione che, combinata con l'attuale politica di restrizione all'accesso delle zone più contaminate, permetterà di contenere la dose totale accumulata nell'intera vita delle persone più esposte. In Tabella 1 sono incrociati i dati di contaminazione con il numero di persone esposte ai corrispondenti livelli di radiazione [5] in ipotesi di assenza di ogni operazione di decontaminazione.

Tabella 1. Dosi alla popolazione per regione di contaminazione.

Deposits of caesium (137 + 134) (Source MEXT)	> 300,000 Bq/m ²	> 600,000 Bq/m ²	> 1 million Bq/m ²	> 3 millions Bq/m ²	6 - 30 millions Bq/m ²
External dose 1 st year (16.6 mSv by MBq/m ²)	> 5 mSv	> 10 mSv	> 16 mSv	> 50 mSv	100 - 500 mSv
External dose at 10 years (70 mSv by MBq/m ²)	> 19 mSv	> 38 mSv	> 63 mSv	> 190 mSv	380 - 1,900 mSv
External lifetime dose (70 years) (160 mSv par MBq/m ²)	> 41 mSv	> 82 mSv	> 136 mSv	> 408 mSv	816 - 4,080 mSv
Affected population (excluded the no-entry zone)	292,000	69,400			
		43,000	26,400		
			21,100	3,100	2,200

Per quanto concerne le regioni all'esterno di un raggio di 80 km, insieme alle porzioni di territorio all'interno di tale raggio in cui la contaminazione risulti inferiore ai 300 000 Bq/m², la dose cumulata è inferiore ad 1 mSv/a.

Sotto tali ipotesi, le stime più conservative [6] di dose collettiva variano in un range di 800 ÷ 1800 Sv uomo (per confronto, la dose collettiva efficace nel periodo 1986-2005 in seguito all'incidente di Chernobyl fu di circa 400 000 Sv uomo [7]). A tali livelli corrisponde un aumento dell'incidenza della mortalità per cancro di circa lo 0.001% rispetto al tasso di mortalità naturale (1 caso in più ogni 100 000 casi annui normalmente registrati), ovvero un aumento assolutamente confondibile con le fluttuazioni statistiche del tasso di mortalità in condizioni normali.

3. Le lezioni apprese dalla comunità internazionale

Immediatamente conclusasi l'impellenza della gestione dell'emergenza, la comunità scientifica nucleare dell'intero pianeta ha iniziato a fare ciò che ci si aspetta da una comunità tecnica responsabile di fronte al futuro: una approfondita analisi sulle ragioni dell'incidente, al fine di trarne nuove ed ulteriori lezioni per una crescita comune nel campo della sicurezza nucleare.

Inoltre, e una volta in più, una particolare attenzione è stata posta sul concetto di "incidente al di là delle basi di progetto" (*Beyond Design Basis Accident*, BDBA), essendo la comunità nucleare, e solo essa, l'unica ad aver preso in considerazione già da tempo ipotesi di incidenti molto, molto improbabili. Ciò dimostra che i sistemi nucleari sono ancora accuditi con la maggior attenzione possibile dall'unica comunità tecnica di scienziati che si impegna a fare quello che ci si aspetta che faccia: continuare ad apprendere da ogni lezione possibile, tenendo conto di ogni dettaglio tecnico.

Riflessioni spontanee ed indipendenti sono iniziate in seno ai principali organi preposti alla definizione dei criteri di sicurezza, ed alla vigilanza sulla loro attuazione.

Tra i tanti documenti prodotti in seguito all'incidente, sono di seguito analizzati quelli dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) [8], della Agenzia giapponese per la Sicurezza Nucleare ed Industriale (NISA) [9] e della cosiddetta Dieta Nazionale del Giappone [10], una commissione indipendente istituita in risposta ad una interrogazione parlamentare per compiere una indagine alternativa a quella già in corso ad opera di una specifica commissione (della quale fanno parte tecnici e scienziati dell'intera comunità nucleare giapponese) ufficialmente nominata dal governo giapponese.

Sono di seguito riportate le lessons learned individuate dagli esperti della IAEA e della NISA, indicandone i punti comuni in funzione di una loro organizzazione logica per campi di applicazione.

3.1. Irrobustimento delle misure di prevenzione degli incidenti severi

A questa categoria fanno riferimento tutte le lezioni tratte dalla considerazione che quanto avvenuto a Fukushima è stato un incidente severo¹, e dalla revisione

¹ Si definisce "incidente severo" un evento che ha portato l'impianto ad una condizione tale da minare l'integrità di almeno una delle molteplici barriere che contengono l'inventario di radioattività isolandolo dall'ambiente esterno, e che dunque potenzialmente determinano le condizioni per un rilascio di tale inventario all'esterno dell'impianto.

dell'adeguatezza delle misure di prevenzione contro l'incorrere in condizioni incidentali severe.

Le contromisure implicate da tali lezioni riguardano non solo i diversi sistemi che costituiscono l'impianto, ma anche tutte le strutture accessorie che garantiscono l'approvvigionamento di risorse necessarie alla corretta gestione di una situazione incidentale, prevenendone l'evoluzione verso una condizione severa.

Irrobustimento delle contromisure ad eventi esterni (es: terremoti e tsunami) di proporzioni estreme, e ad una loro eventuale combinazione

- Progettazione dei sistemi (principali ed ausiliari) per resistere ad eventi esterni di incredibili proporzioni, anche qualora in combinazione tra loro;
- Per siti con più reattori installati, disposizione degli impianti per assicurare l'impossibilità di interazione tra i diversi sistemi;
- Revisione periodica delle contromisure in funzione della disponibilità di nuove informazioni sulla probabilità di accadimento di eventi di incredibili proporzioni;
- Protezione delle strutture di dispacciamento dell'energia elettrica al sito;
- Eliminazione della possibilità di fallimento per una causa comune dei sistemi ausiliari (in particolare, nel caso di più reattori installati sullo stesso sito), differenziandoli ed aumentandone la ridondanza;
- Disseminazione di più sistemi di backup equivalenti in posti diversi del sito.

Predisposizione ad affrontare condizioni incidentali di lunga durata

- Predisposizione di misure per un rapido ripristino dell'alimentazione elettrica dall'esterno;
- Potenziamento delle riserve di energia elettrica (batterie);
- Aumento della capacità dei pozzi freddi (*heat sink*);
- Semplificazione delle operazioni di installazione di fonti di alimentazione alternative dall'esterno.

Irrobustimento dei sistemi di sicurezza degli impianti

- Irrobustimento dei sistemi di raffreddamento del nocciolo, del contenimento primario e delle piscine di stoccaggio del combustibile esausto;
- Perfezionamento delle misure di gestione dell'incidente;
- Costituzione di team di pronto intervento sufficienti a garantire un adeguata gestione dell'incidente (in particolare nel caso di siti con più reattori installati);
- Irrobustimento e potenziamento della strumentazione di controllo dei principali parametri d'impianto.

3.2. Irrobustimento delle misure di risposta agli incidenti severi

A questa categoria fanno riferimento tutte le lezioni tratte dalla constatazione delle difficoltà incontrate dagli operatori nella gestione dell'incidente severo in corso sui reattori 1, 2 e 3.

Irrobustimento delle misure per la gestione di emergenza degli impianti

- Progettazione di soluzioni semplici ed affidabili che garantiscano la disponibilità di elettricità e pozzi freddi alternativi;
- Predisposizione di locali sufficientemente protetti da eventi esterni e campi di radiazione, adeguatamente provvisti di strumentazione di controllo dei parametri di impianto, per ospitare un centro operativo in situ di gestione dell'emergenza;
- Irrobustimento dei sistemi di monitoraggio delle radiazioni sull'intero sito;

- Irrobustimento della formazione degli operatori alla gestione di un incidente severo;
- Adeguamento delle procedure di gestione dell'emergenza al caso di completa mancanza di dati d'impianto.

Irrobustimento dei sistemi di sfogo del contenimento primario

- Miglioramento dell'affidabilità e della manovrabilità dei sistemi di sfogo;
- Introduzione di sistemi di mitigazione dei rilasci di radioattività connessi ad uno sfogo;
- Prevenzione di reflussi che portino ad un accumulo di idrogeno nell'edificio reattore;
- Assicurare l'indipendenza dei sistemi di sfogo (anche tra reattori diversi sullo stesso sito);
- Prevenzione di esplosioni di idrogeno mediante il controllo delle concentrazioni del gas.

3.3. Irrobustimento della risposta alle emergenze nucleari

A questa categoria fanno riferimento tutte le lezioni tratte dall'analisi della gestione dell'emergenza all'esterno del sito, per la protezione fisica della popolazione dai rilasci di radioattività occorsi durante l'evoluzione dell'incidente.

Irrobustimento dei sistemi di gestione delle emergenze

- Affinamento dei metodi e dei modelli per la determinazione dei rilasci e del successivo trasporto di radioattività, per una precisa e rapida identificazione delle aree di evacuazione;
- Potenziamento delle reti di monitoraggio ambientale della radioattività;
- Realizzazione di reti alternative di comunicazione per il coordinamento delle operazioni di evacuazione.

Irrobustimento dei piani di evacuazione di emergenza

- Adeguamento dei piani di evacuazione al caso in cui sia necessario fronteggiare anche condizioni ambientali alterate da eventi esterni (es: distruzione delle vie di fuga);
- Realizzazione di reti alternative di informazione e comunicazione con la popolazione a livello capillare.

3.4. Irrobustimento dell'infrastruttura di sicurezza e approfondita disseminazione della cultura della sicurezza

Sono infine riportate in questa categoria tutte le lezioni relative all'organizzazione delle strutture preposte alla gestione dell'emergenza in ed ex situ.

Revisione delle strutture degli enti preposti alla sicurezza nucleare

- Irrobustimento degli enti regolatori;
- Istituzione ed irrobustimento delle strutture legali, dei criteri e delle linee guida per la gestione delle emergenze;
- Chiara distinzione di ruoli, competenze e gerarchie tra i diversi organismi, locali e centrali.

Irrobustimento della cultura della sicurezza

- Reclutamento di nuove risorse umane e loro formazione per la gestione delle emergenze;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP1 - 017	0	L	14	17

- Esercitazione periodica del personale in situ e delle squadre di pronto intervento;
- Inoculazione a tutti i livelli di una profonda cultura della sicurezza.

3.5. Ulteriori considerazioni e raccomandazioni della Dieta Nazionale del Giappone

Le raccomandazioni avanzate come conclusioni del lavoro di indagine condotto dalla Dieta Nazionale del Giappone riguardano esclusivamente aspetti relativi all'ultimo degli ambiti precedentemente elencati, principalmente per via dell'ambito di formazione e provenienza dei membri della Dieta (medicina, sociologia, legge...).

- Sorveglianza degli enti regolatori ad opera della Dieta;
- Riforma del sistema di gestione delle emergenze, a livello centrale, locale e degli operatori di centrale;
- Attribuzione delle responsabilità per la salute pubblica ed il welfare al governo centrale;
- Sorveglianza degli operatori di impianti nucleari;
- Definizione di precisi criteri per un nuovo ente regolatore;
- Riforma delle leggi in materia di sicurezza nucleare per andare incontro agli standard internazionali di sicurezza, per la definizione e la separazione dei ruoli e per la sorveglianza di tutti gli enti nucleari;
- Sviluppo di un sistema di commissioni indipendenti di indagine.

4. Pianificazione delle priorità di ricerca e sviluppo

Sulla base delle lezioni tratte in relazione all'analisi dell'incidente, la comunità scientifica internazionale ha individuato una serie di attività di ricerca su cui porre nuove sfide – in termini di ricerca e sviluppo di nuove soluzioni. Le principali aree di ricerca, focalizzate sull'individuazione dei siti per gli impianti nucleari, la progettazione e l'esercizio di tali impianti, sono di seguito elencate.

- Valutazione sistematica delle vulnerabilità alla “difesa in profondità” e dei margini di sicurezza a fronte di eventi “al di là delle basi di progetto”;
- Fattori umani e organizzativi in condizioni di stress e pericolo;
- Miglioramento dei metodi per la valutazione del rischio da eventi esterni;
- Uso di metodi probabilistici per valutare la sicurezza degli impianti in relazione ad eventi estremi;
- Metodi deterministici avanzati per valutare la sicurezza degli impianti in relazione ad eventi estremi;
- Sistemi avanzati di sicurezza;
- Materiali avanzati per l'ingegneria nucleare;
- Metodi avanzati per l'analisi degli incidenti severi;
- Miglioramento delle procedure per la gestione degli incidenti severi;
- Valutazione degli effetti radiologici degli incidenti severi;
- Miglioramento della modellazione del degrado del combustibile nelle piscine di stoccaggio;
- Metodi per la minimizzazione della contaminazione nei dintorni delle centrali nucleari e per il trattamento di grandi quantità di rifiuti radioattivi;
- Gestione delle emergenze nel quadro di un sistema integrato di soccorso.

Per quanto concerne l'ambito regolatorio e scientifico europeo, tutte le attività di Ricerca e Sviluppo legate ad aspetti di sicurezza sono già state incluse negli obiettivi generali della Strategic Research Agenda dello SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform). Il supporto allo sforzo di R&S pianificato è garantito ad azioni congiunte attraverso l'attuale Programma Quadro EURATOM ed i programmi di ricerca promossi dall'OECD/NEA.

5. Conclusioni

In relazione a quanto esposto nel presente documento sull'incidente in sé, ed alla disamina delle lezioni apprese dallo studio dello stesso, è possibile riassumere che la prima e più importante conclusione tratta dall'analisi dell'incidente, che la comunità scientifica internazionale raccoglie per un'ulteriore evoluzione della cultura della sicurezza nucleare, è la stringente necessità di separare l'approccio probabilistico – secondo il quale le possibili cause incidentali sono catalogate in funzione della loro probabilità di accadimento – da quello deterministico – secondo il quale invece tutti i possibili incidenti, comunque determinatisi, sono considerati pariteticamente. Questa lezione, in realtà, non fa che esasperare la percezione alla base dell'approccio già adottato nel progetto dei sistemi di ultima generazione – definiti di Generazione III avanzata o III+: l'introduzione, in fase di progetto, di provvisori atte alla mitigazione di qualsivoglia incidente, che consentano al contempo tanto la gestione dell'impianto anche nelle più estreme condizioni incidentali, quanto il confinamento dell'inventario di radioattività normalmente stoccato nel nocciolo all'interno del contenimento primario.

In questo contesto, il progetto dei sistemi di sicurezza si basa su analisi deterministiche, per garantire il confinamento dell'incidente all'impianto così da preservare la popolazione residente nelle regioni limitrofe dall'esposizione a radiazioni diverse da quelle del fondo naturale. Dualmente, l'analisi probabilistica rimane lo strumento principale per stabilire i margini di affidabilità del sistema, nella sua accezione di impianto industriale per la generazione di elettricità, ovvero a protezione degli investimenti economici operati dall'esercente della centrale.

È importante sottolineare ancora una volta che l'incidente è stato sicuramente aggravato dalle condizioni di generale devastazione dentro e fuori dal sito della centrale, che tanto hanno influito sulla lucidità degli operatori nel gestire le operazioni di controllo dei sistemi

- per la mancanza di informazioni sullo stato dei reattori;
- per l'inaccessibilità di molti locali nell'edificio reattore;
- per l'indisponibilità di attrezzature ausiliarie, cui è stato impedito l'avvicinamento ai reattori per la presenza di detriti sul sito;
- per la mancanza di chiare istruzioni di comportamento nel caso di gestione dell'impianto nelle specifiche condizioni determinate dalle cause scatenanti e per l'isolamento con i centri decisionali;
- per l'inevitabile preoccupazione verso lo stato di salute dei propri familiari, residenti nei villaggi adiacenti alla centrale, devastati dallo tsunami.

Ciononostante, l'impatto radiologico sulla popolazione è stato pressoché trascurabile, principalmente grazie alla pronta attuazione – in condizioni rocambolesche di prolungata interruzione delle vie e dei mezzi di comunicazione – dei piani di evacuazione, ed al ritardo dei rilasci di radioattività fino a comunicazione

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS - LP1 - 017	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 16	di 17
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

di conclusione dell'evacuazione stessa. Questa constatazione consente di trarre una conclusione positiva relativamente all'evento: gli impianti di Fukushima – che, ricordiamo, sono stati concepiti e realizzati agli albori del periodo di maturità tecnologica che oggi definiamo di Generazione II, prima che si verificasse il primo importante incidente della storia del nucleare (Three Miles Island II) a seguito del quale la cultura della sicurezza nucleare subì una svolta radicale nella sua definizione, concezione ed attuazione – hanno dimostrato un sufficiente controllo residuo, durante uno dei peggiori incidenti severi ipotizzabili, compatibile con le necessità dettate dalla gestione dell'emergenza.

Se questa constatazione è valida – pur con tutti i distinguo del caso – per i reattori di Fukushima, a maggior ragione la si può ritenere fondata per i reattori oggi sul mercato e per quelli della prossima Generazione, attualmente in fase di progettazione. Tutti questi reattori integrano sistemi di sicurezza concepiti appositamente per tenere in considerazione tutte le informazioni apprese dalla comunità nucleare nei suoi 60 anni di storia, implementando dunque i criteri di sicurezza *ab initio* nella progettazione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP1 - 017	0	L	17	17

Bibliografia

- [1] M. Di Giuli, G. Grasso e F. Rocchi. Conseguenze del terremoto Tohoku-Taiheiyu-Oki sugli impianti nucleari giapponesi: Ipotesi di ricostruzione della sequenza incidentale. Rapporto Tecnico NNFISS-LP0-008, Revisione 1, ENEA, 13 Settembre 2011.
- [2] International Workshop “One year after Fukushima: rethinking the future”, March 15-16, 2012, Scuola Superiore della Pubblica Amministrazione, Bologna, <http://utfissm.enea.it/utfissm/Archivio/workshop/fukushima-2012>
- [3] IAEA Action Plan on Nuclear Safety, <http://www.iaea.org/newscenter/focus/actionplan/>
- [4] Kimiaki Saito. Radiation monitoring activities and environmental decontamination perspectives. Presentazione tenuta al *International Workshop “One year after Fukushima: rethinking the future”*, 15-16 Marzo 2012, Scuola Superiore della Pubblica Amministrazione, Bologna (atti in corso di pubblicazione).
- [5] Directorate of radiological protection and human health. Assessment on the 66th day of projected external doses for populations living in the north-west fallout zone of the Fukushima nuclear accident: outcome of population evacuation measures. Rapporto Tecnico DRPH/2011-10, IRSN (2011).
- [6] Peter F. Caracappa. Fukushima accident: radioactive releases and potential dose consequences. Presentazione al *ANS Annual Meeting*, 28 Giugno 2011.
- [7] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation – Volume II, Annex D. Rapporto Tecnico UNSCEAR 2008. Nazioni Unite, 2011.
- [8] Department of Nuclear Safety and Security, Division of Nuclear Installation Safety. IAEA. International Fact Finding Expert Mission of Fukushima Daiichi NPP Accident Following Great East Japan Earthquake and Tsunami. Mission Report. 16 Giugno 2011.
- [9] Governo del Giappone, Nuclear Emergency Response Headquarters. The Accident at TEPCO’s Fukushima Nuclear Power Station. Rapporto del Governo giapponese alla IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. Giugno 2011.
- [10] The National Diet of Japan. The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission: Executive summary. Rapporto ufficiale. Luglio 2012.