

## TERREMOTO DI TOHOKU DELL'11.03.2011: COMPORTAMENTO DEGLI IMPIANTI NUCLEARI DI FUKUSHIMA

Giovanni BONGIOVANNI \*, Paolo CLEMENTE \*\*, Massimo FORNI \*\*\*,  
Alessandro MARTELLI \*\*\*\*, Fernando SAITTA \*\*\*\*\*

\* *Laboratorio Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti (PREV) dell'Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale (UTPRA) dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), Centro Ricerche della Casaccia (Roma)*

\*\* *Responsabile del Laboratorio UTPRA-PREV dell'ENEA, Centro Ricerche della Casaccia (Roma); socio fondatore dell'associazione GLIS (GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica); socio dell'Anti-Seismic Systems International Society (ASSISi)*

\*\*\* *Responsabile dell'Unità Tecnica Ingegneria Sismica dell'ENEA, Centro Ricerche di Bologna; segretario generale delle associazioni GLIS e ASSISi*

\*\*\*\* *Presidente dell'associazione GLIS (GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica) e dell'International Seismic Safety Organization (ISSO); presidente fondatore ed attuale vicepresidente e coordinatore della Sezione Territoriale dell'Unione Europea e degli altri paesi dell'Europa Occidentale dell'Anti-Seismic Systems International Society (ASSISi); coordinatore del Task Group 5 on Seismic Isolation of Structures dell'European Association for Earthquake Engineering (EAEE-TG5); membro della Commissione IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) per la concessione dell'AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale) del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare; Collaudatore in corso d'opera di edifici protetti da sistemi antisismici; membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Civile, Ambiente e Territorio, Edile e in Chimica" del Politecnico di Bari; già Direttore del Centro Ricerche di Bologna dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) (in pensione da fine novembre 2012); fino al 2011 docente di "Costruzioni in Zona Sismica" presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara*

\*\*\*\*\* *Unità Tecnica Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile, Centro Ricerche di Bologna*

*Questo articolo riporta il testo di un rapporto dell'ENEA ed è pubblicato anche sulla rivista 21<sup>mo</sup> Secolo – Scienza e Tecnologia.*

### EVENTO SISMICO

L'evento sismico di magnitudo 9,0, noto come 2011 *Tohoku Earthquake*, che ha colpito le coste dell'isola di Honshu l'11 marzo 2011 (alle 05:46 UTC, con epicentro Lat. 38.322°N, Long. 142.369°E) si è verificato a circa 130 km dalla costa dell'isola di Honshu, ad una profondità di 24,4 km. Come è noto, il Giappone è vicino al margine convergente tra la placca pacifica e quella euro-asiatica; la prima si immerge sotto la seconda (subduzione) con una velocità di circa 83 mm/anno. La rottura, avvenuta secondo un meccanismo di tipo *thrust fault*, ha interessato un'estensione della faglia di oltre 500 km. L'evento ha causato uno *tsunami* che ha investito non solo la vicina costa giapponese, ma anche quella russa, a nord, e, dopo diverse ore, quella californiana. Alcune osservazioni, quali la variazione dell'asse terrestre, l'aumento della velocità di rotazione terrestre, con conseguente accorciamento della durata del giorno di 1,6 microsecondi, e lo spostamento di alcuni metri dell'isola di Honshu dimostrano l'eccezionalità del fenomeno.

La rete accelerometrica giapponese K-Net ([www.bosai.go.jp/e](http://www.bosai.go.jp/e)) ha registrato i valori di picco riportati nella Figura 1, da cui è evidente che l'area delle centrali nucleari di Fukushima ha subito accelerazioni con picco fino a 0,5 g. Nella Figura 2 è riportato il grafico delle storie temporali (*time history*) delle tre componenti registrate nel sito accelerometrico di Fukushima 3, a pochi chilometri dalla centrale.

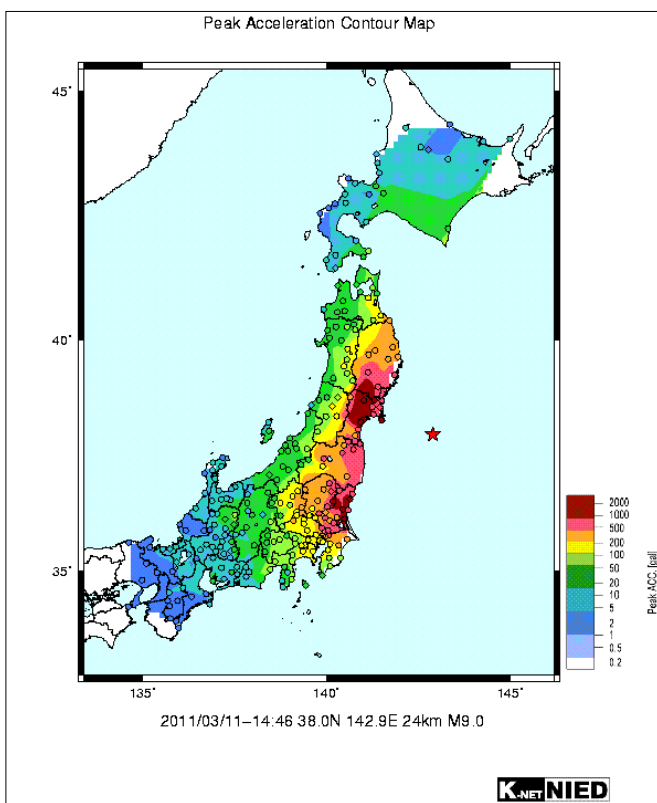


Figura 1 - Valori di picco registrati durante l'evento principale

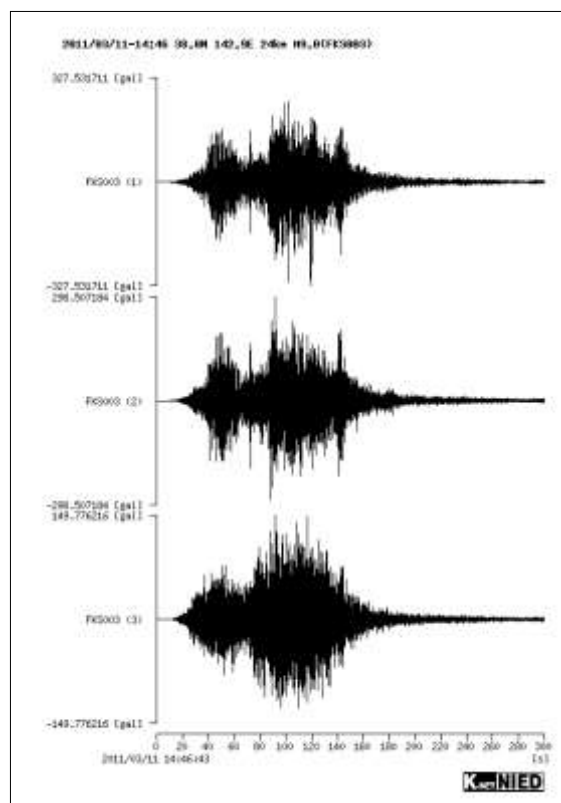


Figura 2 - Time history registrate al sito accelerometrico di Fukushima 3

Nella Figura 3 si riporta poi la mappa della pericolosità sismica per il Giappone espressa in gradi della scala JMA (*Japan Meteorological Agency*), che prevede valori di intensità da 0 a VII al sito, con i livelli V e VI divisi in due sottolivelli. Le diverse gradazioni di colore indicano probabilità di accadimento di eventi che danno intensità JMA maggiore od uguale a "VI bassa", corrispondente a circa 0,4 g. Sulla mappa, che risale al 1995, sono riportati i maggiori eventi sismici successivi, compreso quello dell'11 marzo 2011.

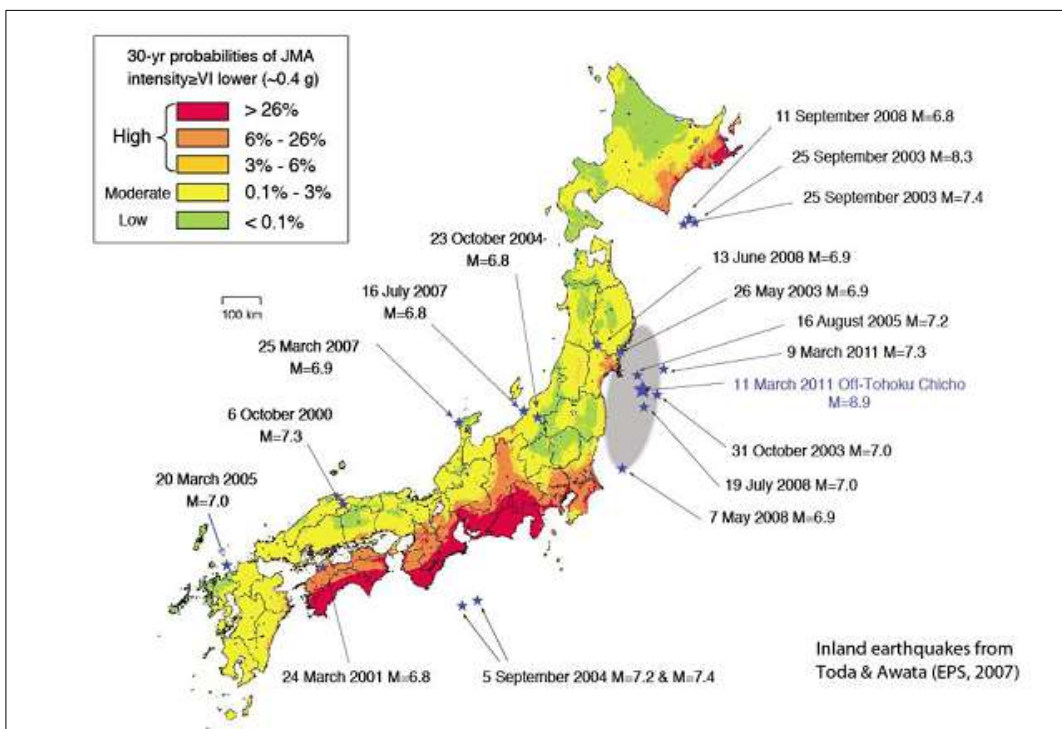


Figura 3 - Mappa di pericolosità sismica nella scala JMA

Per quanto riguarda il funzionamento dell'*early warning* (Figura 5), l'allarme è stato tempestivo, dando diversi secondi di vantaggio per intervenire su impianti a rischio di incidente rilevante e treni ad alta velocità: tali interventi sono stati, in realtà, efficaci. Va ricordato che il sistema di *early warning* funziona sulla base di elementi di valutazione concettualmente semplici:

- *il terremoto genera onde P, più veloci, ed onde S, circa 1,7 volte più lente delle P, ma più pericolose; dal primo arrivo delle onde P può essere calcolata la magnitudo;*
- *se la magnitudo è alta può essere diramato un allarme, che dà un preavviso in secondi pari all'intervallo tra l'istante di valutazione ed il tempo di arrivo delle onde S al punto di misurazione; tale preavviso diventa maggiore man mano che ci si allontana dal punto di misurazione.*

Il sistema di allarme ha un'utilità immediata per opere particolari, per le quali alcuni secondi possono essere vitali per portarsi in condizioni di sicurezza o di minore vulnerabilità, come, ad esempio, per i treni ad alta velocità. Nel caso del terremoto di *Tohoku* il tempo a disposizione è stato di 8-30 s per le zone più vicine all'epicentro.

## TSUNAMI

Come si è detto e come è mostrato, in *21<sup>mo</sup> Secolo – Scienza e Tecnologia*, da Martelli e Panza, l'evento ha causato uno *tsunami*, che ha investito non solo la vicina costa giapponese, ma anche quella russa, a nord, e, dopo diverse ore, quella californiana. Anche l'allarme tsunami è stato diramato, ma è vivo il dubbio che diversi falsi allarmi precedenti abbiano indotto molti cittadini a sottovalutare l'allarme stesso. Come è noto, la velocità di propagazione delle onde dello *tsunami* cresce con legge non lineare con la profondità del mare e varia, in genere, tra 300 e 1.000 km/h. Nella Figura 4 è riportata la registrazione di un mareografo in posizione non ben identificata, ma non molto distante dalla costa dell'area di Fukushima. Si legge un intervallo di circa 25 min tra sisma (14:46) e *tsunami* (15:10).

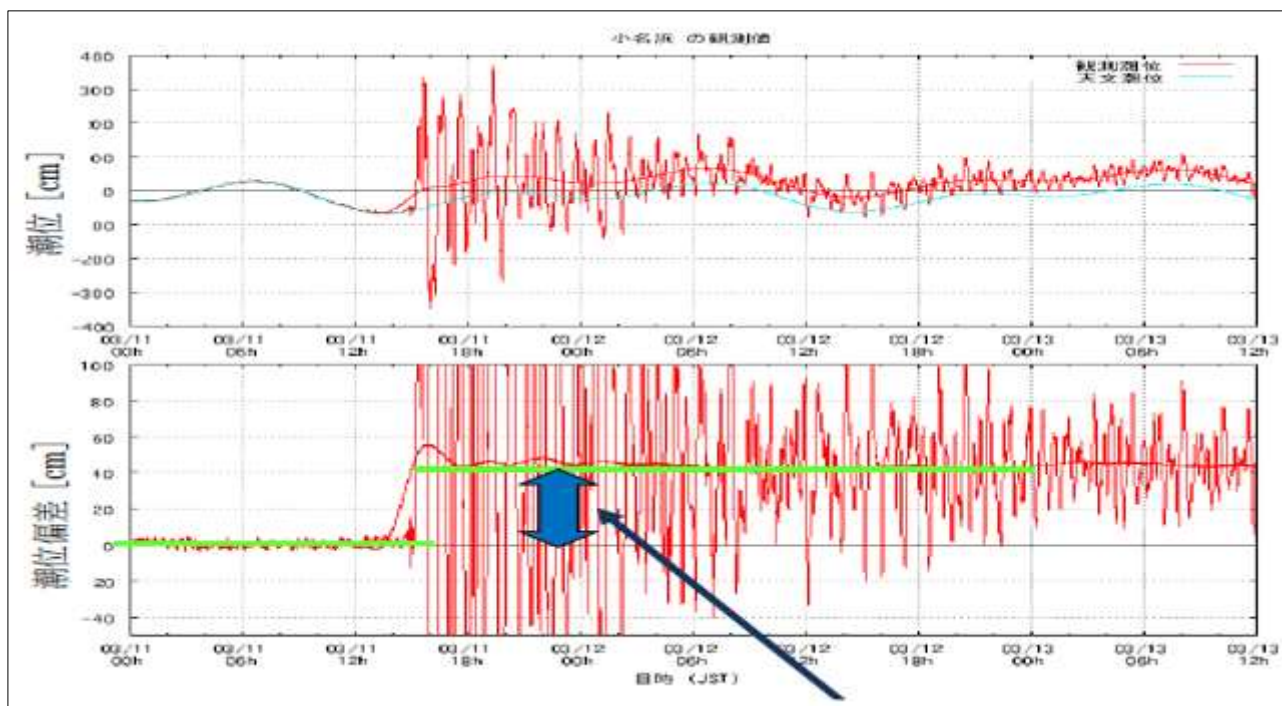


Figura 4 - Andamento delle onde registrato a largo di Fukushima

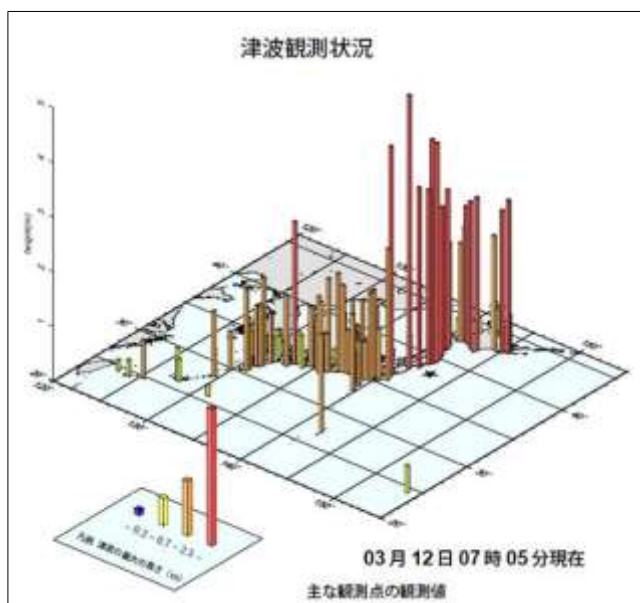


Figura 5 - Altezze delle onde

Quanto all'altezza delle onde effettivamente sopraggiunte sulla costa in corrispondenza delle centrali, dall'esame di filmati dell'evento risulta che essa ha superato 14 m.

In definitiva, si può asserire che le onde significative sono lì giunte da 30 a 50 min dopo l'evento sismico, mentre il picco si è verificato 65 min dopo tale evento. Ciò è coerente anche con alcune simulazioni che, tarate su altri siti (non su quello del sito di Fukushima), forniscono per l'area delle centrali di tale sito tempi di arrivo delle onde compresi tra 45 e 50 min.

## IL COMPORTAMENTO DEGLI IMPIANTI GIAPPONESI

Come è sottolineato anche nell'articolo già citato di Martelli e Panza, lo spegnimento dei reattori risulta essere avvenuto regolarmente, con la conseguente interruzione della reazione nucleare di fissione a catena, tale rimasta anche nelle successive fasi; risultano anche essere correttamente entrati in funzione i generatori diesel di emergenza, che devono fornire l'alimentazione elettrica ai sistemi attivi di raffreddamento del nocciolo dei reattori per l'asportazione del calore residuo di decadimento quando, come era accaduto, sia venuta a mancare l'erogazione dell'energia elettrica. Ciò indica, almeno per questi aspetti, un'adeguata progettazione sismica, nonostante si tratti di impianti assai "vecchi" e sebbene l'entità del terremoto di progetto sia stata alquanto sottovalutata (si è stimato che le accelerazioni massime del terreno siano state di 3,3-6,4 m/s<sup>2</sup>, con punte fino ad addirittura 10,8-28,7 m/s<sup>2</sup>, contro i valori previsti di 2,4-3,2 m/s<sup>2</sup>).

Inoltre, in fase di progetto, erano stati sottovalutati anche la pericolosità da tsunami, connessa a quella del sisma, che, invece, è notevole anche per la vicinanza degli impianti di Fukushima all'oceano, ed il conseguente rischio: infatti, è stato a causa di danneggiamenti dovuti allo tsunami che, dopo circa 1 ora, i diesel di emergenza di Fukushima Daiichi, installati ad una quota troppo bassa (circa 3,5 m sotto al piano di base dell'edificio turbine, che è situato a 10 m sul livello del mare), hanno cessato di funzionare (risulta che acqua marina si sia mescolata al combustibile di alimentazione dei motori), e sono divenute impraticabili le vie di comunicazione al sito.

## DATI DI PROGETTO E NORMATIVA

L'unità 1 dell'impianto nucleare di Fukushima Daiichi (in figura Figura 6 prima dello tsunami e in Figura 7 dopo lo tsunami), reattore G.E. BWR (*Boiling Water Reactor*, cioè reattore ad Acqua Bollente) da 439 MWe è entrato in funzione il 26 marzo 1971 e, pertanto, ne era prevista la disattivazione pochi giorni dopo l'evento sismico di Tohoku, ossia al compimento dei 40 anni di attività. Si tratta del terzo reattore in ordine di anzianità fra i 54 attivi in Giappone; il corrispondente reattore di Daini è un BWR da 1.067 MWe entrato in funzione 11 anni dopo.

La costruzione ebbe inizio nel 1965, quindi il progetto risale presumibilmente agli inizi degli anni Sessanta. Dal punto di vista sismico l'impianto fu progettato con riferimento ad un picco di accelerazione del terreno di 0,17 g, che corrisponde ad un'accelerazione statica equivalente orizzontale pari a  $0,17 \cdot 3 \cdot 0,8 = 0,408$  g e ad una accelerazione statica verticale pari a  $0,17 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 0,204$  g. Secondo altre fonti il picco dinamico era 0,18 g, molto simile, comunque, al precedente. Gli altri reattori della stessa filiera e dello stesso periodo furono progettati analogamente. Non si hanno notizie di eventuali interventi strutturali a seguito dell'evoluzione delle conoscenze, della normativa e dei metodi di calcolo.



Figura 6 - Gli impianti di Fukushima Daiichi prima dello tsunami



Figura 7 - Gli impianti di Fukushima Daiichi dopo lo tsunami

Attualmente per gli impianti "a rischio di incidente rilevante" si considerano usualmente due eventi sismici di riferimento:

- l'*Operational Basis Earthquake* (OBE), ossia un sisma massimo di operatività, in occasione del quale tali impianti devono poter rimanere funzionanti in condizioni di sicurezza;
- il *Safe Shutdown Earthquake* (SSE), ossia il "Terremoto di Spegnimento in Sicurezza", il massimo evento per il quale non devono verificarsi incidenti rilevanti, tali da pregiudicare lo spegnimento del reattore ed il successivo mantenimento dello stato di reattore spento in piena sicurezza.

In altre parole, l'impianto deve continuare a funzionare regolarmente per eventi sismici inferiori all'OBE, mentre deve spegnersi e mantenersi in sicurezza per eventi superiori. Il terremoto SSE rappresenta il massimo evento considerato nel progetto; l'OBE è usualmente fissato in modo da ottenere azioni sismiche pari ad almeno il 50% di quelle corrispondenti all'evento SSE.

Anche per gli impianti nucleari giapponesi, attualmente, sono definiti due terremoti di riferimento:

- il *Design Basis Earthquake Ground Motion* (DBEGM), o *Ss*, corrispondente a quello di spegnimento in sicurezza;
- l'*Elastic Design Earthquake Ground Motion* (EDEGM), o *Sd*, al di sotto del quale le strutture devono rimanere in campo "elastico".

Il terremoto *Ss* è definito come quello avente probabilità "molto bassa" di verificarsi durante la vita dell'impianto, con l'obiettivo di evitare il rischio di esposizione radiologica seria alla popolazione. Si riconosce "l'esistenza di un rischio residuo", legato alla possibilità di scuotimenti sismici che superino quelli previsti in progetto (*Ss*), con eventuale rilascio radioattivo. Al riguardo si prescrive che, in sede di progetto, debba esser fatto ogni sforzo per minimizzare tale "rischio residuo", attraverso un'appropriata scelta del terremoto di progetto. Questo è fissato a partire dalla magnitudo, correlata alla scala *Shindo* del *Japan Meteorological Agency*, a sua volta correlata ai valori di accelerazione al suolo. La normativa aggiornata a maggio 2007 ha stabilito per il terremoto *Ss* un valore della magnitudo pari a  $M = 6,7$ . Nel marzo 2008 la società TEPCO (proprietaria degli impianti) ha portato il valore massimo dell'accelerazione orizzontale del terreno (*Peak Ground Acceleration* o *PGA*) per il sito di Fukushima a 600 gal (circa 0,6 g). Soltanto per l'impianto di Kashiwazaki-Kariwa, situato esattamente sopra una faglia che si è attivata nel luglio 2007, sono stati fissati valori di *PGA* sensibilmente superiori ([www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)).

Il terremoto *Sd* è definito sulla base del terremoto *Ss*: in particolare, le azioni sismiche (in termini di spettro di risposta) relative al *Sd* sono ottenute da quelle del sisma *Ss* attraverso un opportuno coefficiente riduttivo, che può variare per i vari componenti dell'impianto in funzione della loro rilevanza. Tale coefficiente non deve, comunque, essere inferiore a 0,5.

Si evidenzia che, nelle norme giapponesi, non si fa riferimento allo spegnimento dell'impianto, ma solo all'integrità delle funzioni di sicurezza.

## CONCLUSIONI

Le pur scarse informazioni certe, disponibili al momento della scrittura di questo articolo, sul comportamento degli impianti nucleari di Fukushima a seguito del terremoto di *Tohoku* spingono a mettere in evidenza alcuni aspetti da tenere in conto per le eventuali future realizzazioni:

- le mappe di pericolosità (Figura 3) sono state smentite dalla realtà, come si vede dal confronto con la Figura 1;
- non si hanno notizie specifiche sull'efficacia dell'early warning sismico; certamente è apparso inefficace per lo tsunami (non altrettanto buono, però, pare il comportamento delle piscine di decadimento del combustibile esausto);
- le strutture dei reattori, pur se progettate negli anni Sessanta e non oggetto di adeguamenti successivi, hanno mostrato un ottimo comportamento strutturale, sia sotto le azioni sismiche, sia a seguito dello tsunami;
- i sistemi ausiliari di sicurezza non avevano una protezione adeguata nei confronti del pericolo tsunami; appare chiaro che tali sistemi devono avere, nei futuri reattori, la stessa attenzione delle parti più delicate dell'impianto.