

# SINDROME GIAPPONESE

## Analisi e prime valutazioni dell'incidente di Fukushima

Giorgio Ferrari e Angelo Baracca

([giorgio.giorgio@alice.it](mailto:giorgio.giorgio@alice.it), [baracca@fi.infn.it](mailto:baracca@fi.infn.it))

*Report aggiornato al 10 luglio 2011*

### Avvertenza

Cause di forza maggiore ci costringono a fare uscire per ora questo report provvisoriamente incompleto: le parti riguardanti gli aspetti tecnici degli incidenti e le loro conseguenze è completa e aggiornata a questa data, mentre manca per ora la parte riguardante i rilasci radioattivi e i danni per la salute (Par. 6), per il quale ci avvaliamo della collaborazione del Dott. Ernesto Burgio, temporaneamente impossibilitato a svolgere questo compito. Appena sarà possibile faremo circolare una versione completa anche di questa parte.

### Premessa

L'11 marzo, quando avvennero gli incidenti nucleari nella centrale di Fukushima Daiichi in Giappone, il nostro saggio, *SCRAM*<sup>1</sup>, era già in lavorazione per la stampa. Non avremmo certo voluto che l'analisi sistematica dell'intero ciclo nucleare svolta nel libro venisse drammaticamente confermata da questi tragici incidenti. La successiva campagna sul referendum riguardante il nucleare ci ha impedito di ritornare sul problema di questi incidenti. Questo rapporto contiene lo studio che abbiamo condotto successivamente.

La versione della dinamica e della gravità degli incidenti, che è stata diffusa nelle prime settimane ed è rimasta la versione ufficiale dato il silenzio stampa che è calato successivamente, risulta lacunosa e fuorviante. La Tepco ha diffuso i dati in suo possesso solo due mesi dopo l'incidente, il 15 maggio! Per due mesi i giapponesi non hanno saputo che a Fukushima Dai-ichi si è verificata la fusione dei noccioli di tre reattori, e probabilmente anche in alcune piscine del combustibile esaurito, e non è stata informata della natura, della gravità e dell'estensione della contaminazione radioattiva. E con ogni probabilità continuano la minimizzazione e l'occultamento dei dati, e forse non saranno mai colmabili.

In questo rapporto, aggiornato e commentato sulla base di tutti i dati che sono stati resi noti, o in qualche modo trapelano, riteniamo utile anteporre una sintesi e le conclusioni generali per facilitare la lettura e la comprensione anche alle persone meno esperte, entrando in dettagli più accurati o più tecnici nei paragrafi successivi.

### Ringraziamenti

Siamo grati alla Sra. Harumi Matsumoto per averci procurato informazioni dal Giappone e per avere tradotto i termini in giapponese nelle figure.

---

<sup>1</sup> Angelo Baracca e Giorgio Ferrari Ruffino, *SCRAM ovvero La Fine del Nucleare*, Milano, Jaca Book, 2011.

## **Indice dei contenuti**

- 1 - Sintesi e conclusioni generali
  - La versione ufficiale
  - Che cosa è realmente avvenuto all'inizio dell'incidente
  - La gravità degli incidenti
  - Condizioni presenti nei reattori a fine giugno 2011
  - Implicazioni generali sulla sicurezza delle centrali nucleari e sull'industria nucleare
  - La gravità della contaminazione radioattiva
  - La recessione economica, i danni: chi pagherà? "Pantalone"!
- 2 - Il terremoto e lo tsunami
  - Il terremoto
  - Inadeguatezza dei criteri di progetto antisismici dei reattori
  - Lo tsunami
- 3 -Caratteristiche della centrale nucleare di Fukushima Daiichi
  - I reattori
  - I sistemi di raffreddamento d'emergenza
  - Le piscine del combustibile irraggiato
- 4 – Dinamica degli incidenti e danni ai reattori e alle piscine del combustibile
  - Caratteristiche generali dello spegnimento d'emergenza di un reattore nucleare
  - Incidenti provocati a Fukushima dal sisma, prima dell'arrivo dell'onda
  - Evoluzione della dinamica degli incidenti ai reattori n. 1, 2 e 3
  - Reattore n. 1
  - Reattore n. 2
  - Reattore n. 3
  - Danni alle piscine del combustibile irraggiato
  - Le esplosioni
- 5 – Rivalutazione delle previsioni di incidenti nucleari gravi
  - Considerazioni specifiche sulla sicurezza nucleare, aspetti critici
- 7 – Prime considerazioni sulle implicazioni per l'industria nucleare mondiale; inadeguatezze e trascuratezze dei regolamenti d'emergenza
  - Critiche sollevate ai regolamenti e all'operato della NRC negli Stati Uniti
  - Vulnerabilità delle piscine del combustibile nei reattori degli Stati Uniti e costi per la loro messa in sicurezza
  - Rischi di incendi nelle centrali nucleari negli USA
  - Rischio sismico negli USA
- Appendice 1 – Stato dei reattori al 10.06.2011 secondo JAIF
- Appendice 2 – Documentazione fotografica dei danni alla sottostazione elettrica della centrale nucleare di Fukushima Daiichi provocati dal sisma dell'11 marzo 2011

## 1 – Sintesi e conclusioni generali

La drammatica serie di incidenti ai reattori nucleari della centrale di Fukushima ha reiterato la prassi dell'industria nucleare e delle autorità di nascondere il più possibile la gravità della situazione, occultare o sminuire dati significativi quanto fondamentali per attuare le misure necessarie per proteggere il più possibile la popolazione, in definitiva avallare una versione molto edulcorata della dinamica e della gravità degli incidenti, che poi è rimasta la versione “ufficiale” essendo calato dopo poche settimane il silenzio dei media.

### La versione ufficiale

Ricordiamo i punti essenziali della versione ufficiale:

- il terremoto è stato di grado 9, uno dei più forti che l'umanità ricordi, molto superiore ai dati di progetto dei reattori,
- malgrado ciò i tre reattori che erano in funzione si sono regolarmente spenti e i sistemi di raffreddamento sono entrati in funzione,
- ma l'arrivo dell'enorme onda dello tsunami, alta 14 metri, ha messo fuori gioco tutti i sistemi, elettrico e diesel d'emergenza, e questo evento assolutamente unico ha causato gli incidenti ai noccioli dei tre reattori.

Non è per nulla agevole rintracciare dati attendibili, spesso dati *tout court*, ma essi appaiono comunque assai diversi da quelli ufficiali forniti col contagocce e con colpevoli ritardi (forniti nella maggior parte con più di due mesi di ritardo). Questi dati, pur parziali e reticenti, forniscono comunque una ricostruzione della dinamica degli incidenti e delle loro conseguenze, attuali e future, radicalmente diversa, e molto più grave, di quanto è stato fatto sapere all'opinione pubblica.

### Che cosa è realmente avvenuto all'inizio dell'incidente

Riassumiamo gli aspetti principali di una ricostruzione più veritiera degli eventi, anche se l'interpretazione di alcuni di essi rimane problematica e aperta. Per alcuni aspetti infatti la dinamica degli incidenti ai tre reattori e, non dimentichiamolo, ad alcune piscine del combustibile irraggiato, l'insufficienza dei dati rimane particolarmente grave per quanto riguarda la contaminazione radioattiva, e quindi la valutazione delle possibili conseguenze sulla salute della popolazione, nonché la diffusione di tale contaminazione nel mare e nell'intero emisfero settentrionale.

1) Il terremoto è stato di grado 9° nell'epicentro, situato nel mare a circa 125 km dalla costa, ma nel sito di Fukushima è stato (anche secondo logica) considerevolmente inferiore, probabilmente sotto il grado 7° (circa 900 volte inferiore).

2) I dati rilevati dai sismografi collocati nella centrale indicano per la stragrande maggioranza scosse inferiori ai dati di progetto.

3) Malgrado ciò il sisma, indipendentemente dallo tsunami, ha messo fuori servizio la sottostazione elettrica privando la centrale dell'alimentazione esterna (situata su un terrapieno che l'onda non ha raggiunto) e ha provocato anche gravi inconvenienti per lo meno al reattore n. 1, che avrebbero di per se costituito un incidente di considerevole gravità.

4) Oltre agli incidenti nei tre reattori, si sono verificati danni molto gravi ad almeno due delle piscine del combustibile irraggiato: queste piscine sono collocate ad altezze notevolmente superiori a quella dell'onda dello tsunami, per cui tali danneggiamenti sono stati causati dal sisma.

5) dopo circa un'ora dal sisma, la messa fuori servizio dei diesel di emergenza (che erano regolarmente partiti) ha privato la centrale di qualsiasi fonte di energia elettrica.

6) Ma le conseguenze dell'arresto dei sistemi di raffreddamento d'emergenza sono stati drasticamente aggravati dai danni provocati dal sisma prima dell'arrivo dello tsunami.

## La gravità degli incidenti

Da questa ricostruzione emergono vari aspetti che rendono gli incidenti nucleari di Fukushima molto più gravi, e gravidi di conseguenze (sia per il Giappone, che per l'industria nucleare nel suo complesso), rispetto alla prima versione ufficiale, mai rettificata a livello degli organi d'informazione.

- Danni molto seri sono stati causati immediatamente dal sisma, prima e indipendentemente dall'arrivo dello tsunami circa un'ora dopo, che naturalmente ha aggravato la situazione, con l'arresto dei diesel d'emergenza. Comunque i danni iniziali hanno giocato un ruolo importante anche nell'evoluzione successiva degli incidenti.
- Per quanto il terremoto sia stato di notevole intensità (ma come si è detto abbastanza in linea con i valori di progetto) non trova giustificazione la completa messa fuori servizio della sottostazione elettrica che di fatto costituisce l'evento iniziatore dell'incidente.
- Un grave errore di progettazione risulta anche la collocazione dei diesel di emergenza (presenti presso l'impianto di Fukushima nel numero di 2 per ogni reattore) sotto il piano di stradale, per cui l'arrivo dell'onda li ha completamente sommersi, dato che i criteri di progetto di tutti gli impianti giapponesi tengono conto dell'eventualità di uno tsunami.
- È ormai evidente che il nocciolo del reattore n. 1 è completamente fuso e, per la prima volta nella storia degli incidenti nucleari, ha rotto il fondo del vessel (a Three Mile Island, nell'incidente del 1979, la porzione di nocciolo fusa non aveva perforato il vessel, Figura 1): il nocciolo fuso, che prende il nome di *corium*, è uscito all'esterno nel basamento del reattore, cosa che è stata ammessa dalla TEPCO solo a partire dal 15 maggio.
- È altamente probabile che la fusione del nocciolo e la perdita del contenimento sia avvenuta anche nelle unità n. 2 e 3.
- I danneggiamenti alle piscine del combustibile irraggiato costituiscono una tipologia di incidenti che non erano mai stati presi seriamente in considerazione, e che si sono rivelati di grande gravità. Le piscine infatti sono strutture destinate ad assolvere una funzione statica (ospitare il combustibile esaurito scaricato dal nocciolo) per la quale non sono previste barriere di contenimento e sistemi di refrigerazione e di alimentazione di emergenza.
- Ricordiamo che i reattori n. 3 e 4 (spento) erano alimentati con combustibile misto uranio-plutonio, MOX, e tale è anche il combustibile irraggiato nella piscina dell'unità 4. A parte probabili rilasci di plutonio (su cui sono emersi solo dati episodici), il plutonio complica il controllo della reazione a catena, e genera un numero maggiore di prodotti di fissione pericolosi. Si tenga comunque presente che il plutonio è sempre presente, come prodotto della reazione a catena nell'uranio, nel combustibile irraggiato, quindi anche nel nocciolo fuso del reattore n. 2, e nel *corium* fuoriuscito dal vessel del reattore n. 1, che rimarrà pericolosamente radioattivo per centinaia di migliaia di anni.
- Oltre agli enormi quantitativi di acqua altamente radioattiva scaricati in mare, ne sono ancora accumulate negli edifici della centrale più di 100.000 t, il cui trattamento costituisce un problema irrisolto: infatti il sistema di decontaminazione messo in opera dalla TEPCO a metà giugno è stato arrestato dopo appena 5 ore dall'entrata in servizio in quanto l'alta radioattività dell'acqua lo aveva saturato, ed anche se era stato riavviato ha incontrato altre difficoltà.

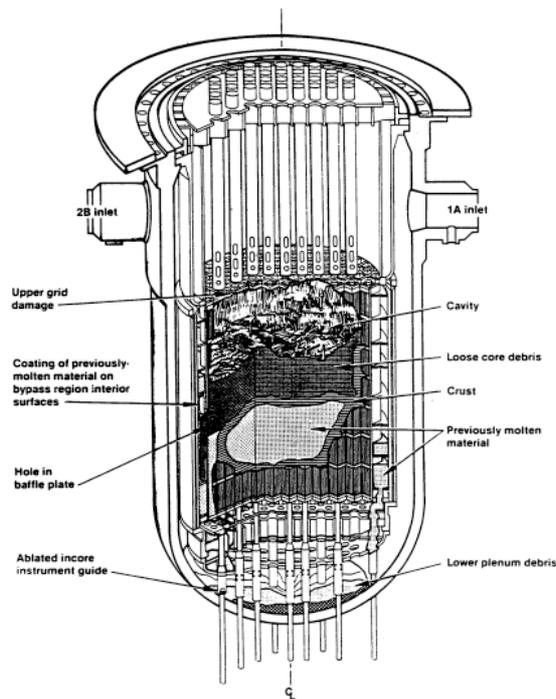


Figure 1-1. TMI-2 reactor vessel end-state configuration.

1-2

### Figura 1- Il nocciolo di TMI dopo l'incidente (Fonte Divisions of systems research office, NRC)

Secondo la ricostruzione della NRC la porzione di nocciolo che si è fusa per prima si trova nella parte centrale (*previously molten material*) attorno alla quale si sarebbe formata una crosta più dura, sottostante ad una zona cava (*cavity*). La parte superiore del combustibile risulta totalmente danneggiata, mentre i detriti fusi che sono colati dalla parte centrale del nocciolo fino alla base del vessel (*lower plenum debris*) non hanno perforato il vessel stesso.

Molti esperti ritengono che gli incidenti di Fukushima siano i più gravi in assoluto di tutta la storia della tecnologia nucleare, superiori anche all'incidente di Chernobyl, anche se esso ebbe una dinamica completamente diversa (il reattore esplose, liberando il carico di radioattività direttamente nell'ambiente). Il reattore di Chernobyl venne ricoperto dal "sarcophago" di cemento, e quindi isolato (anche se provvisoriamente) dall'ambiente esterno in tempi relativamente brevi (che causarono, è sempre opportuno ricordarlo, il decesso di migliaia di persone!).

Un'ulteriore considerazione non marginale per la completa valutazione della gravità degli incidenti nucleari di Fukushima impone di tenere conto del fatto che *tre reattori erano spenti, altrimenti il numero degli incidenti sarebbe stati inevitabilmente maggiore.*

### Condizioni presenti nei reattori a fine giugno 2011

Uno schema riassuntivo dello stato dei reattori al 26 giugno pubblicato dalla JAIF è riportato in Appendice 1

Le quattro unità danneggiate a seguito del terremoto e dello tsunami dell'11 marzo scorso si trovano attualmente nelle seguenti condizioni:

#### Unità 1

Completa fusione del nocciolo; perforazione del vessel e del contenitore primario; perdita delle funzioni di contenimento. Danneggiamento del combustibile presente nella piscina di decadimento.

## Unità 2

Parziale fusione del nocciolo; sospetto danneggiamento del vessel; perforazione del contenitore primario; perdita delle funzioni di contenimento. Danneggiamento del combustibile presente nella piscina di decadimento.

## Unità 3

Parziale fusione del nocciolo; sospetto danneggiamento del vessel; perforazione e danneggiamento del contenitore primario; perdita delle funzioni di contenimento. Danneggiamento del combustibile presente nella piscina di decadimento.

## Unità 4

Sospetto danneggiamento del combustibile presente nella piscina di decadimento

Nonostante siano passati circa 4 mesi dall'incidente lo stato dei noccioli fusi impone che questi vengano raffreddati con continuità perché in caso contrario la temperatura del *corium* tende rapidamente a salire come accaduto lo scorso 22 giugno allorquando è stata ridotta la portata di acqua immessa nel reattore n. 3. Tuttavia, a causa dei danneggiamenti nelle strutture di contenimento, una parte considerevole dell'acqua immessa nei reattori fuoriesce e presenta alti livelli di radioattività. Attualmente nella parte inferiore degli edifici turbina delle unità 1, 2 e 3 si sono accumulate circa 110.000 tonnellate di acqua altamente contaminata, che per le inevitabili infiltrazioni nel terreno sottostante contamina la falda e finisce parzialmente in mare. Gli impianti provvisori di decontaminazione approntati con grande sforzo dalla Tepco (costituiti da numerose celle elementari) si sono mostrati inadeguati in quanto in appena 4-5 ore dal loro avviamento si sono saturati: ciò significa che il livello di radioattività dell'acqua da trattare è molto più alto di quello stimato dai tecnici. La decontaminazione e il successivo confinamento di questo grande quantitativo di acqua rappresentano il maggior problema da risolvere dato che per i motivi sopra detti non può essere interrotto l'invio di acqua nei reattori, ma al tempo stesso più acqua si invia più aumenta il volume dell'acqua contaminata negli edifici della centrale.

Al fine di abbattere il rilascio di radionuclidi in atmosfera è stato ipotizzato un programma di lavoro della durata prevista di 9-12 mesi al termine del quale i reattori dovrebbero venire ricoperti da strutture provvisorie di acciaio e poliestere secondo il modello presentato dalla Tepco e riportato in Figura 2., che successivamente verrebbero sostituite da costruzioni in cemento armato sul tipo di quelle realizzate a Chernobil.

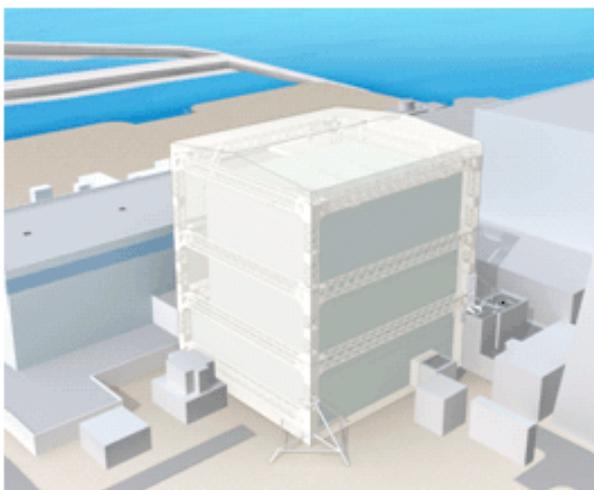


Figura 2 – Modello di copertura per i reattori di Fukushima (Fonte TEPCO)

## Implicazioni generali sulla sicurezza delle centrali nucleari e per l'industria nucleare

Una considerazione specifica deve essere fatta riguardo la sicurezza delle centrali nucleari e le valutazioni della probabilità di incidenti gravi che venivano fatte prima di questi incidenti, e che noi comunque criticavamo<sup>2</sup>. Anche a prescindere dall'impostazione di quelle valutazioni, una semplice rinormalizzazione in base al numero di incidenti verificatisi a Fukushima porta a concludere che *ci si può aspettare il verificarsi di un incidente grave con la frequenza di pochi anni*. Il pensiero corre ai reattori nucleari francesi, in ben 34 dei quali, tutti quelli da 900 MW entrati in servizio tra il 1977 e il 1987, EDF ha «scoperto» recentemente un'«anomalia» (confermata dall'Autorità di Sicurezza, ASN) a causa della quale, in caso di LOCA, l'iniezione di acqua ad alta pressione nel circuito primario proveniente dal sistema HPCI<sup>3</sup> potrebbe non riuscire a raffreddare il nocciolo, e quindi ad evitare la potenziale fusione (*meltdown*)

Se si tiene conto del fatto che poco prima degli incidenti era stato deciso dal governo giapponese il prolungamento della vita operativa dei reattori oltre quella prevista in fase di progetto, risulta evidente come questa scelta sia assolutamente da scartare in tutti i paesi (negli USA la NRC approva gli impianti per 40 anni di operatività, ma ha già esteso questo periodo di 20 anni per 63 unità). La Germania è stata il primo paese a rivedere la decisione che aveva preso in tal senso nell'autunno scorso e a decidere l'uscita completa dal nucleare in una decina d'anni (anche se le industrie nucleari stanno intraprendendo azioni legali contro questa decisione del governo), e la Svizzera, la Thailandia e la Malesia hanno cancellato i piani di costruzione di nuove centrali.

Un aspetto generale concerne la revisione della sicurezza delle centrali nel mondo dopo questi incidenti. Bisogna sottolineare che il verificarsi di incidenti gravi ha sempre condotto nel passato ad una revisione e un adeguamento dei criteri e dei sistemi di sicurezza, che hanno richiesto tempi piuttosto lunghi e costi considerevoli, ed *hanno comportato notevoli aumenti dei costi delle centrali nucleari*. Gli incidenti di Fukushima dovrebbero portare a riconsiderare anche la scelta di concentrare vari reattori in un unico sito, perché un incidente grave può moltiplicare le conseguenze: scelta che è stata dettata da sole considerazioni di risparmio dei costi e semplificazione delle procedure di autorizzazione dei siti.

Oggi l'industria nucleare si trova già in condizioni critiche (in modo particolare in Francia, ma non solo) perché il rilancio dei programmi nucleari su cui puntava e in cui aveva investito somme ingenti non si vede all'orizzonte<sup>4</sup>: non a caso il presidente francese Sarkozy si è scaraventato in giro per il mondo per reclamizzare il reattore EPR, che la Francia non riesce a vendere con facilità (ora è caduto anche il miraggio dell'acquisto di 4 unità da parte dell'Italia).

Ha fatto molto scalpore la rivelazione del *Guardian*<sup>5</sup>, che è entrato in possesso di e-mails inviate da funzionari governativi britannici dei dipartimenti degli affari e dell'energia, alle industrie nucleari (EDF, Areva e Westinghouse) appena due giorni dopo il disastro, proponendo una strategia comune per sminuire verso l'opinione pubblica la gravità degli incidenti, non compromettere l'appoggio ai progetti nucleari, e non arrestare i piani per la costruzione di nuove centrali in Gran Bretagna. Greenpeace l'ha chiamata giustamente una «collusione scandalosa». Un funzionario del *Department for Business, Innovation and Skills*, di cui nome non è stato reso noto, ha scritto: «Questo [incidente] ha il potenziale di rallentare l'industria nucleare globalmente. Dobbiamo assicurare che i ragazzi e le ragazze anti-nucleari non guadagnino terreno su questo. Dobbiamo occupare il territorio e tenerlo. Dobbiamo realmente mostrare la sicurezza del nucleare». Dalle e-

<sup>2</sup> Si veda Angelo Baracca e Giorgio Ferrari Ruffino, *SCRAM*, cit., Cap. 8.

<sup>3</sup> HPCI (High Pressure Cooling Injection) è un sistema di emergenza che entra in funzione in caso di LOCA immettendo acqua ad alta pressione nel circuito primario in modo da raffreddare il nocciolo del reattore.

<sup>4</sup> Ivi. E ad esempio: Michael Dittmar (fisico, Swiss Federal Institute of Technology di Zurigo), «The reality of nuclear energy is inconsistent with dreams of a renaissance», *The Guardian*, 16 agosto 2010; «Nuclear: New dawn now seems limited to the east», *Financial Times*, 13 settembre 2010; James Kanter, «New Warnings About Costs of Nuclear Power», *The New York Times: Green, a Blog about energy and environment*, 31 agosto 2010.

<sup>5</sup> Rob Edwards, «Revealed: British government's plan to play down Fukushima», *The Guardian*, 30 giugno 2011.

mails risulta anche che il nuovo reattore della Westinghouse, l'AP-1000, "non è stato progettato per terremoti della grandezza del sisma in Giappone", e dovrebbe essere modificato per aree sismiche come il Giappone e la California. Il 7 aprile l'ufficio per lo sviluppo nucleare invitò le industrie ad una riunione a Londra per "discutere un comunicato congiunto e una strategia d'impegno ad assicurare il mantenimento della fiducia tra il pubblico britannico sulla sicurezza delle centrali nucleari e la politica di costruzione di nuove centrali". Verso la fine di giugno il governo britannico ha confermato il piano di costruzione di otto nuove centrali in Inghilterra e Galles.

Quanto alla francese Areva, è stata accusata di attacchi diffamatori svolti dalla sua lobby per promuovere la propria tecnologia nucleare<sup>6</sup>: meno di un mese dopo l'incidente in Giappone (quasi in coincidenza con la visita di Sarkozy in Giappone del 31 marzo) ha fatto distribuire a congressisti e funzionari USA delle *brochures* che discutevano il processo che ha provocato le esplosioni di idrogeno nell'unità 1 di Fukushima e la fusione del combustibile nelle piscine, criticando il sistema di contenimento del reattore Mark-1 della General Electric, e la Tepco per non avere rilasciato le informazioni di cui disponeva, sostenendo che simili incidenti non sarebbero mai accaduti negli impianti nucleari forniti da Areva.

In generale, rispetto alla revisione della sicurezza dei reattori esistenti sembra prevalere un atteggiamento volto a considerarli procedimenti più o meno di routine, ovviamente per ridurre i costi ulteriori che porterebbero l'energia nucleare, già fuori mercato se non fosse fortemente sussidiata, a livelli inaccessibili: sarebbe una beffa ridurre queste revisioni ai cosiddetti *stress tests*, che sono solo simulazioni al computer. Che cosa si deciderà di fare, ad esempio, per la sicurezza delle piscine del combustibile irraggiato, che in tutti i reattori, anche nei progetti attuali "avanzati", non sono dotate di contenimento a tenuta? Quali costi si dovranno affrontare se, come sembra ineludibile, si deciderà di dotarli? Una vera riprogettazione per i nuovi reattori.

Negli USA si stanno levando molte voci preoccupate per lo stato dei reattori americani, sull'inadeguatezza dei regolamenti di sicurezza della NRC<sup>7</sup> (*National Regulatory Commission*) e addirittura sul loro progressivo allentamento negli anni per venire incontro alle esigenze dell'industria nucleare. Vi sono negli USA 31 reattori BWR, la maggior parte dei quali del tipo Mark-1, come le prime 5 unità della centrale di Fukushima Daiichi. Alcuni reattori statunitensi sono stati costruiti in prossimità di faglie e sono soggetti al rischio di sismi molto forti. «Pochi decenni fa, la possibilità che un terremoto o uno tsunami colpissero la costa nord-occidentale degli Stati Uniti era considerata remota. [...] Alla fine i geologi hanno determinato che un terremoto che [nel 1700] un terremoto di magnitudine 9,0 colpì una zona che va dall'isola di Vancouver fino alla California settentrionale. La scoperta ha cambiato per sempre le basi progettuali per edifici costruiti in quell'area, dove ci sono due impianti nucleari ora spenti. I terremoti sono rari nella costa orientale [dov'è concentrata una grande percentuale dei reattori americani] [ma] uno studio del 2008 ha concluso che diverse piccole faglie della zona, ritenute inattive, potrebbero in realtà contribuire a un terremoto di grandi dimensioni»<sup>8</sup>.

Le preoccupazioni investono ovviamente anche le piscine del combustibile irraggiato<sup>9</sup>. I 31 reattori BWR hanno le piscine elevate di vari piani, mentre nei 69 reattori PWR le piscine sono collocate a quote inferiori, ma in entrambi i casi esse sono collocate all'esterno del contenitore primario. Nei 30 anni passati ci sono stati almeno 66 incidenti in reattori USA con perdite significative di acqua dalle piscine del combustibile esaurito; 10 sono avvenuti dopo l'11/9. Negli ultimi decenni, oltre alla corrosione delle lamiere di rivestimento delle piscine e delle rastrelliere

---

<sup>6</sup> "French nuclear power lobbyists used Fukushima smear campaign to promote own businesses", *The Mainichi Daily News*, 4 luglio 2011, <http://mdn.mainichi.jp/mdnnews/news/20110704p2a00m0na015000c.html>

<sup>7</sup> Molto interessante la video-intervista agli ingegneri nucleari Arnie Gundersen e David Lochbaum, "Why Fukushima Can Happen Here: What the NRC and Nuclear Industry Don't Want You to Know", <http://www.fairewinds.com/updates>

<sup>8</sup> Adam Piore, "La sicurezza dei nuovi reattori", *Le Scienze*, giugno 2011, p. 57.

<sup>9</sup> Robert Alvarez, «Spent Nuclear Fuel Pools in the US: Reducing the Deadly Risks of Storage», Institute for Policy Studies, maggio 2011, [http://www.ips-dc.org/reports/spent\\_nuclear\\_fuel\\_pools\\_in\\_the\\_us\\_reducing\\_the\\_deadly\\_risks\\_of\\_storage](http://www.ips-dc.org/reports/spent_nuclear_fuel_pools_in_the_us_reducing_the_deadly_risks_of_storage)

che contengono gli elementi di combustibile, l'uso dello stoccaggio addensato (cioè l'aumento del numero di elementi depositati nelle piscine), l'aumento del contenuto di Uranio 235 nel combustibile (maggiore arricchimento) e l'incremento della potenza unitaria fornita da ciascun elemento di combustibile, hanno fatto aumentare i rischi di incidenti gravi alle piscine senza che le autorità di sicurezza ne tenessero in debito conto.

Il *New York Times* ha pubblicato un articolo allarmato<sup>10</sup> per i pericoli di devastanti esplosioni di idrogeno verificatisi a Fukushima, perché hanno dimostrato che gli sfiori d'emergenza possono non funzionare, e questo potrebbe accadere anche nelle centrali statunitensi-

Un'osservazione interessante, da fonte autorevole: il *Wall Street Journal* ha riportato<sup>11</sup> che l'esercito statunitense ha ricavato vantaggi dall'aiuto portato al Giappone per l'esperienza strategica che ha tratto da questa emergenza nucleare, per operare in un ambiente contaminato paragonabile provocato dal potenziale radiologico provocato da un attacco con una "dirty bomb".

Riprenderemo in dettaglio alla fine di questo rapporto l'analisi dei punti critici della sicurezza nucleare evidenziati dagli incidenti di Fukushima.

### **La gravità della contaminazione radioattiva**

Sul problema dei rilasci radioattivi nell'ambiente dagli incidenti di Fukushima Daiichi, della loro natura e diffusione, e dei possibili danni alla salute della popolazione e all'ambiente rimangono grossi interrogativi e riserve per la parzialità e i ritardi dei dati diffusi, i sospetti di reticenze o sottostime, se non occultamento di dati rilevanti. È evidente che in Giappone ci sono scontri al livello governativo sulle scelte future riguardanti l'energia nucleare, e pesanti conflitti d'interesse tra i soggetti interessati, Tepco in primo luogo. Del resto è mancata e manca la partecipazione di un'autorità internazionale *super partes*. Le carenze delle informazioni riguardanti le fuoriuscite e la diffusione iniziali di radioisotopi può compromettere gravemente la possibilità di valutazioni attendibili sui futuri danni alla salute che gli incidenti dell'11 marzo 2011 comporteranno. L'equipe tecnica inviata sul posto da Greenpeace non ha avuto dal governo il permesso di eseguire misure all'interno delle acque territoriali. Le carenze riguardano in particolare i rilevamenti dei radioisotopi specifici (come iodio-131, cesio-137, stronzio-90, plutonio, ecc.) che si depositano nell'acqua e nelle matrici vegetali ed entrano nelle catene alimentari. Queste carenze rendono sicuramente problematica l'adozione delle misure di protezione della popolazione, nonché una valutazione attendibile delle conseguenze sanitarie future.

Non vi è dubbio che, come per il caso di Chernobyl, le valutazioni rassicuranti che da molte parti vengono fornite siano destituite di qualsiasi fondamento.

Tuttavia, come ammesso dal rapporto del Governo giapponese presentato a Vienna, fin dalle prime ore del giorno 12 marzo il livello di radioattività rilevato era tale da ritenere che la funzione di contenimento dei reattori fosse stata compromessa. Secondo questo rapporto, alla data del 5 giugno scorso, venivano stimati i seguenti quantitativi di radioattività rilasciati nell'ambiente:

$$\text{Iodio 131} = 1,6 \times 10^{17} \text{ Bq}$$

$$\text{Cesio 137} = 1,5 \times 10^{16} \text{ Bq}$$

Per quanto attiene alla radioattività scaricata in mare finora, il dato fornito è di  $4,7 \times 10^{15}$  Bq.

Analisi successive hanno mostrato livelli di contaminazione anche nelle prefetture di Miyagi e Ibaraki (rispettivamente a nord e a sud della prefettura di Fukushima), dove sono stati rilevati fino a 110 Bq/kg di sostanza esaminata. L'Istituto di scienze marine dell'Università di Tokio ha rilevato

---

<sup>10</sup> Hiroko Tabuchi, Keith Bradsher e Matthew L. Wald, "In Japan Reactor Failings Danger, Signs for the US", *The New York Times*, 17 maggio 2011.

<sup>11</sup> Natahn Hodge, "U.S. military finds lessons in Japan's crisis", *The Wall Street Journal*, 21 giugno 2011, [http://online.wsj.com/article/SB10001424052702303499204576388964184429134.html?mod=WSJ\\_hp\\_MIDDLENexttoWhatsNewsSecond](http://online.wsj.com/article/SB10001424052702303499204576388964184429134.html?mod=WSJ_hp_MIDDLENexttoWhatsNewsSecond)

una consistente contaminazione dei sedimenti marini a 30 km dalla città di Sendai (capoluogo della prefettura di Miyagi, distante 95 km da Fukushima Daiichi), sottolineando che la contaminazione del plancton è uno dei fattori determinanti per valutare le implicazioni radiobiologiche della flora e fauna marina.

Altrettanto significativi risultano i dati di contaminazione rilevati su tutti gli impianti giapponesi, che mostrano come in alcuni casi (oltre Fukushima) la contaminazione sia rimasta costantemente oltre i valori standard.

Vi sono state grandi polemiche, e numerosi appelli autorevoli, per la decisione del governo giapponese di elevare il limite di dose per la popolazione da 1 mSv a 25 mSv, compresi i bambini. Anche sull'estensione delle zone di evacuazione vi sono forti dubbi e polemiche: sono chiare anche le difficoltà di evacuare grandi numeri di persone in una regione gravemente disastata dallo tsunami.

Sono stati segnalati *hot spots* di contaminazione radioattiva superiori a 20 mSv/anno in diverse località<sup>12</sup>. Già alla fine di marzo erano stati rilevati livelli preoccupanti di contaminazione radioattiva, superiori ad altre parti della prefettura di Fukushima, nel villaggio di Iitate, a 25-45 km a nord ovest dalla centrale di Fukushima Daiichi<sup>13</sup>. Ed a Tokyo è stato riportato il ritrovamento di cesio radioattivo con un'attività di 8.000 Bq nei fumi da un inceneritore di rifiuti domestici<sup>14</sup>.

Nella città di Fukushima, al di fuori dell'area di evacuazione di 30 km dalla centrale, analisi eseguite da un'organizzazione francese, Acro, per conto di attivisti locali, hanno rilevato tracce di 3 mSv di cesio-134 (emivita di 2 anni) e cesio-137 (emivita 30 anni) nelle urine di 10 bambini di età tra 6 e 16 anni<sup>15</sup>: i risultati non sono considerati conclusivi dato il numero limitato di campioni, ma gli attivisti locali affermano di avere condotto i test perché il governo non ha condotto analisi sistematiche sull'esposizione delle popolazioni che vivono all'esterno della zona di evacuazione<sup>16</sup>. Il Dott. Ernesto Burgio ha commentato: «Quello che succede in caso di incidente, già in generale intorno alle centrali e a maggior ragione in caso di incidente, è che normalmente si verifica la cosiddetta esposizione esterna, da irradiazione esterna, ed è assolutamente un dato poco significativo. Il dato veramentepreoccupante, che in questo caso sta emergendo come purtroppo molti di noi temevano da 4 mesi, riguarda la notizia secondo cui molte persone, anche al di fuori della no-entry zone, si sarebbero contaminate sia per via inalatoria, sia soprattutto per via alimentare, perché il vero problema dopo incidenti gravi come quello di [Chernobyl](#) e come questo di [Fukushima](#) è che la gran parte della contaminazione avviene per via alimentare: queste persone, probabilmente come altre migliaia, anzi come altri milioni di persone, si saranno cibate di alimenti, per esempio vegetali, latte e latticini, e avranno assorbito quantità notevoli. I dati più importanti e più significativi sono: il fatto che è stato trovato il cesio 137, che come sappiamo è il pericolo maggiore perché si fissa nei muscoli, si fissa nel sistema nervoso centrale e questo è l'indicatore chiave di una contaminazione attraverso le catene alimentari; e poi è anche significativo il fatto che nella notizia viene sottolineato che i dati iniziali avevano segnalato anche la presenza di iodio radioattivo in alcune persone che poi è scomparso. Perché questo è significativo? Perché questo significa che un radionuclide come lo iodio radioattivo che ha una emivita di 10 giorni dopo un

---

<sup>12</sup> “Regarding Response to the Specific Spots Estimated to Exceed an Integral Dose of 20mSv Over a One Year Period After the Occurrence of the Accident (“Specific Spots Recommended for Evacuation”)", NISA, Press Release, 16 giugno 2011, <http://www.nisa.meti.go.jp/english/press/2011/06/en20110621-2.pdf>

<sup>13</sup> Iitate Village Area Radioactive Contamination Investigation Team (Imanaka Tetsuji, Endo Satoru, Shizuma Kiyoshi, Sugai Masuro, Ozawa Shoji). “Interim Report on Radiation Survey in Iitate Village area conducted on March 28th and 29th”, 4 aprile 2011, <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/No110/Iitate-interim-report110404.pdf>

<sup>14</sup> Più di 8.000 becquerel di cesio radioattivo da una cenere inceneritore di rifiuti domestici a Tokyo, <http://www.asyura2.com/11/genpatu13/msg/459.html> (in giapponese).

<sup>15</sup> Anna Novick, “More Fukushima worries: internal contamination”, 1 luglio 2011, <http://blogs.wsj.com/japanrealtime/2011/07/01/more-fukushima-worries-internal-contamination/>

<sup>16</sup> A questo proposito interessante e molto chiaro Daniel Krieger, “Who’s still tracking radiation from Fukushima? Abd who should we trust?”, 16 giugno 2011, <http://www.slate.com/id/2296859/pagnum/all/#p2>

mezzo è scomparso, il cesio che purtroppo ha una emivita di 30 anni e quindi rischia di rimanere nelle catene alimentari per 60, purtroppo invece si trova in queste persone a dosi che sono da valutare molto attentamente, perché si tratta di dosi superiori a quelle che normalmente vengono considerate ammissibili in un anno. ... questo campione per ora è quantitativamente non rilevante perché si tratta di 15 persone, però visto che sono state scelte random a distanze così ampie, indica che la popolazione, probabilmente milioni di persone, sono state esposte in maniera molto superiore a quello che fin qui è stato detto, perché purtroppo i dati ufficiali sono scarsissimi. ... quello che veramente è importante è questa esposizione a piccole dosi quotidiane di radionuclidi che si fissano nei tessuti, che passano attraverso la catena alimentare e che addirittura, e questa è la cosa più importante, passano alla placenta e raggiungono l'embrione e il feto»<sup>17</sup>.

A questo proposito, è stata rilevata la presenza di cesio-137 in campioni di carne bovina: questo è molto preoccupante perché mostra che la contaminazione è già arrivata al secondo stadio della catena alimentare.

Una richiesta dell' Educational Committee della città di Koryama, nella prefettura di Fukushima, di permettere l'evacuazione dei bambini che vivono in aree contaminate con una dose di 1 micro Sv all'ora a un metro di altezza dal suolo, è stata supportata da autorevoli specialisti britannici e statunitensi<sup>18</sup>. Sternglass ad esempio afferma: «I miei studi durante 40 anni hanno dimostrato che l'esposizione prolungata a radiazioni anche a dosi totali relativamente basse è molto più dannosa per la salute umana rispetto a quando la stessa dose è liberata in un breve periodo, come da una radiografia medica o nell'esplosione di una bomba atomica. Inoltre, è stato trovato che il bambino in sviluppo nel grembo materno e negli anni dell'infanzia ha una probabilità molte volte maggiore dell'individuo adulto di sviluppare tumori o altre malattie che minacciano la vita».

Per quanto riguarda i lavoratori impegnati nella centrale di Fukushima Daiichi, i quotidiani giapponesi *Mainichi Daily News* e *Yomiuri Shimbun* hanno pubblicato un articolo controverso<sup>19</sup> secondo il quale il direttore della *Agency for Nuclear and Industrial Safety*, Terasaka Nonbuaki, riporta il numero di 4596 lavoratori (4766 dei quali dell'unità n. 1) hanno riportato una contaminazione interna in eccesso alla dose legale, che per i lavoratori di Fukushima Daiichi è stata elevata da 100 a 250 mSv; e che solo il 10% dei lavoratori sono stati sottoposti a tale test. La Tepco ha dichiarato che nella centrale vi sono solo tre moduli per il controllo all'intero corpo, ma a causa degli alti livelli di radiazioni essi non possono essere usati.

È opportuno aggiungere un'osservazione. Probabilmente dati completi sui rilasci radioattivi e la loro estensione esistono, ma non sono disponibili all'opinione pubblica. Esiste infatti un'organizzazione internazionale per la verifica del rispetto del trattato di messa al bando dei test nucleari (CTBT): tale organizzazione ha realizzato una rete mondiale di monitoraggio (CTBTO) che sicuramente ha rilevato dati molto accurati e capillari. Tuttavia questi dati, nel contesto di un trattato internazionale, sono disponibili ai singoli Stati, ma non per l'opinione pubblica. La cosa

---

<sup>17</sup> Ernesto Burgio, "Il martirio di Fukushima", intervista, 30 giugno 2011, [http://www.cadoinpiedi.it/2011/06/30/il\\_martirio\\_di\\_fukushima.html#anchor](http://www.cadoinpiedi.it/2011/06/30/il_martirio_di_fukushima.html#anchor). Per ulteriori considerazioni si veda il capitolo specifico scritto da Ernesto Burgio per il libro *SCRAM* citato.

<sup>18</sup> Chris Busby, "Statement of Chris Busby in relation to provisional injunction against Education Committee of Koryama City, Fukushima to evacuate the children for the radioactively contaminated area being filed on 24th June 2011", <http://1am.sakura.ne.jp/Nuclear/110623Statement-BusbyE.pdf>; Leuren Moret, "Statement of Leuren Moret in relation to the provisional injunction against the Education Committee of Koryama City, Fukushima to evacuate the children from the radioactively contaminated area being filed on June 24, 2011", <http://1am.sakura.ne.jp/Nuclear/110624Messag-LeurenE.pdf>; Ernest Sternglass, "Statement of Ernest J. Sternglass in relation to the provisional injunction against the Education Committee of Koryama City, Fukushima to evacuate the children from the radioactively contaminated area being filed on June 24 2011", <http://1am.sakura.ne.jp/Nuclear/110623Messag-SternglassE.pdf>

<sup>19</sup> V. [http://www.next-up.org/pdf/Fukushima\\_A\\_health\\_disaster\\_in\\_the\\_making\\_4956\\_workers\\_have\\_been\\_internally\\_contaminated\\_by\\_nuclear\\_radiation\\_25\\_05\\_2011.pdf](http://www.next-up.org/pdf/Fukushima_A_health_disaster_in_the_making_4956_workers_have_been_internally_contaminated_by_nuclear_radiation_25_05_2011.pdf)

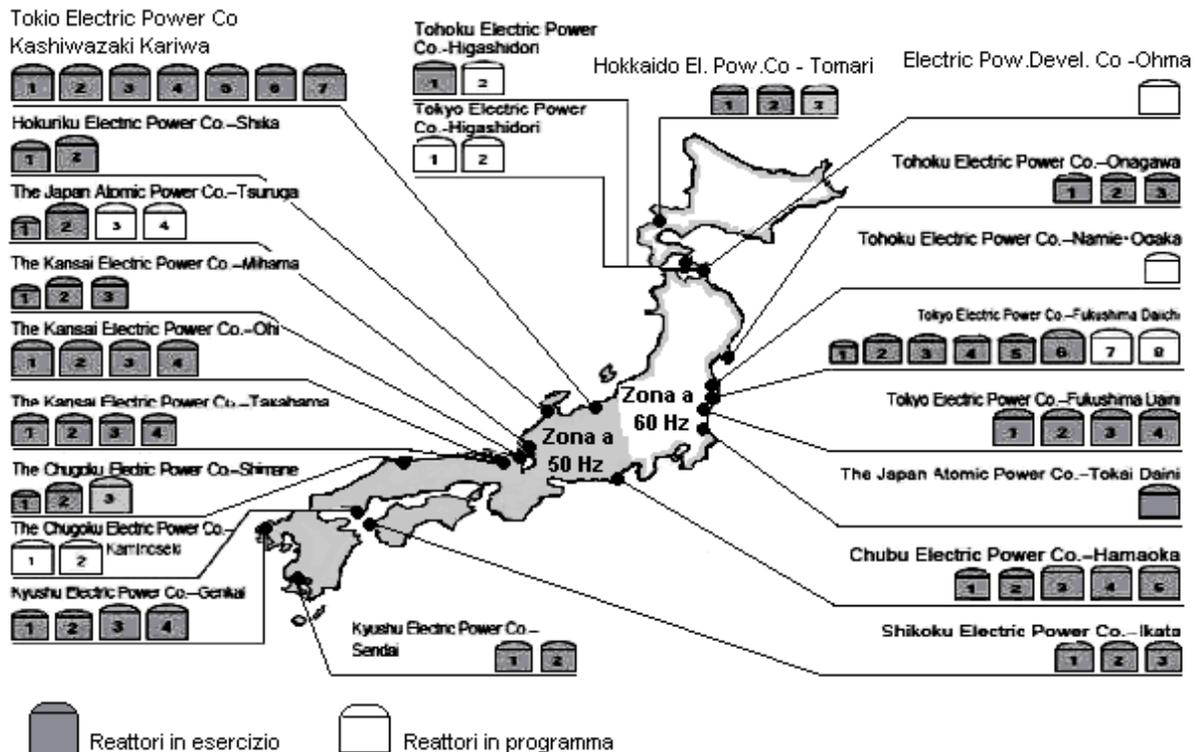
grave è che gli Stati non abbiano per lo meno informato le popolazioni di eventuali pericoli, e preso eventualmente misure adeguate per la loro sicurezza.

È sicuramente problematico un paragone con la gravità dell'incidente di Chernobyl, dove il reattore esplose e i prodotti radioattivi uscirono direttamente nell'ambiente. Una valutazione ufficiale, quanto generica, è che i prodotti radioattivi usciti nell'ambiente a Fukushima siano circa un decimo di quelli rilasciati a Chernobyl: non vi sono criteri, o dati, per confermare questa valutazione, in ogni caso si deve tenere conto che la regione contaminata in Giappone conta una densità di popolazione molto superiore rispetto a quella di Chernobyl, e che gli incidenti sono in corso e gli sviluppi difficilmente controllabili e prevedibili.

### La recessione economica. I danni: chi pagherà? “Pantalone”!

Un aspetto tutt'altro che marginale riguarda l'ammontare dei danni e che li pagherà. La recessione che ha colpito il Giappone è dovuta più alla scelta nucleare che ai danni dello tsunami. Dei 54 impianti nucleari che fornivano al paese e il 30% dell'energia elettrica, ben 35 sono fermi a seguito del sisma dell'11 marzo: i 6 reattori di Fukushima Daiichi e i 5 di Hamaoka (centrale nuovissima a sud di Tokio chiusa su richiesta del primo ministro Kan in quanto si prevede un nuovo sisma) non rientreranno più in funzione, mentre tutti gli altri che hanno subito danni minori resteranno prevedibilmente fermi alcuni mesi per le ispezioni e/o riparazioni. La situazione è resa drammatica dal fatto che il Giappone, considerato un modello di efficienza tecnologica, è diviso in due aree elettriche non comunicanti tra loro, quella a Sud Ovest con frequenza a 50 Hertz e quella a Nord Est (la più colpita dal sisma) a 60 Hertz (figura 3): il che limita drasticamente la possibilità di trasferire energia da una zona all'altra (la divisione riguarda anche i reattori nucleari, BWR a Nord, PWR a Sud, rendendo più difficile reperire la mano d'opera specializzata per i primi). Come risultato l'energia elettrica è razionata e le fabbriche (auto, componentistica elettronica, ecc) pur non essendo state colpite dallo tsunami (comunque circoscritto) lavorano a ritmo ridotto.

Figura 3



Le valutazioni più aggiornate dei danni superano abbondantemente i \$ 100 miliardi. È evidente che non sarà la Tepco a coprire questi costi, come avviene per tutta l'industria nucleare, che gode di enormi "esternalizzazioni" dei costi<sup>20</sup>. Il 14 giugno il governo giapponese ha approvato la bozza di legge che istituisce un fondo per risarcire le vittime del disastro nucleare e l'impianto gravemente danneggiato: di fatto un piano di salvataggio della Tepco con fondi pubblici, cioè dei contribuenti.

Intanto le azioni della Tepco, che per anni era stata il fiore all'occhiello della borsa di Tokyo, sono crollate, rovinando migliaia di piccoli risparmiatori (anche se i suoi dirigenti continuano a puntare sullo sviluppo del nucleare: la rituale assemblea degli azionisti a fine giugno ha visto assieparsi all'esterno migliaia di cittadini, molto dei quali sono riusciti ad entrare utilizzando deleghe ed hanno vivacemente contestato l'assemblea<sup>21</sup>.

L'orientamento dell'opinione pubblica in Giappone verso il nucleare sta cambiando. Nel governo e nel parlamento vi è stata una manovra per mettere il presidente Kan sotto ricatto, con l'intenzione di riaprire la strada ad ulteriori sviluppi dell'energia nucleare. Ha sollevato un certo scalpore la decisione del Sindaco di Genkai (prefettura di Saga) di approvare la prima eventuale riapertura di centrali nucleari dopo l'incidente<sup>22</sup>, che finora è rimasta sospesa: si tratta della centrale di Genkai della Kyushu Electric Power Co., che ha 4 reattori nucleari, due dei quali erano spenti per manutenzione. Ovviamente la decisione generale verrà presa dal governo, ma la decisione del sindaco ha provocato la protesta di alcuni cittadini. Nel movimento dei cittadini vi sono gruppi che si propongono di elaborare la proposta di un referendum consultivo.

## Conclusioni preliminari

Concludendo queste sintetiche (e preliminari) considerazioni non si può fare a meno di rilevare che il recente summit di Vienna sulla sicurezza nucleare convocato dalla IAEA non è andato più in là di generici richiami ad aumentare le misure di sicurezza nucleare auspicando una maggiore cooperazione internazionale nella informazione e gestione delle emergenze.

A nostro avviso invece sul tema della sicurezza occorrerebbero misure straordinarie se non altro perchè a Fukushima si sono verificati due eventi di straordinaria gravità: gli incidenti alle piscine del combustibile e l'avvenuta perforazione di un vessel da parte di un nocciolo fuso. Non tenerne conto o sottovalutarne le implicazioni per l'intera comunità internazionale sarebbe la definitiva conferma che la tecnologia nucleare è tecnicamente incontrollabile e politicamente assoggettata ad interessi che nulla hanno a che vedere con il benessere e la sicurezza delle popolazioni.

---

<sup>20</sup> Si veda ad esempio l'ampia trattazione del problema nella raccolta di studi curata da Henry Sokolski, *Nuclear Power's Global Expansion: Weighing Its Costs and Risks*, <http://www.StrategicStudiesInstitute.army.mil/>

<sup>21</sup> Pio d'Emilia, "La furia dei peones della Tepco", *il manifesto*, 29 giugno 2011

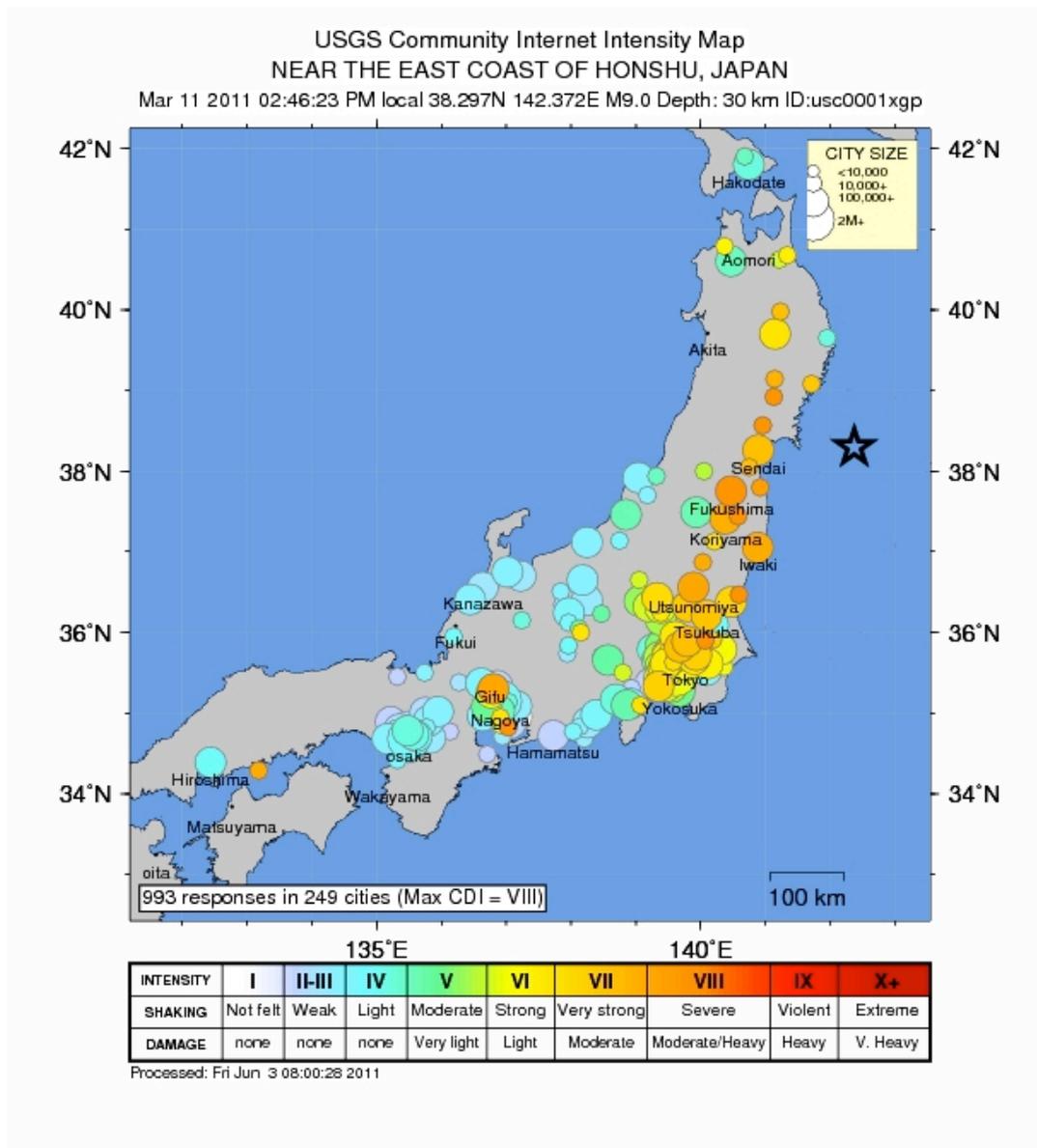
<sup>22</sup> "Saga town mayor approves restart of Genkai nuclear reactors", *The Mainichi Daily News*, 4 luglio 2011, <http://mdn.mainichi.jp/mdnnews/news/20110704p2g00m0dm015000c.html>

## 2 – Il terremoto e lo tsunami

### Il terremoto

L'ora esatta del terremoto che l'11 marzo 2011 ha colpito il Giappone è fissata dall'USGS (United States Geological Survey) e dal JMA (Japanese Meteorological Agency) alle 14,46 e 23 secondi ora locale.

Secondo l'USGS il sisma si è sviluppato a 32 Km di profondità con epicentro in mare non lontano dalla costa di Honshu a circa 129 Km. La magnitudo del sisma è risultata del 9° grado della scala Richter nell'epicentro, mentre nella prefettura di Fukushima – dove è situata la centrale di Fukushima Daiichi – la magnitudo è classificata intorno al 7° grado (Fig. 4). Secondo la JMA invece, la profondità era di 24 Km mentre in base alla scala di intensità giapponese la magnitudo era del 6°+ (vedi tabella 1).



**Figura 4** - Intensità del terremoto nelle varie città del Giappone. La stella indica l'epicentro, in mare. La dimensione dei cerchi indica la dimensione della città, mentre il colore indica l'intensità del sisma.

**Tabella 1**

<b>Date and Time:</b>	11 March 2011 14:46 JST (05:46 UTC)	
<b>Intensità:</b>	9.0 (interim value; the largest earthquake recorded in Japan)	
<b>Hypocenter:</b>	130km off the Pacific coast of Tohoku region, from Iwate to Ibaraki Prefectures, 24 km depth	
<b>Mechanism:</b>	Reverse fault type with WNW-ESE compressional axis (by CMT analysis)	
<b>JMA Seismic Intensità:</b>	<b>7 (Max)</b>	Kurihara City of Miyagi Prefecture
	<b>6+</b>	28 cities and towns (including Wakuya Town, Tome City, Osaki City, Natori City) in Miyagi, Fukushima, Ibaraki, and Tochigi Pref.
	<b>6- or weaker</b>	Observed nationwide from Hokkaido to Kyushu

Una prima osservazione da fare dunque è che la magnitudo del sisma che ha colpito l'impianto di Fukushima Daiichi non è stata del "8,9-9° grado della scala Richter" come sostiene il Forumnucleare italiano<sup>23</sup>, ma aveva un'energia equivalente di circa 900 volte inferiore, sia che si prenda a riferimento la classificazione del USGS che quella della JMA.

### Inadeguatezza dei criteri di progetto antisismici dei reattori

Una seconda osservazione da fare riguarda la presunta inadeguatezza dei criteri di progetto antisismici dei reattori di Fukushima di fronte al terremoto dell'11 marzo scorso. Dall'esame dei rilevamenti effettuati dai 53 sismografi collocati in tutte e sei le unità della centrale di Fukushima (resi noti dalla TEPCO il 16 maggio scorso<sup>24</sup>) emerge che l'accelerazione verticale del sisma era ampiamente entro i limiti di progetto al pari dell'accelerazione orizzontale con direttrice Nord-Sud, mentre quella Est-Ovest ha ecceduto i limiti di progetto per soli tre impianti fra cui l'unità 5 che era fuori servizio (Tabella 2)

**Tabella 2**

Punti di misura (platea di fondazione reattori)		Dati rilevati			Accelerazione di progetto rispetto a terremoto di riferimento (gal)		
		Massima accelerazione suolo (gal)			Orizzontale (N-S)	Orizzontale (E-W)	Verticale
		Orizzontale (N-S)	Orizzontale (E-W)	Verticale			
Fukushima Daiichi	Unità 1	460	447	258	487	489	412
	Unità 2	348	550	302	441	438	420
	Unità 3	322	507	231	449	441	429
	Unità 4	281	319	200	447	445	422
	Unità 5	311	548	256	452	452	427
	Unità 6	298	444	244	445	448	415
Fukushima Daiini	Unità 1	254	230	305	434	434	512
	Unità 2	243	196	232	428	429	504
	Unità 3	277	216	208	428	430	504
	Unità 4	210	205	288	415	415	504

N.B. Il tempo di rilevazione è di 130-150 sec

Nel sistema internazionale di misura 1 gal è pari ad una accelerazione di 0,01m/sec<sub>2</sub>

<sup>23</sup> Che cosa è successo a Fukushima <http://www.forumnucleare.it/index.php/sondaggio>

<sup>24</sup> Bollettino TEPCO 268 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/index-e.html>

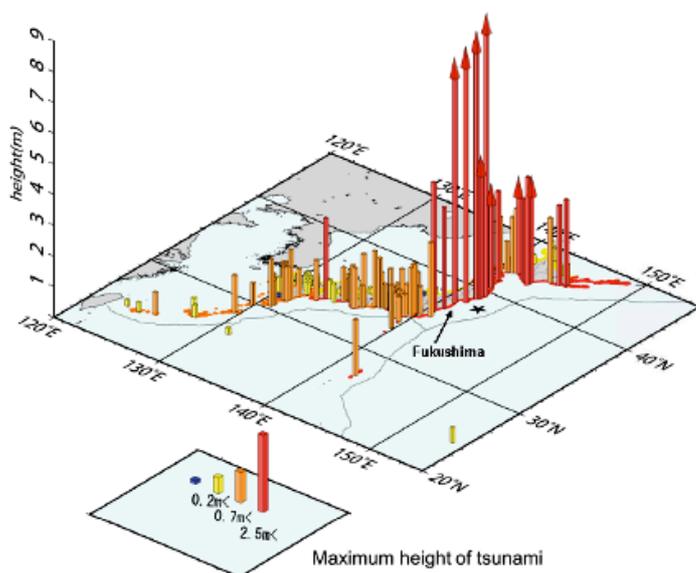
## Lo tsunami

Secondo la JMA l'onda più alta dello tsunami è arrivata sull'impianto alle 15,51 ed aveva un'altezza massima di 9,3 metri davanti alla città di Soma che si trova a circa 90 km a nord dell'impianto di Fukushima dove, presumibilmente, l'altezza dell'onda era inferiore (vedi Figura 5). Anche in questo caso va rilevata l'inesattezza delle informazioni fornite circa l'eccezionalità dell'onda dello tsunami che l'AIN (Associazione Italiana Nucleare) sostiene essere stata alta 14 metri e che avrebbe colpito la centrale appena 15 minuti dopo il terremoto<sup>25</sup>, mentre invece l'intervallo di tempo che separa il terremoto dallo tsunami risulta essere di circa un'ora.

**Figura 5**

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Observed Tsunami



Observed Tsunami (time and height)

Station name	First tsunami	Maximum height of tsunami
Soma (Fukushima)*	March 11, 14:55 JST +0.3m	March 11, 15:51 JST +9.3m<=
Miyako (Iwate)*	March 11, 14:48 JST +0.2m	March 11, 15:26 JST +8.5m<=
Ofunato (Iwate)*	March 11, 14:46 JST -0.2m	March 11, 15:18 JST +8.0m<=
Ishinomaki (Miyagi)*	March 11, 14:46 JST +0.1m	March 11, 15:25 JST +7.6m<=
Oarai (Ibaraki)	March 11, 15:15 JST +1.8m	March 11, 16:52 JST +4.2m
Kamaishi (Iwate)*	March 11, 14:45 JST -0.1m	March 11, 15:21 JST +4.1m<=
Mutsu (Aomori)	March 11, 15:20 JST -0.1m	March 11, 18:16 JST +2.9m
Nemuro (Hokkaido)	March 11, 15:34 JST slight	March 11, 15:57 JST +2.8m
Tokachi (Hokkaido)*	March 11, 15:26 JST -0.2m	March 11, 15:57 JST +2.8m<=
Urakawa (Hokkaido)	March 11, 15:19 JST -0.2m	March 11, 16:42 JST +2.7m

\* Maximum height of tsunami cannot be retrieved so far due to the troubles.  
Actual maximum height might be higher.

Copyright : Japan Meteorological Agency

<sup>25</sup> Fukushima –descrizione degli eventi [http://www.assonucleare.it/Documenti%20AIN/Fukushima/3%20-%20AIN\\_-Fukushima\\_Descrizione\\_degli\\_eventi.pdf](http://www.assonucleare.it/Documenti%20AIN/Fukushima/3%20-%20AIN_-Fukushima_Descrizione_degli_eventi.pdf)

### 3 – Caratteristiche della centrale nucleare di Fukushima Daiichi

#### I reattori

L'impianto di Fukushima Daiichi è composto da sei reattori del tipo BWR di progettazione General Electric e Toshiba entrati in servizio tra il 1971 e il 1979 (Tabella 3). Al momento dell'incidente erano in funzione le unità 1, 2 e 3 mentre le unità 4, 5, 6 erano ferme per manutenzione.

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
PCV Model	Mark-1	Mark-1	Mark-1	Mark-1	Mark-1	Mark-2
Electric Output (MWe)	460	784	784	784	784	1100
Max. pressure of RPV	8.24MPa	8.24MPa	8.24MPa	8.24MPa	8.62MPa	8.62MPa
Max. Temp of the RPV	300°C	300°C	300°C	300°C	302°C	302°C
Max. Pressure of the CV	0.43MPa	0.38MPa	0.38MPa	0.38MPa	0.38MPa	0.28MPa
Max. Temp of the CV	140°C	140°C	140°C	140°C	138°C	171°C(D/W) 105°C(S/C)
Commercial Operation	1971,3	1974,7	1976,3	1978,10	1978,4	1979,10
Emergency DG	2	2	2	2	2	3*
Electric Grid	275kV × 4			500kV × 2		
Plant Status on Mar. 11	In Operation	In Operation	In Operation	Refueling Outage	Refueling Outage	Refueling Outage

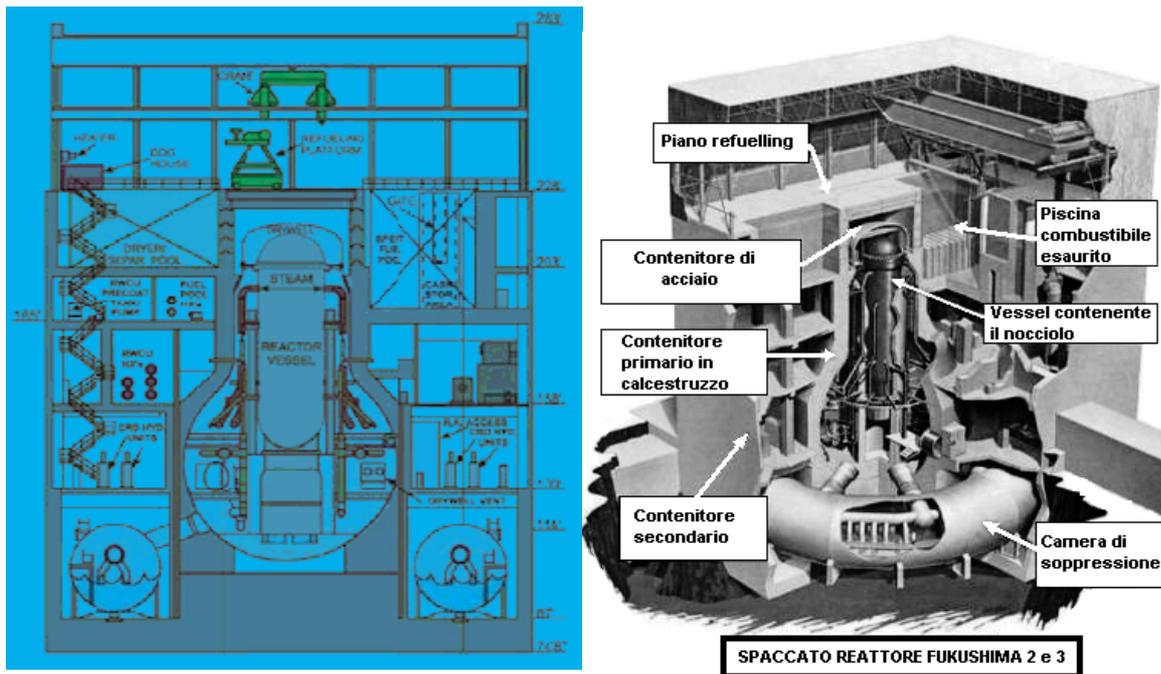
\* One Emergency DG is Air-Cooled

**Tabella 3 - Caratteristiche dei reattori nucleari della centrale di Fukushima Daiichi.** La seconda riga riporta la potenza elettrica: si vede che l'unità 1 ha una potenza inferiore alle altre. RPV significa *Reactor Pressure Vessel*, e la terza e quarta riga riportano i valori massimi della pressione (1 MPa ≈ 10 Atm) e della temperatura previste a progetto nel vessel. CV sta per *Containment Vessel* (Contenitore primario). La quinta e sesta riga riportano i valori massimi previsti per la pressione e la temperatura. La settima riga riporta l'anno e il mese di entrata in servizio commerciale.

Le unità da 1 a 5 sono dotate di sistema di contenimento Mark-1 secondo la classificazione General Electric, mentre l'unità 6 ha un contenimento più avanzato tipo Mark-2.

Le figure 6 e 7 mostrano lo schema del reattore Mark-1. Il vessel contenente il nocciolo è costituito da un contenitore in acciaio spesso 16 cm, di altezza 12 metri. Nei reattori BWR le barre di controllo vengono azionate dal basso, penetrando attraverso aperture nel fondo del vessel. Il vessel è racchiuso da un contenitore primario in cemento armato, rivestito all'interno dal *liner* in acciaio (indicato come "contenitore di acciaio"): il "piano di refuelling" superiore è un coperchio che viene rimosso quando si devono eseguire operazioni nel nocciolo (è quello che sembra essere saltato nel reattore n. 3, v. oltre). Il vessel e il contenitore primario costituiscono la doppia barriera di contenimento. Invece il contenitore secondario è una struttura architettonica che non ha caratteristiche di tenuta: sono i cubi che si vedono nelle fotografie aeree della centrale, alcuni dei quali appaiono oggi semidistrutti dalle esplosioni (fig. 4).

In alto a sinistra sono visibili le piscine del combustibile irraggiato, alte 12 metri.



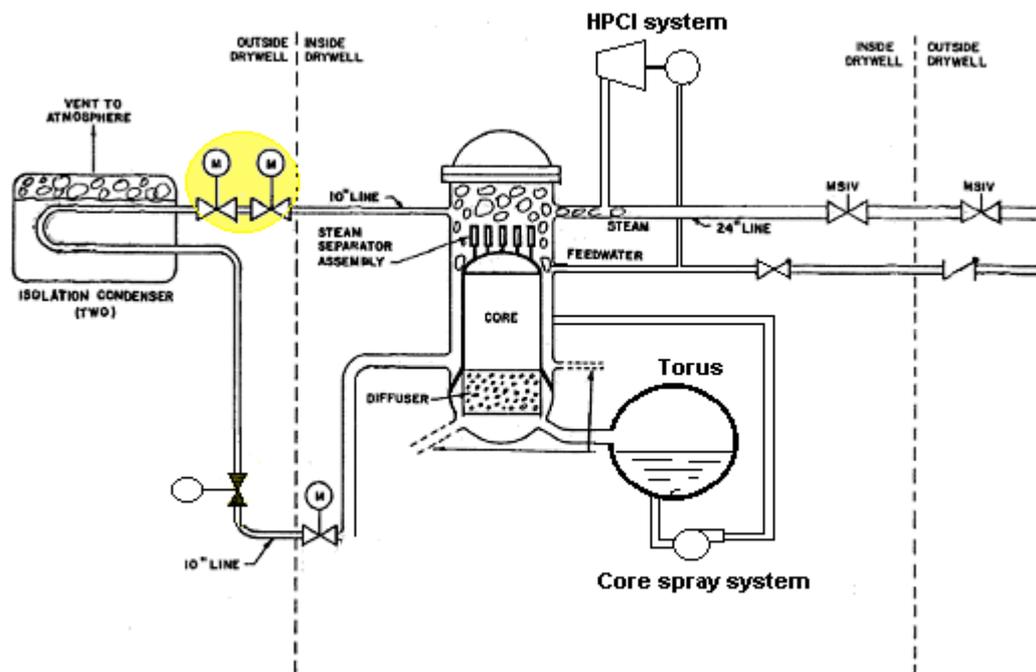
**Figure 6 e 7** – Sezione trasversale e veduta prospettica del reattore BWR Mark-1 (nella fig. 7 in basso al centro, nello spaccato della camera di soppressione, si vede un piccola figura bianca, che indica le dimensioni di una persona).

## I sistemi di raffreddamento d'emergenza

Quando un reattore nucleare viene spento, inserendo completamente le barre di controllo (SCRAM), la potenza che sviluppa cade a zero. Tuttavia le barre di combustibile hanno immagazzinato enormi quantità di isotopi altamente radioattivi, il cui decadimento continua a sprigionare notevoli quantità di calore: inizialmente continua quindi a svilupparsi una potenza tutt'altro che trascurabile in assoluto, dell'ordine del 7% della potenza totale (termica) del reattore; per un reattore di 500 MWe (più o meno quella dell'unità 1), quindi potenza termica circa 1.500 MWt, si tratta di circa 100 MW (che diminuiscono progressivamente col tempo). Deve quindi continuare a funzionare il sistema di raffreddamento. Nel caso in cui questo cessi di funzionare è assolutamente necessario che entri in funzione un sistema d'emergenza. In caso contrario in primo luogo si produce nel vessel del vapore, che provoca un aumento della pressione nel vessel fino a valori pericolosi, e può arrivare a provocare la fusione del combustibile nel nocciolo (*meltdown*) nel caso in cui le barre rimangano scoperte, parzialmente o totalmente, e la loro temperatura aumenti. Discutiamo i diversi sistemi d'emergenza, poiché essi sono cruciali per seguire la dinamica degli eventi nei diversi reattori della centrale.

*Suppression chamber* - Per ovviare a questi problemi in primo luogo i reattori BWR dispongono di una camera di soppressione (*suppression chamber*), la camera toroidale posta in basso al di sotto del vessel (fig. 7): in caso di incidente, quando la pressione del vapore che si seguita a produrre supera un certo valore, si aprono delle valvole che lo convogliano nella *suppression chamber*, dove un sistema di raffreddamento lo condensa e lo reimmette nel vessel. Questa camera è quindi in comunicazione con il vessel, cioè non è isolata da eventuali perdite di radioattività.

*Condensatori d'emergenza (isolation condensers) dell'unità 1* - Mentre le unità da 2 a 6 dispongono solo della *suppression chamber*, l'unità 1 è dotata anche di due condensatori d'emergenza (fig. 8). Essi sono collegati al vessel attraverso due valvole di sfioro (M, cerchiato in giallo in fig. 8). Se la pressione nel vessel aumenta oltre un valore limite, le valvole si aprono automaticamente e inviano vapore agli *isolation condensers*, nei quali il vapore si raffredda, condensando, e viene inviato nuovamente al vessel.

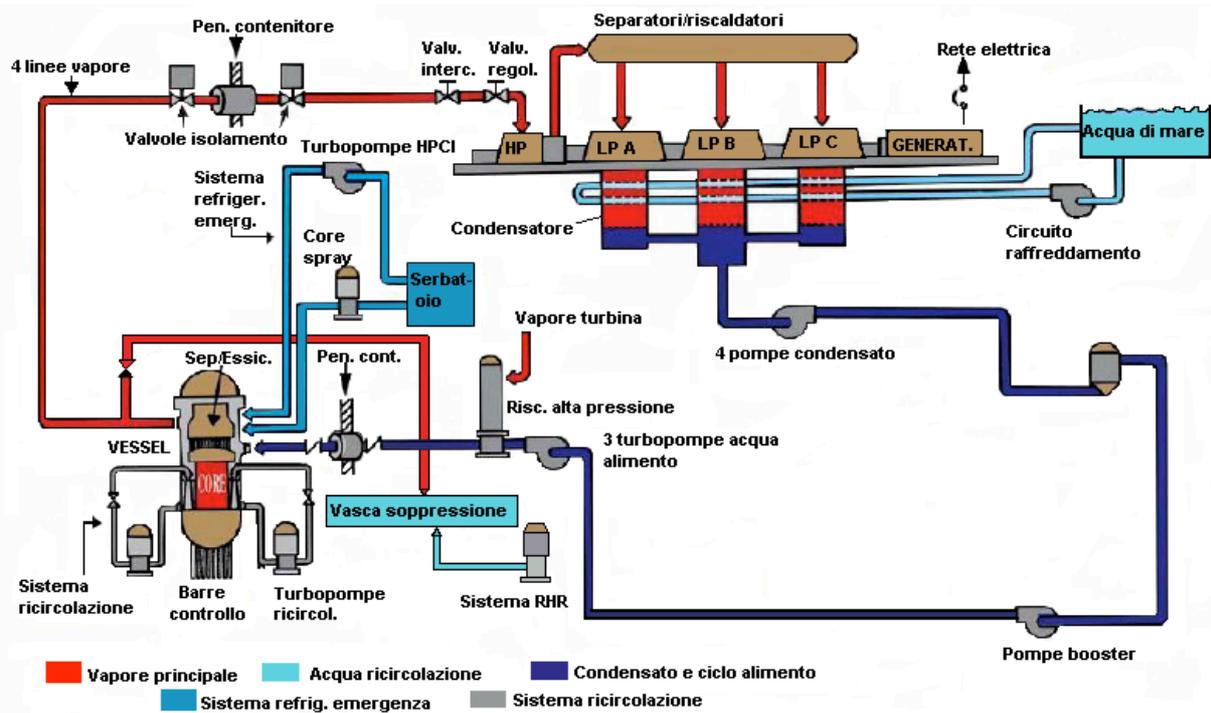


**Figura 8 - Schema circuiti raffreddamento del reattore n. 1**

In caso di SCRAM e distacco dalla rete si chiudono le valvole MSIV (in alto a destra) che intercettano il vapore inviato alla turbina e contestualmente il vapore prodotto viene inviato al Torus (*suppression chamber*). A destra, in alto, è indicato il sistema di alimentazione dell'acqua nel vessel *feedwater* azionato da elettropompe. *Inside* e *outside drywell* rappresenta la parete dell'edificio del contenitore secondario, che separa l'impianto dall'esterno. A sinistra è indicato il sistema di cui è dotato solo l'unità 1, le due valvole di sfioro (evidenziate in giallo) che inviano vapore ai due condensatori d'emergenza (*isolation condenser*): il vapore condensato segue il circuito idraulico e viene reimpresso nel vessel. In alto a destra è indicato il sistema HPCI che entra in funzione quando la pressione del vessel supera un determinato valore, mentre in basso è indicato il sistema di spruzzamento nocciolo (*core spray*) che spruzza acqua nel nocciolo solo se la pressione interna al vessel è bassa. Il sistema HPCI è azionato da turbopompe a vapore, mentre il core spray da elettropompe.

*Sistema di raffreddamento dei reattori n. 2 e 3* - Le altre unità dispongono invece di altri sistemi d'emergenza per sottrarre calore rispettivamente al nocciolo e alla *suppression chamber* (fig. 9):

- un sistema di ricircolazione RCIC – assente nell'unità 1 – che entra in funzione in caso di SCRAM, azionato da turbopompe a vapore,
- oltre ad un sistema RHR (*residual heat removal*), azionato invece da elettropompe, che ha il compito di asportare il calore accumulato nella *suppression chamber* attraverso uno scambiatore di calore esterno. Il sistema RHR è di basilare importanza perché, date le dimensioni finite della *suppression chamber*, attraverso di esso viene asportato il calore fornito dal vapore proveniente dal nocciolo e quindi è possibile limitare la temperatura (e la pressione) della *suppression chamber*, il cui valore limite a progetto è di 100°C.
- Un sistema di raffreddamento ad alta pressione HPCI che entra in funzione nel caso la pressione interna al vessel supera un determinato valore limite: anche questo sistema è alimentato da turbopompe a vapore.



**Figura 9 - Schema circuiti raffreddamento reattori n. 2 e 3.**

Il circuito in rosso che parte a sinistra dal vessel è il circuito vapore che, una volta raffreddato nel condensatore della turbina con acqua di raffreddamento (in questo caso con acqua di mare) ritorna nel vessel (parte blu). Il sistema ricircolazione RCIC (colore grigio) è azionato da turbopompe a vapore ed entra in funzione subito dopo lo SCRAM. Il sistema HPCI (azzurro) è azionato da turbopompe a vapore ed entra in funzione solo se la pressione interna al vessel supera determinati limiti, mentre il sistema Core spray (azionato da elettropompe) entra in funzione per basse pressioni del vessel. Il sistema RHR (non presente nel reattore numero 1) asporta il calore che si accumuli nel toro

## Le piscine del combustibile irraggiato

Nella centrale di Fukushima sono depositate da molti anni migliaia di tonnellate di scorie di III categoria (quelle a più alta attività radiologica) rappresentate dal combustibile esaurito accumulatosi durante il funzionamento delle sei unità. Oltre al combustibile presente nelle piscine di ciascun reattore (vedi Tabella 4), l'impianto di Fukushima ospita una piscina comune in grado di contenere 6.840 elementi di combustibile, a cui vanno aggiunti quelli racchiusi in una diecina di cask (contenitori a secco) ciascuno contenente dai 37 ai 52 elementi.

Sia la piscina comune che quelle di servizio nei sei reattori sono equipaggiate con rastrelliere a stoccaggio addensato, cioè strutture metalliche dove si collocano verticalmente gli elementi di combustibile a spaziatura ravvicinata in modo da poter contenere più elementi. Questa pratica è diffusa anche negli Stati Uniti e in Francia a causa delle grandi quantità di combustibile esaurito che si sono andate accumulando e della mancata realizzazione di depositi a lungo termine adeguati, ed è accettata con molta leggerezza dalle rispettive autorità di controllo perché riduce il rapporto volume di acqua della piscina/quantità di combustibile: questa scelta comporta però dei rischi poiché, in caso di incidente, facilita il surriscaldamento e danneggiamento del combustibile, come è accaduto appunto a Fukushima. Basta considerare che la piscina dell'unità n. 4, a parità di volume di acqua, ospitava più del doppio del combustibile contenuto nelle piscine delle unità 2 e 3 (Tabella 4).

Unit	1	2	3	4	5	6
Number of Fuel Assembly in the Core	400	548	548	-	548	764
Number of Spent Fuel Assembly in the Spent Fuel Pool	292	587	514	1,331	946	876
Number of New Fuel Assembly in the Spent Fuel Pool	100	28	52	204	48	64
Water Volume (m <sup>3</sup> )	1,020	1,425	1,425	1,425	1,425	1,497

**Tabella 4** – Numero di barre di combustibile (*fuel assembly*) contenute nei noccioli (*in the core*) dei reattori di Fukushima Daiichi, e nelle piscine del combustibile esaurito (*spent fuel pool*): si noti la quantità molto maggiore di barre contenute nella piscina dell'unità 4, mentre il volume dell'acqua nella piscina è lo stesso.

## 4 - Dinamica degli incidenti e danni ai reattori e alle piscine del combustibile

### Caratteristiche generali dello spegnimento d'emergenza di un reattore nucleare

L'onda d'urto provocata dal sisma ha istantaneamente fatto scattare lo SCRAM dei reattori 1, 2 e 3 (tarato per un'accelerazione di circa 100 gal) con l'immediata inserzione di tutte le barre di controllo facendo scendere la potenza dei tre reattori a zero. E' da questo momento che inizia il vero e proprio transitorio di emergenza che, secondo le procedure standard in uso presso gli impianti nucleari, avrebbe dovuto mantenere l'integrità del combustibile nucleare fino al conseguimento delle condizioni di arresto freddo del reattore (*cold shut down*). Questa condizione si raggiunge quando la temperatura e la pressione del nocciolo vengono stabilizzate a valori tali da garantire che il reattore possa eventualmente riprendere potenza in tutta sicurezza.

E' opportuno precisare che un transitorio di questo tipo costituisce un evento delicato per qualsiasi impianto che produca energia (centrali termoelettriche o elettronucleari) per i forti stress termici e meccanici che comunque si producono sui componenti quando la potenza generata scende istantaneamente dal 100% a zero. Nel caso dei reattori nucleari la delicatezza del transitorio è accentuata da due aspetti specifici strettamente connessi tra loro:

- Diversamente dagli impianti termoelettrici, la produzione di calore continua anche dopo lo spegnimento del reattore (nocciolo sottocritico) perché i prodotti di fissione generati dalle innumerevoli fissioni dell'uranio hanno una forte attività radiologica dovuta al loro decadimento che si trasforma in calore, detto appunto *calore di decadimento*. Appena spento il reattore questo calore è dell'ordine del 7% della potenza totale del nocciolo<sup>26</sup>, mentre dopo un paio di giorni scende all'1% circa per poi diminuire lentamente nel tempo e stabilizzarsi intorno allo 0,2-0,1% per un tempo lunghissimo.
- La necessità di mantenere integre le barre di combustibile (che costituiscono la prima e più efficace barriera alla fuoriuscita dei prodotti fissione solidi e gassosi) assicurando il loro raffreddamento mediante sistemi (cosiddetti di emergenza) che iniettino acqua nel nocciolo al fine di asportare il calore di decadimento.

<sup>26</sup> Si distinguono la potenza totale e la potenza elettrica di un reattore nucleare: la prima è circa il triplo della seconda. Per l'unità n. 1, ad esempio, la potenza elettrica era 460 MWe, quella totale (o termica) circa 1.300 MWt: il 7% è circa 90 Mw, che è ancora una potenza considerevole.

## Incidenti provocati a Fukushima dal sisma, prima dell'arrivo dell'onda

Sussistono alcune differenze rilevanti nei sistemi adibiti a iniettare acqua nel nocciolo tra le unità della centrale di Fukushima Daiichi, in particolare per quanto riguarda l'unità 1. Alcuni dettagli tecnici sono essenziali per capire la successione dei danni provocati dal sisma e dall'onda, anche per chi non sia in grado di seguirli in modo circostanziato. *Si osservino le distinzioni tra elettropompe (azionate da motori elettrici) e le turbopompe (azionate da turbine a vapore)* perché esse hanno ovviamente avuto conseguenze diverse con il sisma. Le turbopompe infatti funzionano finché il nocciolo produce vapore, quindi per un tempo abbastanza lungo anche di giorni e, soprattutto, rendono indipendenti i circuiti di emergenza che le impiegano dall'alimentazione elettrica non avendo motori elettrici.

Come abbiamo detto, l'unità 1 dispone, oltre alla camera toroidale, anche di due condensatori d'emergenza (*isolation condenser*) verso i quali due valvole di sfioro si aprono automaticamente (cioè indipendentemente da motori) quando il vapore nel vessel supera una certa pressione (Par. precedente).

Nelle altre unità (Par. precedente) il sistema di ricircolazione RCIC – assente nell'unità 1 – che entra in funzione in caso di SCRAM è azionato da *turbopompe a vapore*, mentre il sistema RHR (*residual heat removal*), per asportare il calore accumulato nella *suppression chamber*, è azionato da *elettropompe*, cioè necessita dell'alimentazione elettrica.

Anche le valvole dei circuiti idraulici, in larga parte, *necessitano di energia elettrica* per essere chiuse o aperte a seconda della necessità ed inoltre l'intero sistema di regolazione del reattore che fa capo alla sala controllo dove risiedono gli operatori, ha bisogno di alimentazione elettrica per funzionare, per cui è assolutamente indispensabile, durante il transitorio di emergenza, che non venga a mancare l'elettricità.

*Si vede quindi come l'alimentazione elettrica è comunque un fattore assolutamente indispensabile durante un transitorio d'emergenza.* Si capisce dunque la gravità del danno provocato dal terremoto che ha colpito la centrale di Fukushima Daiichi, il quale ha messo fuori servizio la sottostazione elettrica privando la centrale dell'alimentazione esterna: le fotografie pubblicate dalla TEPCO mostrano interruttori caduti a terra, sezionatori deformati, cavi divelti. Tutto questo è accaduto immediatamente a prescindere dall'onda dello tsunami che, in ogni caso, non ha raggiunto la sottostazione elettrica in quanto questa era collocata alle spalle degli edifici 1 e 2 su un terrapieno più elevato (vedi Figura 10).

Per quanto il terremoto sia stato di notevole intensità (ma come si è detto abbastanza in linea con i valori di progetto) non trova giustificazione la completa messa fuori servizio della sottostazione elettrica che di fatto costituisce l'evento iniziatore dell'incidente, classificabile come *station black out*: infatti, i motori diesel d'emergenza (2 per ogni reattore) erano partiti regolarmente, ma nell'impianto di Fukushima sono collocati sotto il piano stradale, per cui l'onda arrivata dopo circa un'ora dal sisma li ha messi fuori servizio, privando la centrale di qualsiasi fonte di energia elettrica.



**Figura 10**

### **Evoluzione della dinamica degli incidenti nei reattori n. 1, 2 e 3**

La dinamica degli incidenti che hanno portato alla fusione dei noccioli dei tre reattori è stata diversa nelle tre unità, anche se rimangono molti aspetti non chiari.

Nel reattore n. 2 l'onda dello tsunami ha messo fuori servizio i diesel e il sistema RHR, nei giorni successivi è divenuto impossibile refrigerare il nocciolo e il livello dell'acqua è sceso: da un lato il combustibile è fuso almeno parzialmente, mentre l'aumento della pressione nella *suppression chamber* ne ha provocato l'esplosione il 15 marzo, con conseguente perdita del contenimento (v. fig. 7: poiché la *suppression chamber* è collocata alla base del vessel, l'edificio esterno non è stato particolarmente danneggiato).

Nel reattore n. 3 (alimentato con combustibile al plutonio) il livello dell'acqua nel vessel si è abbassato notevolmente a poche ore dall'incidente, scoprendo il nocciolo in almeno due circostanze: la mancanza di refrigerazione ha fatto aumentare la pressione interna al contenitore primario, che è esploso il 14 marzo (il piano di *refuelling*, fig. 7), con perdita definitiva di contenimento, distruggendo la parte superiore dell'edificio reattore (fig. 10).

Nel reattore n. 1 si riscontrano dai dati che analizzeremo variazioni iniziali di temperatura e pressione molto forti, che a nostro avviso hanno provocato un violento shock termico che ha gravemente danneggiato il vessel: Il nocciolo è rimasto a lungo completamente scoperto, è fuso totalmente e, per la prima volta nella storia degli incidenti nucleari, ha rotto il fondo del vessel: il nocciolo fuso, che prende il nome di *corium*, è uscito all'esterno nel basamento del reattore, cosa che è stata ammessa dalla TEPCO solo a partire dal 15 maggio, ed è assolutamente fuori controllo.

Per tutti i tre reattori si è dunque avuta perdita molto grave di contenimento.

Sembra comunque evidente, per tutti i reattori, che il sisma ha prodotto danni a moltissime componenti (oltre all'arresto della sottostazione elettrica), che poi hanno compromesso in vari modi anche il funzionamento di molti sistemi cruciali per il controllo successivo dei reattori e delle piscine, giocando un ruolo anche nelle varie esplosioni che più tardi hanno coinvolto in particolare le unità n. 1, 3 e 4 (fig. 10). Poiché il reattore n. 4 era non solo spento ma privo di combustibile nel nocciolo, l'esplosione ha senza dubbio coinvolto la piscina del combustibile, distruggendo il contenitore secondario.

La discussione dettagliata della ricostruzione che abbiamo fatto della dinamica degli incidenti richiede dettagli tecnici di notevole complessità: nella nostra analisi ci siamo concentrati sulle

dinamiche innescate nella prima ora o poco più, soprattutto dal sisma, perché su queste l'informazione è stata carente (anche per la complessità tecnica), mentre siamo convinti che esse abbiano avuto un ruolo cruciale anche nella successiva evoluzione degli incidenti.

### Reattore n. 1

Alle ore 14:46 e 46 secondi (linea continua verticale nelle figg. 11 e 12) i sensori sismici provocano regolarmente lo SCRAM del reattore con l'inserimento di tutte le 97 barre di controllo: la potenza del reattore scende istantaneamente a zero, mentre la pressione interna al vessel diminuisce da 68 atm a circa 60 atm (fig. 11). Il livello dell'acqua nel nocciolo scende di 600 mm per poi risalire oltre il valore normale (fig. 12) perché le pompe dell'acqua di alimento (azionate a vapore) seguitano a introdurre acqua nel nocciolo.

La sottostazione elettrica è immediatamente danneggiata e messa fuori servizio.

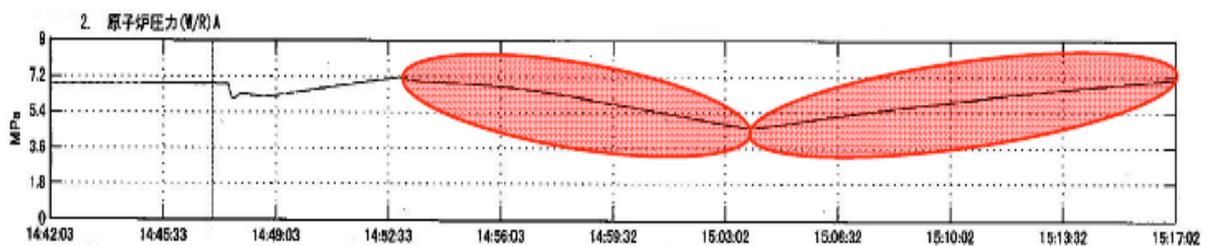


Figura 11 - Andamento della pressione interna al vessel nell'unità 1 [il termine giapponese significa: "Pressione del reattore"]

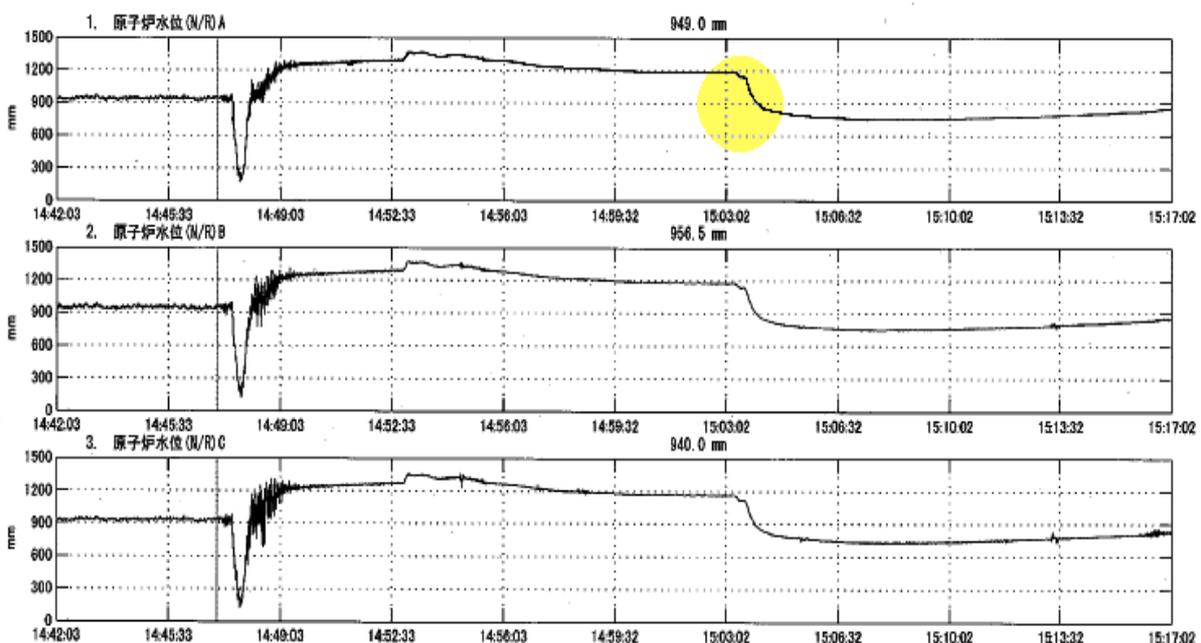


Figura 12 - Andamento livello acqua nel nocciolo nell'unità 1 [scala dei tempi leggermente diversa dalla fig. 11. I termini giapponesi significano nell'ordine: "Livello acqua nel reattore (A, B, C)"]

Un minuto dopo (ore 14,47 e 48 secondi) il turboalternatore viene arrestato manualmente, secondo la procedura per perdita del carico (rete fuori servizio): i sistemi di centrale connessi all'alternatore vengono commutati sulla sottostazione elettrica che però è fuori servizio. La mancanza di alimentazione elettrica provoca contemporaneamente la chiusura delle valvole di comunicazione del vapore con la turbina, e quindi comincia ad aumentare la pressione interna al vessel (fig. 11). 10 secondi dopo si avviano i diesel di riserva, sui quali viene commutata l'alimentazione dei sistemi di emergenza.

Dopo 5 minuti (ore 14:53) la pressione nel vessel raggiunge il valore per il quale si aprono le valvole di sfioro che inviano vapore ai due condensatori d'emergenza (di cui è dotata solo l'unità 1, v. Par. precedente): la pressione comincia a scendere (primo tratto evidenziato in rosa in fig. 11), e conseguentemente scende anche la temperatura del vessel, ed il livello dell'acqua (fig. 12).

Secondo la nostra valutazione è probabile che questi bruschi cambiamenti di temperatura siano all'origine dei danni irreparabili che si sono verificati successivamente.

Infatti, 10 minuti dopo (15:04) le valvole di sfioro si chiudono automaticamente perché la pressione interna al vessel è scesa a circa 44 atm (punto d'unione dei due tratti in rosa in fig. 11): ma in questi 10 minuti, corrispondentemente alla diminuzione della pressione, la temperatura dell'acqua nel vessel diminuisce molto rapidamente (164°C/ora), mentre nei successivi 13 minuti (dalle 15,04 alle 15,17) la pressione risale bruscamente (secondo tratto in rosa in fig. 11), accompagnata da una risalita altrettanto brusca della temperatura (il tasso di aumento della temperatura -corrispondente alla risalita della pressione- è stato di 138°C/ora). Queste escursioni termiche sono state molto superiori alla massima variazione consentita a progetto (55°C/ora, al fine di evitare stress termici sia al metallo del vessel che alle flange di giunzione dei tubi in uscita e in entrata), ed hanno provocato uno shock termico che ha causato danni al vessel: infatti in corrispondenza del minimo della pressione si verifica un brusco abbassamento del livello dell'acqua nel nocciolo, da 1200 mm a 800 mm (fig. 12, cerchietto giallo).

Questa nostra interpretazione differisce da quella di David Lochbaum, direttore del Nuclear Safety Project del UCS (Union of Concerned Scientists), secondo il quale questo abbassamento di livello non trova una spiegazione esauriente, portandolo a concludere che potrebbe trattarsi di un malfunzionamento dello strumento di misura del livello.<sup>27</sup> (Il livello zero in tutti i diagrammi corrisponde alla parte superiore del combustibile nucleare)

A nostro avviso invece la misura è attendibile perché è confermata da tre diversi misuratori di livello e ciò ci porta a fare l'ipotesi che il notevole shock termico subito dalle strutture metalliche (superiore di almeno 3 volte al dato di progetto!) abbia potuto causare o il distacco parziale di una delle flange di raccordo delle tubazioni con il vessel oppure una deformazione dei fori (e/o delle guarnizioni di tenuta) di accesso dei tubi di inserzione delle barre di controllo (*rod followers*) situati nella parte bassa del vessel (vedi Figura 13).

In entrambi i casi è possibile che la risalita della pressione (e temperatura) interna al vessel dopo le ore 15:04, abbia tamponato la perdita iniziale in quanto il materiale si è nuovamente dilatato, stabilizzando così il livello acqua del nocciolo intorno al valore di 800 mm.

---

<sup>27</sup> [http://allthingsnuclear.org/tagged/Japan\\_nuclear?utm\\_source=SP&utm\\_medium=more&utm\\_campaign=sp-nuke-more-direct-3-24-2011](http://allthingsnuclear.org/tagged/Japan_nuclear?utm_source=SP&utm_medium=more&utm_campaign=sp-nuke-more-direct-3-24-2011)



**Figura 13 - Penetrazioni nella parte inferiore del vessel**

*Tutto questo si è verificato prima dell'arrivo dello tsunami (ore 15:34 circa), che ha messo fuori servizio i diesel d'emergenza. Gli andamenti successivi del livello dell'acqua e della temperatura del nocciolo sono mostrati nelle figure 14 e 15: si vede che il livello dell'acqua inizia a scendere molto rapidamente (fig. 14), facendo supporre che la perdita ipotizzata precedentemente si sia allargata, lasciando nel giro di poche ore il nocciolo completamente scoperto, mentre la temperatura sale altrettanto rapidamente da circa 400 °C a circa 2.800 °C (fig. 14).*

Anche ipotizzando che non sia stato possibile fornire nessun apporto di acqua al nocciolo il completo svuotamento del nocciolo per ebollizione dell'acqua sarebbe dovuto avvenire in circa 8 ore. Dalla figura 14 invece è chiaro che intorno alle 19,30 (circa 4 ore e mezza dallo SCRAM) il nocciolo si è completamente svuotato e la temperatura ha raggiunto i 2800°C. Tenuto conto che la prima iniezione di acqua nel nocciolo è cominciata intorno alle ore 6.00 del 12 marzo (cioè circa 11 ore dopo il completo svuotamento del vessel) si comprende come il nocciolo si sia completamente fuso. Dall'andamento del livello si capisce che nonostante l'immissione di acqua il nocciolo continua a rimanere scoperto dato che l'acqua a contatto col nocciolo fuso evapora con rapidità producendo anche idrogeno che, a seguito delle operazioni di venting (cioè apertura di sfiati dal contenitore primario all'edificio reattore), causerà l'esplosione che alle 15:36 del 12 marzo distruggerà la parte superiore dell'edificio reattore (fig. 10).

I diagrammi dell'andamento di temperatura, pressione e livello acqua del nocciolo successivamente resi noti dalla TEPCO indicano che la temperatura nella parte alta del vessel era ancora di oltre 400°C a dieci giorni dall'incidente, a ulteriore conferma dell'avvenuta fusione del nocciolo. Il *corium* quindi va a dislocarsi nella parte inferiore del vessel causandone la fessurazione e perforazione.

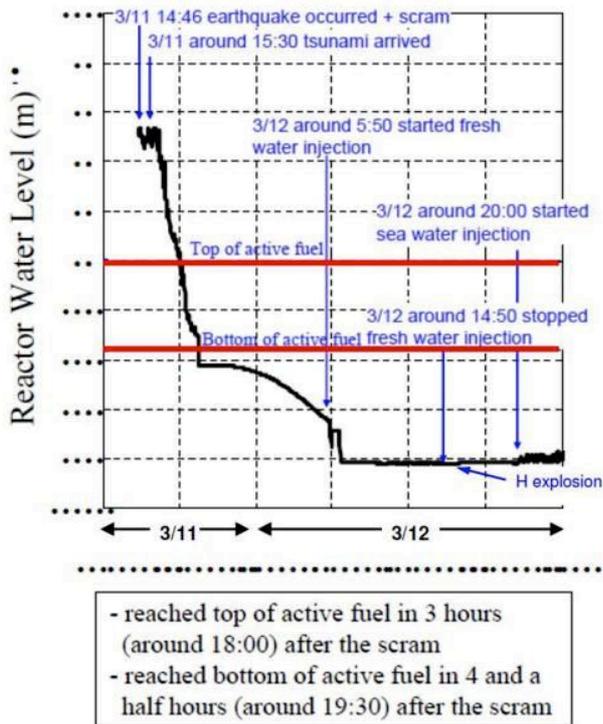


Figura 14 – Andamento del livello dell’acqua nel nocciolo nell’unità 1

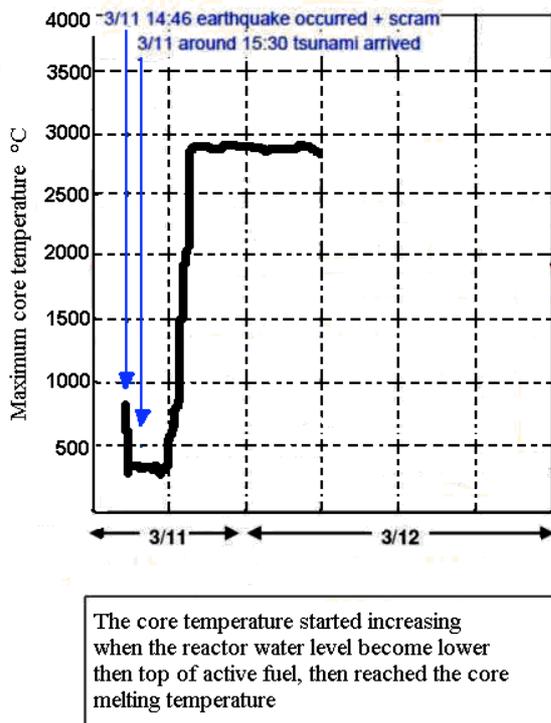
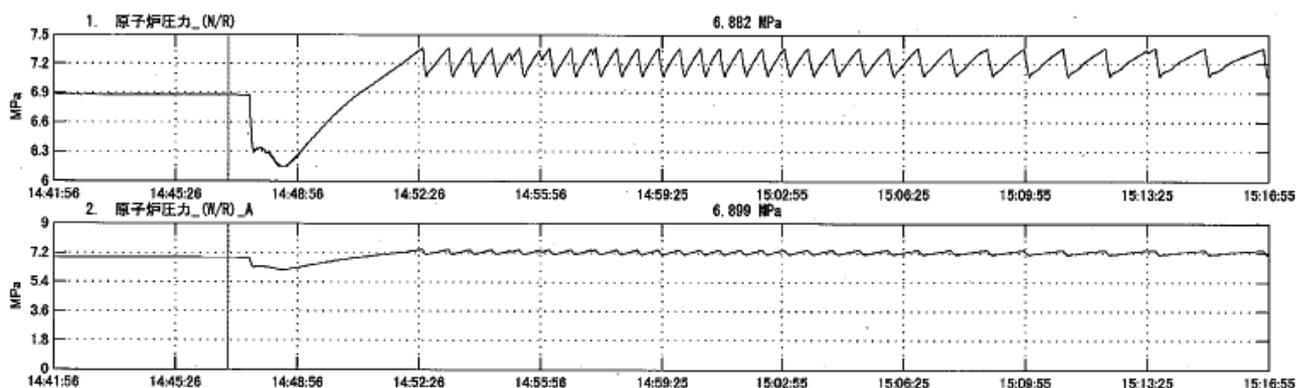


Figura 15 - Andamento della temperatura del nocciolo dell’unità 1

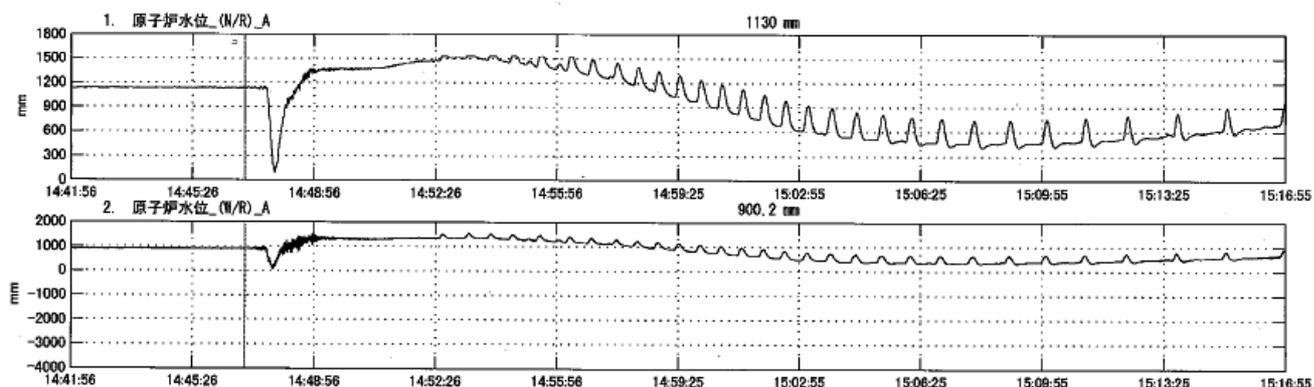
## Reattore n. 2

Nel reattore n. 2 dopo lo SCRAM, in mancanza di alimentazione elettrica entrano in funzione i diesel di riserva. Anche qui nella prima quindicina di minuti la pressione all’inizio scende e risale regolarmente (fig. 16), così come sale il livello dell’acqua nel nocciolo (fig. 17), per effetto della chiusura dell’alimentazione della turbina. L’aumento della pressione nel vessel fa entrare in funzione le valvole di sfioro alla *suppression chamber* (solo l’unità 1 ha i condensatori

d'emergenza): il tipico andamento a dente è dovuto alla ripetuta e ravvicinata apertura e chiusura delle valvole di sfioro al variare della pressione, che avviene in un intervallo compreso tra 73 e 71 atm circa, e quindi con minore stress termico del vessel rispetto all'unità 1. Entra regolarmente in funzione il sistema RCIC, azionato da una turbopompa, assicurando il reintegro dell'acqua al nocciolo, dato che il vapore prodotto dal calore di decadimento viene inviato alla *suppression chamber*. E quasi contestualmente entra in funzione il sistema RHR che raffredda l'acqua contenuta nella *suppression chamber*.



**Figura 16 - Andamento della pressione interna al vessel nell'unità 2 (la scala in ordinate è diversa nelle due figure) [I termini in giapponese significano "Pressione nel reattore"]**



**Figura 17 - Andamento del livello dell'acqua nel nocciolo dell'unità 2 (la scala in ordinate è diversa nelle due figure) [I termini in giapponese significano "Livello acqua nel reattore"]**

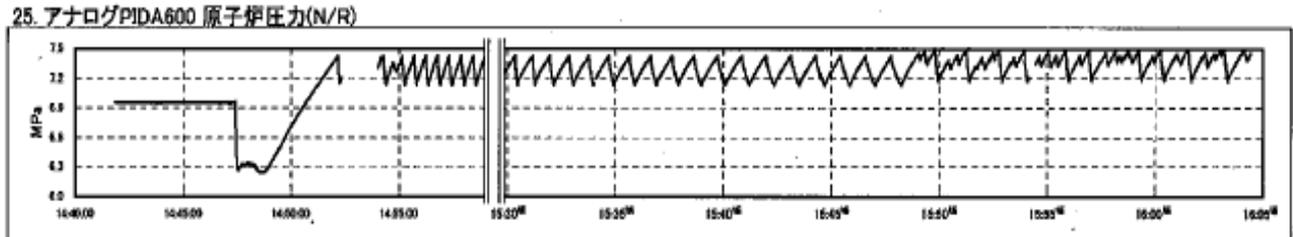
Ma quando l'onda dello tsunami mette fuori servizio i diesel d'emergenza, il sistema RHR (azionato da elettropompe) si arresta e la temperatura della *suppression chamber* comincia a salire. Tuttavia il sistema RCIC (azionato da turbopompe; assente, ricordiamolo, nell'unità 1,) continua ad assicurare un certo reintegro dell'acqua nel nocciolo tanto che il livello non scende al di sotto della parte superiore del combustibile (andamento a destra nella fig. 17).

Circa due ore e tre quarti dopo il sisma (ore 16:36) la TEPCO comunica ufficialmente alla NISA l'indisponibilità dei sistemi di emergenza ECCS (*Emergency Core Cooling System*).

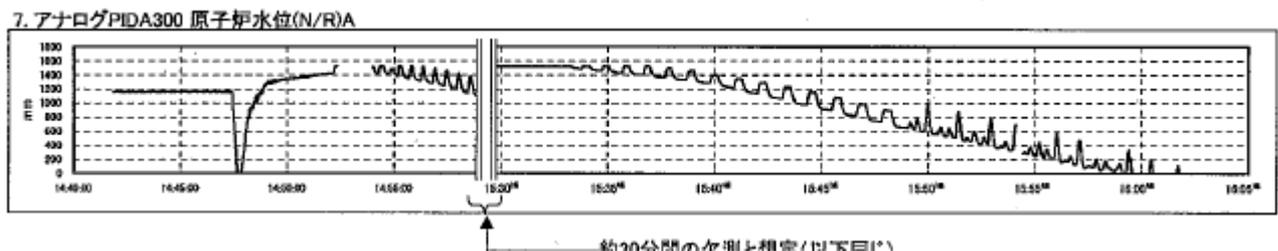
Nei giorni successivi l'impossibilità di refrigerare il nocciolo ha fatto scendere il livello dell'acqua nel vessel e il continuo travaso di vapore nella *suppression chamber* ha fatto salire la temperatura oltre i 100°C, causandone un'esplosione intorno alle ore 6 del mattino del 15 marzo che ha danneggiato la struttura con conseguente perdita del contenimento, e fusione almeno parziale del nocciolo scoperto.

### Reattore n. 3

Nell'unità n. 3 gli andamenti iniziali della pressione e del livello dell'acqua nel nocciolo sono simili a quelli dell'unità n. 2 (figg. 18 e 19). Dopo circa 7 minuti dal sisma (ore 14:53). La pressione del vessel raggiunge circa 73 atm facendo entrare in funzione le valvole di sfioro che inviano vapore alla *suppression chamber*: la pressione comincia a scendere e risalire secondo l'andamento di Figura 18, mantenendosi a valori alti anche dopo la messa fuori servizio dei diesel di emergenza avvenuta intorno alle 15:40.



**Figura 18 - Andamento della pressione interna al vessel dell'unità 3** [Il termine in giapponese significa "analogo PIDA600 pressione nel reattore")]



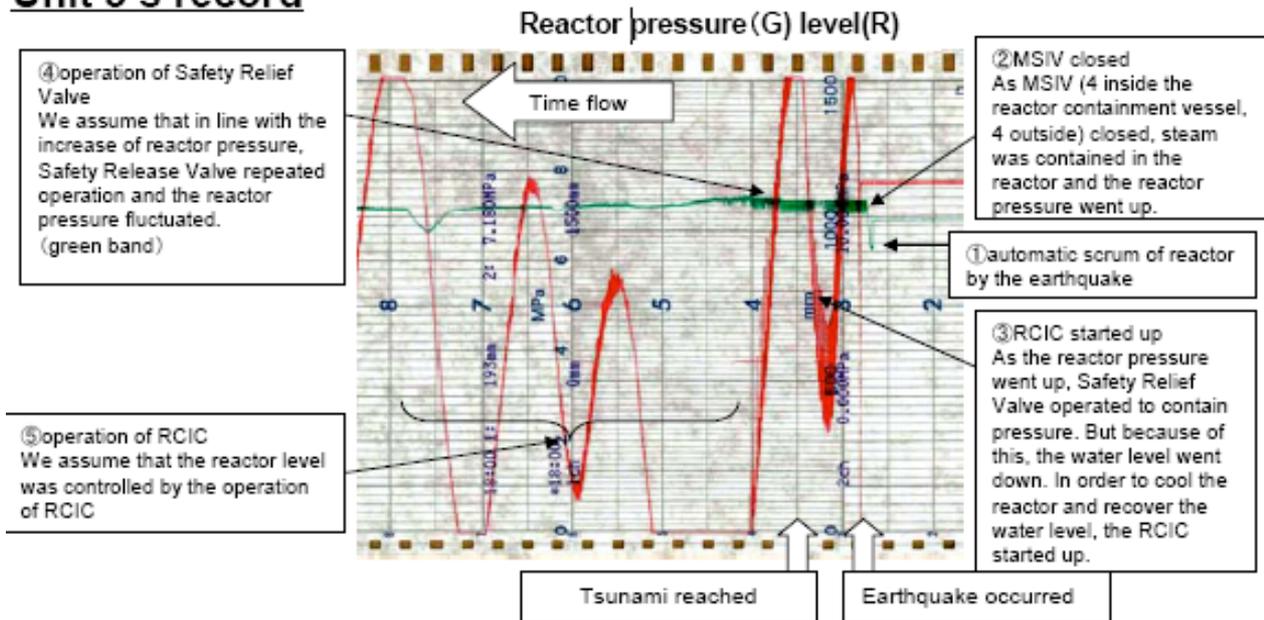
**Figura 19 - Andamento livello acqua nocciolo dell'unità 3** [Il termine in giapponese significa "analogo PIDA300 livello acqua nel reattore")]

Dai bollettini emessi da NISA e TEPCO parrebbe che oltre al sistema di ricircolazione RCIC, sia entrato automaticamente in funzione anche il sistema HPCI azionato anch'esso da una turbopompa a vapore. Ciononostante il livello acqua interno al vessel subisce un notevole abbassamento fino a scoprire il combustibile in almeno due circostanze a poche ore dall'incidente. Questo si vede dalla fig. 19, e su tempi più lunghi dalla fig. 20, che va esaminata con attenzione perché è la registrazione di una punta scrivente su un rotolo che scorre in modo tale che i tempi aumentano verso sinistra.

La linea verde rappresenta l'andamento della pressione mentre la linea rossa indica il livello dell': si riconosce il suo abbassamento e risalita iniziali, mentre l'apparenza più spessa della linea successiva è dovuta ai denti della fig. 18 compressi per la scala dei tempi.

La linea rossa rappresenta l'andamento del livello dell'acqua nel nocciolo: si vede l'abbassamento e la risalita del livello prima dell'arrivo dello tsunami come nella fig. 19, e gli abbassamenti successivi che lasciano il nocciolo scoperto.

## Unit 3's record



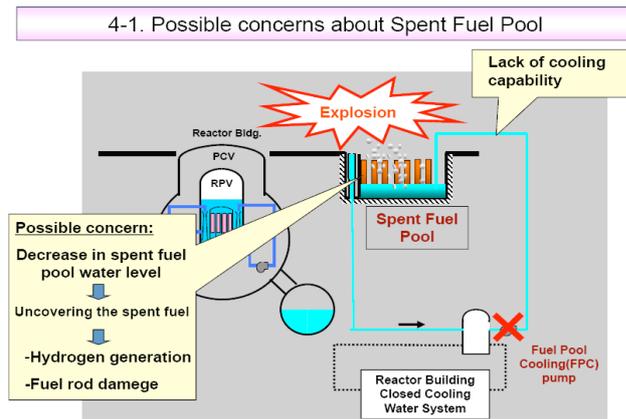
**Figura 20 – Andamento livello acqua (linea rossa) e pressione (linea verde) nel nocciolo dell'unità 3**

Alle 5,10 del 13 marzo la TEPCO comunica ufficialmente l'indisponibilità di tutti i sistemi di refrigerazione del nocciolo. Circa 24 ore dopo, intorno alle ore 7 del 14 marzo la pressione interna al contenitore primario raggiunge 5,3 atm ben oltre il limite di progetto

Alle 11,00 circa del 14 marzo una esplosione di tipo catastrofico distrugge la parte superiore dell'edificio reattore.

## Gli incidenti alle piscine del combustibile

Alcuni giorni dopo l'incidente (17 marzo) la TEPCO ha iniziato a iniettare acqua nelle piscine combustibile delle unità 1-4 (attraverso una linea ausiliaria di tubazioni per il reattore 2) con elicotteri e poi con speciali pompe motorizzate dei vigili del fuoco dato che nelle unità 1,3 e 4 la parte superiore dell'edificio reattore era stata distrutta da esplosioni causate da idrogeno. Questa refrigerazione di emergenza è stata resa necessaria in quanto i normali sistemi di reintegro dell'acqua nelle piscine erano fuori servizio. Questo tipo di incidente si è rivelato particolarmente grave data la presenza nelle piscine di ingenti quantitativi di combustibile irraggiato (Tabella 4) per il quale ci sono forti indizi di danneggiamento e/o di parziale fusione. Nel primo rapporto preliminare della NISA del 4 aprile 2011 (Figura 21) viene presa in considerazione l'ipotesi che la perdita di refrigerazione in tutte le piscine abbia portato al surriscaldamento del combustibile fino al punto di innescare la reazione metallo-acqua che, liberando idrogeno, ha causato le esplosioni nella parte superiore dei reattori 1, 3 e 4.



**Figura 21 – Dinamica incidente secondo NISA**

Questa ipotesi lascerebbe intendere che l'abbassamento di livello dell'acqua in piscina (fino a scoprire il combustibile) sia dovuta esclusivamente all'evaporazione, ma tenuto conto del rapporto volume acqua/volume combustibile e del calore emesso dal combustibile in ciascuna piscina<sup>28</sup>, questa ipotesi appare lacunosa. Considerate le dimensioni delle piscine infatti (esclusa quella dell'unità 1 che è più piccola) che sono approssimativamente di 12 m di lunghezza, 10 m di larghezza e 12 m di profondità, considerato che il combustibile nucleare sviluppa un'altezza di circa 4 m e che, normalmente, ci sono almeno 6m di acqua sopra il top del combustibile, risulta che per arrivare a scoprire il combustibile sarebbe dovuta evaporare una quantità di acqua di circa 700-800 t in 6-7 giorni, cioè fino al momento in cui (17 marzo) la NISA e la TEPCO danno notizia dei primi riversamenti di acqua sugli edifici dei reattori danneggiati. In base ai dati ricavati dalla Tabella 5 pubblicata sul sito del UCS<sup>29</sup> si nota che solo la piscina dell'unità 4 fornisce una quantità di calore tale da far evaporare per effetto del riscaldamento circa 70 t di acqua al giorno e quindi di giustificare perlomeno una condizione di criticità del livello dell'acqua presente in piscina. Per le altre piscine, in cui la quantità di calore generata è decisamente inferiore, l'eventuale diminuzione di livello dell'acqua fino a scoprire il combustibile in un tempo così breve può essere spiegata solo con l'ipotesi che per effetto del sisma (e conseguente black-out) si siano create delle perdite nelle piscine o per danneggiamento del *liner* di rivestimento, o per danneggiamento del sistema di tenute della paratia di separazione tra piscina e *dry well*.

**Tabella 5**

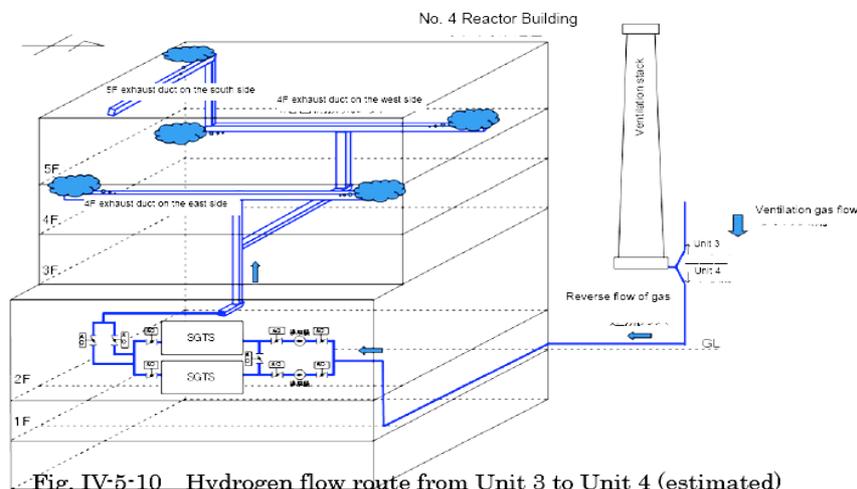
**Spent Fuel at the Fukushima Dai-Ichi (No.1) Plant**

Location	Assemblies in Storage				Heat Generation (1000kcal/h)	Pool Volume (m <sup>3</sup> )	Assemblies in one core	Fuel mass in one core (tons)	Latest inspection
	June 2010	Sept 2010	Dec 2010	March 2011					
Unit 1	292	292	292	292	60	1,020	400	69	3/25/10-10/15/10
Unit 2	471	471	587	587	400	1,425	548	94	9/16/10-12/15/10
Unit 3	366	514	514	514	200	1,425	548	94	6/19/10-10/26/10
Unit 4	783	783	783	1,331	1,600	1,425	548	94	11/30/10-
Unit 5	826	826	826	946	700	1,425	548	94	1/3/11-
Unit 6	692	876	876	876	600	1,497	764	132	8/14/10-
Shared pool	6,375	6,375	6,375						
Dry Cask	408	408	408						
<b>total</b>	<b>10,213</b>	<b>10,545</b>	<b>10,661</b>						

<sup>28</sup> Il calore emesso è legato alla "storia" del combustibile ed in particolare dal suo burn up di scarico (cioè dal grado di sfruttamento del combustibile durante la sua permanenza nel nocciolo) e dal tempo di giacenza del combustibile in piscina.

<sup>29</sup> <http://allthingsnuclear.org/post/4008511524/more-on-spent-fuel-pools-at-fukushima>

Nel rapporto ufficiale del Governo giapponese<sup>30</sup> presentato alla conferenza di Vienna sulla sicurezza nucleare del 20 giugno scorso, l'incidente al reattore 4 (spento e senza combustibile nel nocciolo perché trasferito in piscina) viene spiegato con una ipotesi completamente diversa da quella inizialmente fatta dalla NISA (Figura 22).



#### Figura 22 – Infiltrazione di idrogeno dall'unità 3 alla unità 4

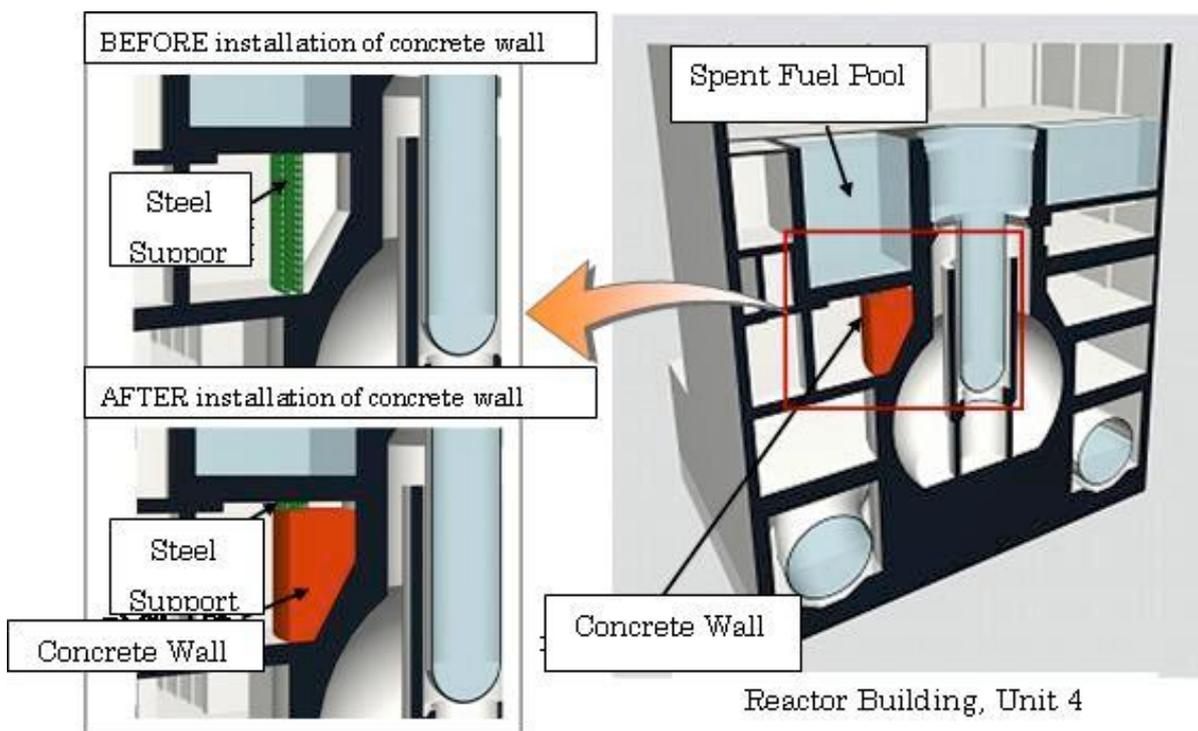
Il sistema di ventilazione (off gas) di ogni reattore è collegato ad un camino (ventilation stack) che è in comune con un altro reattore. Nella figura il camino è comune alla unità 3 e 4. Le linee blu indicano il percorso che avrebbe fatto l'idrogeno proveniente dall'unità 3 risalendo a ritroso tutto il circuito della ventilazione dell'unità 4.

Secondo questa ipotesi l'esplosione nella parte alta dell'edificio reattore dell'unità 4 sarebbe dovuta ad idrogeno proveniente dall'unità 3 attraverso le tubazioni che portano gli effluenti gassosi al camino del off gas che è in comune tra le due unità. In pratica si sostiene che, a seguito delle operazioni di venting effettuate sull'unità 3 per ridurre la pressione del contenitore primario, i gas (ivi compreso l'idrogeno) convogliati al camino siano entrati nell'equivalente circuito dell'unità 4 fino a raggiungere la parte alta dell'edificio dove, a contatto con l'ossigeno dell'atmosfera, hanno causato l'esplosione che a questo punto non sarebbe dovuta al surriscaldamento/danneggiamento del combustibile che quindi risulterebbe pressoché integro. A sostegno di questa ipotesi vengono riportati i valori di radioattività dell'acqua della piscina (riferiti però a prelievi effettuati circa un mese dopo lo scoppio) che risultano relativamente bassi e mostrano la sola presenza di Iodio e Cesio. Per giustificare il passaggio di idrogeno da un reattore all'altro, il rapporto del Governo giapponese afferma esplicitamente che sulle tubazioni che portano al camino del off gas non sono presenti valvole di non ritorno: affermazione di per sé gravissima che però non è sufficiente a spiegare come sia stato possibile che l'idrogeno proveniente dall'unità 3 abbia potuto attraversare inversamente il circuito dell'unità 4 (schematizzato in figura 15 in blu), dove sono presenti numerose valvole, pompe e sistemi di trattamento, e giungere al 5° piano dell'edificio. Difficile credere infatti che, anche a seguito della perdita di alimentazione elettrica, nessuno di questi componenti abbia potuto intercettare le linee dell'intero circuito tanto più che essendo l'unità 4 spenta da tempo, il circuito off gas si trovava in stand by (se non fuori servizio) e quindi con almeno le valvole di intercettazione chiuse. Inoltre va rilevato che l'ultima operazione di venting sull'unità 3 è stata effettuata alle 5,20 del 14 marzo dato che alle 11,00 dello stesso giorno c'è stata l'esplosione dell'edificio reattore, mentre l'esplosione all'unità 4 è avvenuta circa 24 ore dopo, e precisamente alle 06,00 del giorno 15 marzo.

<sup>30</sup> [http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea\\_houkokusho\\_e.html](http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html)

## Le esplosioni

Tutte e tre le esplosioni che hanno coinvolto le unità 1, 3 e 4 sono da attribuirsi alla presenza di idrogeno formatosi, nelle unità 1 e 3, nel nocciolo del reattore mentre per l'unità 4 (spenta e senza combustibile nel nocciolo) l'ipotesi più plausibile è che l'idrogeno si sia formato per il surriscaldamento del combustibile presente nella piscina. A suffragare questa ultima ipotesi c'è il fatto, reso noto da TEPCO a fine aprile, che a causa dell'esplosione si sarebbero danneggiate alcune tubazioni del circuito di raffreddamento della piscina dell'unità 4 ed inoltre lo stesso basamento della piscina potrebbe risultarne compromesso al punto che è stato necessario rinforzarlo con 32 pilastri di acciaio collocati tra il 2° piano dell'edificio reattore e il fondo della piscina<sup>31</sup>, che successivamente verranno integrati in una struttura di cemento armato (Figura 23).



**Figura 23 - Rinforzo piscina combustibile unità 4**

Le altre due esplosioni (Unità 1 e 3) presentano una dinamica assai diversa per quanto riguarda il loro punto di origine. Esaminando i filmati delle due esplosioni si nota che quella del reattore 1 si sviluppa soprattutto orizzontalmente rispetto al punto di origine individuato nel 5° piano dell'edificio reattore, mentre quella del reattore 3 presenta uno sviluppo verticale assai accentuato e collimato che lascerebbe supporre un'origine interna ad una struttura cava e relativamente profonda come quella costituita dallo stesso contenitore primario (Figura 24) che ha accentuato l'effetto dirompente al punto da scaraventare ad altezze considerevoli detriti di centinaia di chili che ricadendo hanno sfondato il tetto dell'edificio turbina del reattore n. 3 (Figura 25).

Una delle spiegazioni possibili a suffragare questa ipotesi potrebbe essere quella di un danneggiamento/perdita del sistema di venting verso il *dry well* che avrebbe fatto accumulare l'idrogeno nella parte superiore fino ad esplodere: come già ricordato l'ultimo venting effettuato sull'unità 3 avviene alle ore 5,20 del 14 marzo, cioè meno di 6 ore prima dello scoppio. *Nell'ipotesi che l'esplosione fosse avvenuta all'interno del contenitore primario di calcestruzzo, l'intero*

<sup>31</sup> [http://www.jaif.or.jp/english/news\\_images/pdf/ENGNEWS01\\_1308648632P.pdf](http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1308648632P.pdf)

incidente assumerebbe una valenza ancora più grave in quanto verrebbe fortemente compromesso il concetto di difesa in profondità rappresentato dalle strutture di contenimento.



**Figura 24- Esplosioni dell'edificio reattore unità 1 e unità 3** [I termini in giapponese significano: foto a sinistra, "12 marzo, ore 3:36 pm, esplosione idrogeno dell'unità n.1"; foto a destra, "oggi alle 11:01 esplosione idrogeno dell'unità n. 3"; disegno sotto a sinistra, "è esplosa soltanto la sala operativa all'ultimo piano"; disegno di sotto a destra, "è esploso il contenitore del reattore"]



**Figura 25 – Edificio turbina reattore n.3**

## 5 - Rivalutazione delle previsioni di incidenti nucleari gravi

La serie di incidenti di Fukushima sovverte, com'è successo per tutti gli incidenti nucleari, le ottimistiche rassicurazioni che le autorità accademiche e i costruttori di impianti nucleari presentavano sulla sicurezza e la probabilità di un incidente nucleare grave come evento remoto.

Noi avevamo già criticato nel libro *SCRAM* citato<sup>32</sup>, prima che avvenissero gli incidenti di Fukushima, i limiti e l'attendibilità di questa impostazione, limitata alla considerazione di *obiettivi di progetto* tutti da dimostrare. Queste stime e la casistica incidentale conducevano a valutare la probabilità di rischio associato (PRA *Probabilistic risk assessment*) di accadimento di un incidente grave con fusione del nocciolo inferiore a  $10^{-5}$  eventi/anno, e quella di consistenti rilasci radioattivi nell'atmosfera a  $10^{-6}$  eventi/anno: ovvero che incidenti di questo tipo possono accadere ogni 100.000 o 1.000.000 di anni/reattore, cioè ore di funzionamento cumulate (fino ad oggi 14.000). Osservavamo tra l'altro che «finora la probabilità risultante media della casistica incidentale rilevata nel corso degli anni passati non è inferiore a  $2 \cdot 10^{-4}$  incidenti anno/reattore (cioè 100 volte superiore a quella propagandata dai sostenitori del nucleare), che non a caso è la probabilità che la NRC mantiene ancora come valore di riferimento»<sup>33</sup>.

Gli anni/reattore di funzionamento cumulati finora da tutte le centrali nucleari funzionanti nel mondo assommano a circa 14.500, durante i quali gli eventi di fusione del nocciolo sono stati due, Three mile Island (1979) e Chernobil (1986). Tenuto conto che tra l'incidente di Chernobil e quello di Fukushima gli anni/reattore sono circa 10.000, la casistica incidentale e le conseguenti valutazioni probabilistiche di rischio associato, PRA, dovranno essere radicalmente riviste dopo gli incidenti in Giappone.

Dove non si è trattato di **un** nuovo incidente: a Fukushima infatti gli incidenti di fusione nocciolo sono almeno 3, ma potrebbero essere di più se verrà confermata la fusione del combustibile nelle piscine di decadimento: ciò porta ad *aumentare di 3-6 volte la probabilità di incidente grave*. E questi incidenti sono stati "limitati" per la fortunata circostanza che tre reattori erano spenti! Da Chernobil sono trascorsi 10.000 anni/reattore: questo implica – sempre in base a queste considerazioni puramente probabilistiche – che un incidente grave potrebbe verificarsi tra 3.500-1.500 anni/reattore, e con 450 reattori nucleari attualmente in funzione nel mondo *un altro incidente LOCA potrebbe verificarsi entro i prossimi 7-3 anni*.

La contemporaneità degli incidenti a tre noccioli separati e distinti dovrebbe ulteriormente portare ad una revisione dei PRA oltre che ai criteri (economicistici) in base ai quali si è diffusa nel mondo la pratica di concentrare nello stesso sito un numero elevato di reattori senza tenere in debito conto le implicazioni sulla sicurezza.

Come detto in precedenza, poco prima dell'incidente in Giappone, in Francia EDF ha «scoperto» un'«anomalia» (confermata dall'Autorità di Sicurezza, ASN) in ben 34 dei 58 reattori operativi, tutti quelli da 900 MW entrati in servizio tra il 1977 e il 1987, a causa della quale, in caso di LOCA, l'iniezione di acqua ad alta pressione nel circuito primario proveniente dal sistema HPCI<sup>34</sup> potrebbe non riuscire a raffreddare il nocciolo del reattore, e quindi ad evitare la potenziale fusione: «Di conseguenza, in caso di incidente, per certe dimensioni della rottura nel circuito primario principale

---

<sup>32</sup> Angelo Baracca e Giorgio Ferrari Ruffino, *SCRAM ovvero La Fine del Nucleare*, cit., Capitolo 9.

<sup>33</sup> NRC, «Status of accident sequence precursor and SPAR model development programs», SECY-02-0041 (March 8, 2002), p. 10.

<sup>34</sup> HPCI (High Pressure Cooling Injection) è un sistema di emergenza che entra in funzione in caso di LOCA immettendo acqua ad alta pressione nel circuito primario in modo da raffreddare il nocciolo del reattore.

(LOCA), l'iniezione di acqua ad alta pressione potrebbe non permettere di raffreddare a sufficienza il nocciolo del reattore»<sup>35</sup>.

La più vecchia centrale nucleare francese, quella di Fessenheim, è costituita da due reattori che hanno 30 anni e sorge su una faglia: la popolazione ne chiede la chiusura, ma per le autorità francesi la centrale è sicura, mentre anche la Germania e la Svizzera premono per la sua chiusura<sup>36</sup>. Ma secondo l'Agenzia francese per la sicurezza la centrale è idonea a funzionare ancora per 10 anni<sup>37</sup>, purché l'operatore, EDF, apporti alcuni miglioramenti, come il rafforzamento della base del primo reattore entro il 2013 e l'installazione di apparecchiature aggiuntive per assicurare l'estrazione del calore in caso di perdita di raffreddamento; con la riserva di stress test complementari, ed ammesso che EDF trovi questi provvedimenti finanziariamente compatibili.

In Giappone la Tepco è sotto accusa da tempo per le sue negligenze nella gestione delle centrali nucleari, per "pratiche disoneste" (come dovette riconoscere la stessa Tepco nel 2002 per test eseguiti proprio sull'unità n. 1 di Fukushima<sup>38</sup>), e per le sue reticenze nei casi di incidenti, ed anche il governo ha riconosciuto gli standard insufficienti di controllo e sicurezza.

Ha avuto una certa diffusione la dichiarazione di un ex ingegnere nucleare giapponese<sup>39</sup> che aveva partecipato alla costruzione della centrale di Fukushima lavorando alla Hitachi Ltd. – Mitsuhiko Tanaka, che abbandonò l'industria nucleare dopo l'incidente di Chernobyl – secondo il quale vi fu nel 1974 un difetto durante la fabbricazione del *vessel* del reattore n. 4 (che attualmente utilizzava combustibile MOX misto uranio-plutonio) che potrebbe averne compromesso la tenuta. La Hitachi negò che ci fossero pericoli. Né Tanaka trovò migliore ascolto quando, dopo l'incidente di Chernobyl, si rivolse al Ministero dei Trasporti.

Negli USA si è verificato nel giugno scorso un eccezionale straripamento del fiume Missouri che ha creato difficoltà in due centrali nucleari poste sulle rive, quelle di Fort Calhoun e di Cooper<sup>40</sup>, le quali hanno denunciato un "evento inusuale" del livello 4 della scala INES. La prima delle due centrali appare completamente allagata, come se spuntasse dalle acque di un lago.

## **Considerazioni specifiche sulla sicurezza nucleare dopo Fukushima, aspetti critici**

Dal punto di vista strettamente tecnico l'incidente di Fukushima è classificabile come station black out, originato da eventi remoti come un sisma e uno tsunami.

Per ciò che riguarda l'affidabilità delle salvaguardie e delle procedure di sicurezza, l'analisi dettagliata delle prime ore dell'incidente ha evidenziato le seguenti criticità.

### **Alimentazione elettrica**

- Inadeguatezza dei criteri di progetto della sottostazione elettrica messa fuori servizio esclusivamente dal sisma

<sup>35</sup> ASN, *Autorité de Sûreté Nucléaire*, «Anomalie générique concernant le système d'injection de sécurité des réacteurs de 900 MWe», 7 febbraio 2011, <http://www.asn.fr/index.php/Les-actions-de-l-ASN/Le-controle/Actualites-du-controle/Avis-d-incidents-des-installation-nucleaires/2011/Anomalie-generique-concernant-le-systeme-d-injection-de-securite>.

<sup>36</sup> Si veda il reportage di Anais Ginori, "Fessenheim fa litigare tutta Europa, una Fukushima a soli 500 km da Milano", *La Repubblica*, 31 maggio 2011.

<sup>37</sup> Max Colchester e Geraldine Amiel, "France: aging reactors safe for 10 years", *The Wall Street Journal online*, 4 luglio 2011, [http://online.wsj.com/article/SB10001424052702304803104576425382782586302.html?mod=googlenews\\_wsj](http://online.wsj.com/article/SB10001424052702304803104576425382782586302.html?mod=googlenews_wsj)

<sup>38</sup> 11 dicembre 2002, <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/02121101-e.html>

<sup>39</sup> V. ad esempio Jason Clenfield, "Fukushima Engineer Says He Helped Cover Up Flaw at Dai-Ichi Reactor No. 4", 23 marzo 2011, <http://www.bloomberg.com/news/2011-03-23/fukushima-engineer-says-he-covered-up-flaw-at-shut-reactor.html>.

<sup>40</sup> A. G. Sulzberger And Matthew L. Wald, "Flooding Brings Worries Over Two Nuclear Plants", *The New York Times*, 20 giugno 2011.

- Inadeguatezza del sistema di alimentazione di emergenza diesel collocati – insieme ai quadri elettrici di servizio e agli interruttori – sotto il piano stradale e quindi sommersi dallo tsunami.
- Insufficiente autonomia degli accumulatori (4 ore in media) rispetto alla durata del black-out

### **Sala controllo**

- Collocazione inadatta delle sale controllo: la loro operatività è stata compromessa oltre che dalla perdita di alimentazione elettrica, anche dall'aumento della temperatura ambiente e forse anche dal livello di radiazioni proveniente dai reattori danneggiati.
- Cablaggi inadatti delle sale controllo dato che quando è stata ripristinata l'illuminazione i quadri comando risultavano ancora fuori servizio e quindi non operativi.

### **Refrigerazione di emergenza**

- Nonostante siano entrati in servizio i condensatori di emergenza (unità 1), la suppression chamber ed i sistemi di ricircolazione RCIC (unità 2 e3), il transitorio di potenza susseguente allo SCRAM, ha avuto conseguenze distruttive per tutti e tre i reattori in funzione. In particolare sul reattore 1 si sono evidenziati alcune anomalie gravi (stress termici) che potrebbero aver compromesso l'integrità del vessel prima ancora dell'arrivo dello tsunami.
- E' al momento incomprensibile la mancata entrata in servizio del sistema di refrigerazione ad alta pressione HPCI su tutti e tre i reattori, tanto più che essendo azionato da turbopompe a vapore (come l'RCIC) non ha risentito degli effetti dell'onda dello tsunami.
- Inadeguatezza del progetto delle suppression chamber (tipico del sistema Mark1) dato che in poco tempo sono stati raggiunti e superati i parametri massimi di progetto (temperatura e pressione) con conseguenze distruttive come nel caso dell'unità 2.

### **Venting**

- Le procedure seguite dal personale possono aver contribuito alla propagazione dell'idrogeno in parti di impianto a contatto con l'aria, ma è evidente che il sistema di ventilazione sia risultato inadeguato ad assicurare l'integrità del contenimento: se confermata l'esplosione del contenitore primario dell'unità 3 è un evento di tipo catastrofico che non doveva assolutamente accadere.

### **Piscine del combustibile esaurito**

- Gli incidenti occorsi in almeno tre piscine del combustibile con relativo danneggiamento, surriscaldamento e probabile rilascio di idrogeno, non rientravano fra quelli presi fino ad oggi in considerazione dalla normativa di sicurezza e pertanto dovrebbero portare ad una revisione generale dei criteri di sicurezza relativi a questa parte di impianto, sia per i reattori già in servizio sia per quelli di nuova concezione. In particolare:
  - o alimentazione di emergenza per il circuito di raffreddamento dell'acqua piscine, attualmente non prevista
  - o potenziamento dei sistemi di misura del livello acqua in piscina dimostratisi inadeguati
  - o applicazione del criterio di difesa in profondità anche per le piscine del combustibile che comporta di dotarle di sistema di contenimento analogo a quello del nocciolo: si sottolinea che in tutti i reattori già in funzione nel mondo ma anche nei nuovi progetti di reattori avanzati (AP1000; ESBWR; EPR) le piscine del combustibile esaurito sono collocate al di fuori del contenitore primario e gli edifici che le ospitano non hanno funzioni di contenimento.
  - o limitazione della quantità di combustibile collocabile nelle piscine e conseguente proibizione della pratica dello stoccaggio addensato

## 7 - Prime considerazioni sulle implicazioni per l'industria nucleare mondiale; inadeguatezze e trascuratezze dei regolamenti d'emergenza.

È senz'altro prematuro fare previsioni sulle conseguenze che gli incidenti nucleari in Giappone avranno per l'industria nucleare mondiale. Noi eravamo convinti prima di Fukushima che l'energia nucleare non abbia futuro, se non fosse per la potenza delle lobbies che la promuovono e la sostengono, e che fosse già completamente fuori mercato, se non fosse per l'esternalizzazione di costi insostenibili<sup>41</sup>, quali la gestione della coda del ciclo nucleare (residui radioattivi e *decommissioning* delle centrali) e i costi di incidenti e risarcimenti danni: a maggior ragione siamo convinti oggi che, se le revisioni e l'adeguamento dei criteri e dei sistemi di sicurezza saranno sufficientemente seri, questo comporterà aumenti ulteriori dei costi, oltre ad una serie di altre difficoltà (non ultima la crescente opposizione delle popolazioni in tutto il mondo), che renderanno davvero impossibile la prosecuzione dei programmi nucleari.

Riportiamo qualche considerazione e aggiornamento in questo senso.

### Critiche sollevate ai regolamenti e all'operato della NRC negli Stati Uniti

Dopo l'incidente di Fukushima la NRC ha eseguito un'ispezione in 65 centrali nucleari<sup>42</sup>, riportando in un comunicato in maggio di avere riscontrato in 12 di essi “problemi con una o più requisiti durante le ispezioni”<sup>43</sup>. Ma un esame del rapporto della NRC condotto da ProPublica (un'organizzazione non-profit con sede a New York che svolge giornalismo investigativo di interesse pubblico: nel 2010 è stata la prima fonte di notizie online a vincere il Premio Pulitzer) conclude invece che le deficienze sono state riscontrate in 60 dei 65 siti<sup>44</sup>: problemi con gli impianti d'emergenza e le procedure in caso di disastri (grandi terremoti, tornado, inondazioni, uragani ed attacchi terroristici), apparecchiature rotte o mancanti, scarsa preparazione per eventi d'emergenza. La NRC ha controbattuto che, malgrado questi problemi, tutti gli impianti potrebbero proteggere i loro reattori, e che i problemi trovati dagli ispettori “sono ben lontani dal costituire preoccupazioni imminenti per la sicurezza”: pur ammettendo che “mentre singolarmente nessuna di queste osservazioni poneva un problema di sicurezza rilevante, essi denotano una potenziale tendenza dell'industria di omissione nella manutenzione delle apparecchiature e nelle strategie necessarie per mitigare alcuni eventi di progetto e al di là della base di progetto”<sup>45</sup>.

David Lochbaum, ingegnere nucleare della UCS specialista di problemi di sicurezza, osserva che il gran numero di problemi riscontrati nelle ispezioni dimostra che la NRC deve rafforzare la sorveglianza: “Perché hanno trovato tanti problemi nelle ispezioni? Non avrebbero dovuto trovarli prima?”<sup>46</sup>.

Le critiche sull'inadeguatezza dei regolamenti e delle procedure di sicurezza della NRC di fronte ad incidenti della gravità di quelli di Fukushima, soprattutto per gli impianti vecchi e in caso di richieste di estensione delle licenze, sono state riprese in un articolo dello *Scientific American*<sup>47</sup>.

---

<sup>41</sup> Si veda per esempio la raccolta molto dettagliata ed esauriente di studi in: Henry Sokolski (Editor), *Nuclear Power's Global Expansion: Weighing Its Costs and Risks*, <http://www.StrategicStudiesInstitute.army.mil/>

<sup>42</sup> NRC, “Nuclear Plants and Disasters: NRC Inspection Results”, <http://www.propublica.org/article/nuclear-plants-and-disasters-nrc-inspection-results>

<sup>43</sup> “NRC issues summary of recent U.S. nuclear plant inspections”, NRC News, 20 maggio 2011, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1114/ML111400475.pdf>

<sup>44</sup> John Sullivan, “Nuclear plant inspections find flaws in disaster readiness”, 29 giugno 2011, <http://www.propublica.org/article/nuke-plant-inspections-find-flaws-in-disaster-readiness>

<sup>45</sup> V. ref. nota 31.

<sup>46</sup> Citato nella referenza di nota 33.

<sup>47</sup> Peter Behr e Climate Wire, “U.S. nuclear regulations inadequate to cope with incident like Fukushima. The crisis at Fukushima Daiichi nuclear power plant has revealed gaps in U.S. nuclear safety procedures”, *Scientific American*, 16

Un'indagine Associated Press<sup>48</sup> sostiene che la NRC, lavorando in rapporto con l'industria nucleare, abbia ripetutamente allentato nel corso degli anni gli standard di sicurezza, o non ne abbia imposto il rispetto, in modo da mantenere operativi i reattori che invecchiavano. L'Associated Press denuncia che le valutazioni, le assunzioni e i regolamenti della NRC “sono stati periodicamente ritoccati per mantenere i reattori entro i limiti stabiliti per la sicurezza operativa ... di fronte ai problemi dell'evacuazione la NRC ha minimizzato l'impatto presunto degli incidenti, consentendo agli impianti di rimanere connessi alla rete”<sup>49</sup>. Un rapporto della NRC del 1982 sull'unità n. 3 di Indian Point – che prevedeva 60.000 morti e danni per \$314 miliardi (\$700 miliardi di oggi) per un incidente grave – allarmò talmente il pubblico che la NRC e l'industria anno evitarono simili analisi per decenni, mentre la proposta del gestore Energy Corp. per rilicenziare Indian Point rivalutava le previsioni a non più di 2.130 morti per tumore e \$117 miliardi di danni economici. “Più in generale, il governo sembra attento ad evitare qualsiasi cosa che lo vincoli pienamente nelle sue prerogative di programmazione”.

L'Associated Press sottolinea che la normativa di sicurezza per le centrali americane non è cambiata da decenni, malgrado profondi cambiamenti delle condizioni ed aumenti dei rischi<sup>50</sup>. Con l'invecchiare delle centrali americane, le aree che in origine erano rurali sono diventate notevolmente più popolate: alcune analisi valutano che dal 1980 la popolazione che vive attorno alle centrali nucleari sia aumentata di 4\_ volte; uno statunitense su tre vive nel raggio di 50 km da una centrale nucleare. Ma la zona di evacuazione è rimasta congelata dal 1978 (prima dell'incidente di Three Mile Island, nonché quello di Chernobyl) ad un raggio di 10 miglia dalle centrali; alcune stime dei tempi di evacuazione in caso di incidente non sono state aggiornate, ed incanalerebbero i residenti su strade ormai diventate intasate nelle ore di punta. Nel frattempo i rischi sono aumentati: più di 90 dei 104 reattori hanno avuto la licenza di operare a livelli di potenza più alti, aumentando i rischi di radiazione in caso di incidente grave. L'indagine ha evidenziato come con l'invecchiare delle centrali, e con l'estensione della loro vita operativa, esse “sono soggette a rotture che potrebbero condurre a un incidente. ... Questi rischi crescenti, tuttavia, non hanno prodotto preparazioni più attente per possibili incidenti. ... alcuni piani (di evacuazione) sono puramente nella lista, e non sono mai stati testati. ... I pianificatori dei disastri ... hanno fatto assunzioni dubbie sulla risposta del pubblico ad un incidente grave”. La centrale nucleare di Indian Point, con due reattori, si trova a 25 miglia dal bordo settentrionale di New York, e i piani d'emergenza non sembrano adeguati: se si dovesse evacuare la popolazione in un raggio di 50 miglia dalla centrale, questo implicherebbe l'esodo di 17,5 milioni di persone, il 6% della popolazione degli USA.

Anche un'analisi del *Bulletin of Atomic Scientists*, successiva al disastro di Fukushima, sottolinea le carenze dei piani di sicurezza della NRC e la reticenza su di essi verso l'opinione pubblica<sup>51</sup>.

## Rischio sismico negli USA

Alcune delle centrali nucleari negli USA sono localizzate in prossimità di zone ad alto rischio sismico. La fig. 27 combina la localizzazione delle centrali nucleari degli USA con una mappa del

---

giugno 2011, [http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=us-nuclear-regulations-fukushima-like-incident&WT.mc\\_id=SA\\_Twitter\\_sciam](http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=us-nuclear-regulations-fukushima-like-incident&WT.mc_id=SA_Twitter_sciam).

<sup>48</sup> Jeff Donn, “AP IMPACT: US nuke regulators waken safety rules”, 20 giugno 2011,

<http://www.google.com/hostednews/ap/article/ALeqM5jnlxtxW2oDWrH5uizpeE8mYnk3XA?docId=18e04eb81cd043508b5cf59d14a4ed41>.

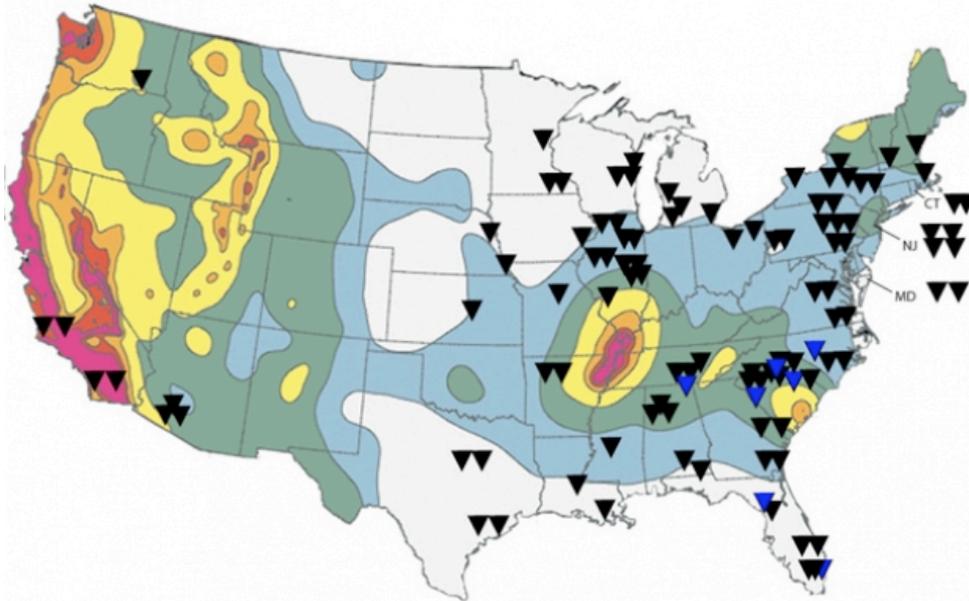
<sup>49</sup> Jeff Donn, “AP IMPACT: Populations around US nuclear plants soar”, Associated Press,

<http://www.google.com/hostednews/ap/article/ALeqM5jbtZWZx9rGmGn6ahZRPZLCXqoldw?docId=c2d202d1b678454b8b6a6e308ff7ac3a>.

<sup>50</sup> Ibidem.

<sup>51</sup> Edwin S. Lyman, “ Nuclear safety post-Fukushima: A victory for the public's right to know ”, *Bulletin of Atomic Scientists*, 10 May 2011, <http://www.thebulletin.org/web-edition/features/nuclear-safety-post-fukushima-victory-the-publics-right-to-know>

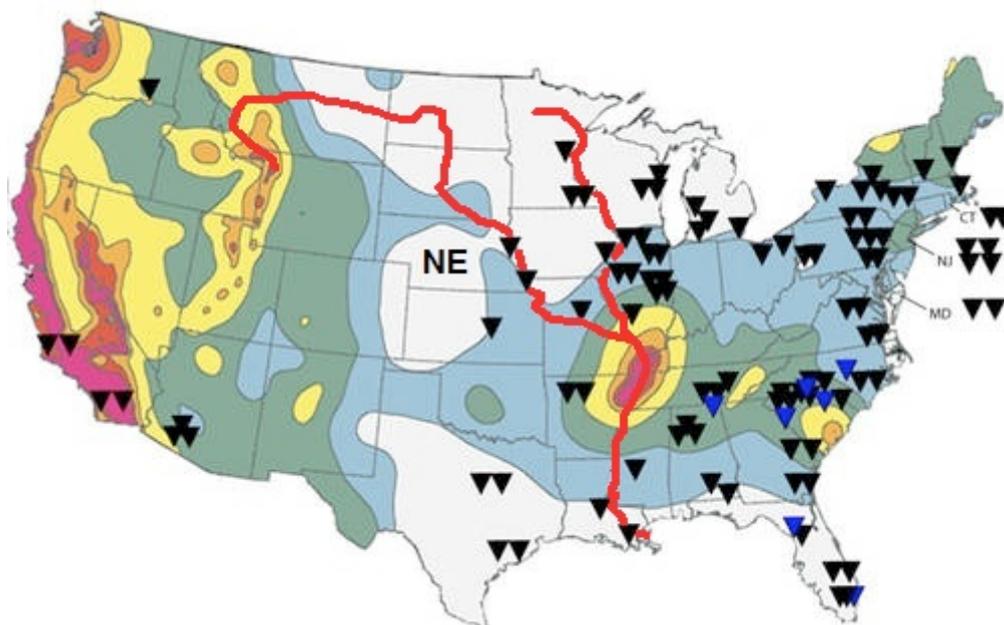
United States Geological Survey del 2006 che mostra il rischio sismico e la localizzazione delle centrali nucleari: in nero sono indicate le centrali operative, in blu i siti proposti per i nuovi reattori AP1000. Circa sei anni fa si giunse alla conclusione che i rischi per le centrali nucleari nella parte orientale del paese sono più alti di quanto si era sospettato.



**Figura 27** - Il rischio sismico sul territorio degli USA: da molto basso (bianco), a moderato (azzurro, verde e giallo), ad alto (arancione, viola e rosso)

[Fonte: <http://georgewashington2.blogspot.com/2011/06/nebraska-nuclear-threat-as-predictable.html>]

Quanto ai rischi di inondazione, la fig. 28 mostra in rosso il corso dei fiumi Mississippi e Missouri rispetto alla localizzazione delle centrali nucleari.



**Figura 28** - [Fonte: <http://georgewashington2.blogspot.com/2011/06/nebraska-nuclear-threat-as-predictable.html>]

# Appendice 1

## Stato reattori al 10.06.2011 secondo JAIF

Status of countermeasures for restoring from the accident at Fukushima Daiich Unit 1 through 4. As of June 10th, 2011. (Estimated by JAIF)

		Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Notes
Basic information	Type of plant	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	
	Electric / Thermal power output	460/1380	784/2381	784/2381	784/2381	
Plant status when hit by the earthquake	Operation status	In service -> Shutdown	In service -> Shutdown	In service -> Shutdown	Outage	
	No. of nuclear fuels loaded in the reactor	400	548	548	0	
	No. of spent fuels stored in the SFP	292	587	514	1331	
	Emergency power supply	Stopped due to the earthquake				
Core and fuel integrity		EDGs automatically started up when the external power was lost but stopped later when tsunami hit the plants.				
Reactor cooling	Core and fuel integrity	Damaged (core melt)*1	Damaged (core melt)*1	Damaged (core melt)*1	No fuels loaded	
	RPV structural integrity	Limited damage and leakage	Unknown	Unknown	No damage	
	PCV structural integrity	Damage and leakage suspected	Damage and leakage suspected	Damage and leakage suspected	No damage	
	Core cooling	Not functional	Not functional	Not functional	Not required	
	Goal of STEP 1 (April through June)	Stable cooling (circulating injection cooling reusing accumulated water)			—	Total injection flow: 21.3m <sup>3</sup> /[6/8]
	Cooling by minimum injection rate	Injecting freshwater into the reactor via feed water line at 3.1m <sup>3</sup> /h	Injecting freshwater into the reactor via feed water line at 4.0m <sup>3</sup> /h	Injecting freshwater into the reactor via feed water line at 11.2m <sup>3</sup> /h	—	
	Establishment of circulating injection cooling	Work for injection line in progress	Work for injection line in progress [4/9-]	Work for injection line in progress [4/16-]	—	
	Nitrogen gas injection into PCV	Injection continued [4/6-]	Work for injection line in progress [4/16-]	Work for injection line in progress [4/16-]	—	
	Flooding of PCV after sealing leaks	Studying	Studying	Studying	—	
	Securing heat exchange function	Work for secondary-loop piping in progress [5/13-]	Construction work to be started after improving the work environment	Construction work to be started after improving the work environment	—	
Challenge	Improving work environment	High radiation circumstance is hampering the work to restore reactor cooling. Preparation work such as removing radioactive debris, radiation monitoring is underway in each unit. TEPCO announced its plan to recirculate and filter the air in the Unit2 R/B to reduce its radioactivity and then open the door to decrease the humidity in the building, which also hampers the work at Unit 2 [6/8].			—	
	Fuel integrity in SFP	Unknown	Unknown	Unknown	No severe damage suspected*2	
SFP cooling	SFP cooling	Not functional	Not functional	Not functional	Not functional	
	Goal of STEP 1 (April through June)	Stable cooling				
	Reliability improvement in injection operation	Injecting freshwater via SFP coolant clean up line	Switching from freshwater injection via SFP coolant clean up line to circulation cooling	Injecting freshwater via SFP coolant clean up line	Spraying freshwater by pump truck Starting work for injection via SFP coolant cooling line	Injecting/Spraying corrosion inhibitor, hydrazine (H2NNH2), w freshwater [5/9-]
Accumulated water	Circulation cooling with Hx	Planned	In operation	Planned	Planned	
	Increase and accumulation of radioactively contaminated water	High level radioactive wastewater is accumulating in the R/B, T/B and RW/B of each unit. (about 92,000m <sup>3</sup> [5/31])				
	Goal of STEP 1 (April through June)	Securing storage place of high level radioactive wastewater				
	Securing storage place	-Waterproof check of Centralized Radiation Waste Treatment Facility, PMB (storage capacity: approx. 10,000m <sup>3</sup> ) and MWRTB(storage capacity: approx. 4,800m <sup>3</sup> ) completed -Underground tank for high level radioactive wastewater (storage capacity: approx. 10,000m <sup>3</sup> ) to be installed in the mid August -Storage tanks to receive processed, low to middle level radioactive wastewater with the capacity of approx. 13,000m <sup>3</sup> installed (~5/31). Additional capacity to be installed at 20,000m <sup>3</sup> /month from the end of June.				PMB: Process Main Building MWRTB: Miscellaneous So Waste Volume Reduction Treatment Building
	Transfer of radioactive waste water	-Unit 2: Concrete tunnel => PMB (4/19-5/26, approx. 9,600m <sup>3</sup> , Transfer suspended and then resumed after revising the storage limit level of the building [6/4-]) -Unit 3: T/B => MWRTB (5/17-5/25, approx. 3,700m <sup>3</sup> , Transfer suspended due to possible leakage), T/B => Unit 3 main steam condenser [6/5-6/9]				
Installation of water process facility	-Work for installing the water processing facility in progress. Water processing to be started on June 15th (capacity: 1,200m <sup>3</sup> /day) -Desalination of processed radioactive water to be installed (capacity: 480m <sup>3</sup> /day in the late June, then increased step by step) to reuse the water for reactor injection.					
Preventing contamination of the sea, etc.	-Silt fences installed. -Working on installation of seawater circulatory purification system [5/30-]. Test operation conducted [6/9]. -Blocking the concrete tunnels outside the T/Bs					
Risk		The risk of leakage of the high level radioactive wastewater accumulating in the Unit 2 and 3 T/Bs and concrete tunnels is increasing				

\*1 TEPCO's analysis [announced on 5/15,23]

\*2 TEPCO estimated that there was no severe damage to the fuel in the Unit 4 SFP based on the concentration of radioactive materials in the pool and the pictures of the pool. [4/13,28,29]

\*3 Rough estimate by TEPCO [announced on 5/31]

[Source]  
Government Nuclear Emergency Response Headquarters: News Release,  
Press conference  
NISA: News Release, Press conference  
TEPCO: Press Release, Press Conference

[Significance judged by JAIF]  
:Low  
:High  
:Severe (Need immediate action)

[Progress of countermeasures]  
:Completed  
:Under construction  
:To be done (including studying and manufacturing)

[Abbreviations]  
SFP: Spent Fuel Storage Pool  
EDG: Emergency Diesel Generator  
RPV: Reactor Pressure Vessel  
PCV: Primary Containment Vessel  
R/B: Reactor Building  
T/B: Turbine Building  
RW/B: Radioactive Waste Disposal Building  
RHR: Residual Heat Removal system  
CST: Condensate water Storage Tank  
Hx: Heat exchanger  
NPS: Nuclear power station

## Appendice 2

**Documentazione fotografica dei danni alla sottostazione elettrica della centrale nucleare di Fukushima Daiichi provocati dal sisma dell'11 marzo 2011 (fonte TEPCO)**

(1 5) Disconnecter S200 (damaged)

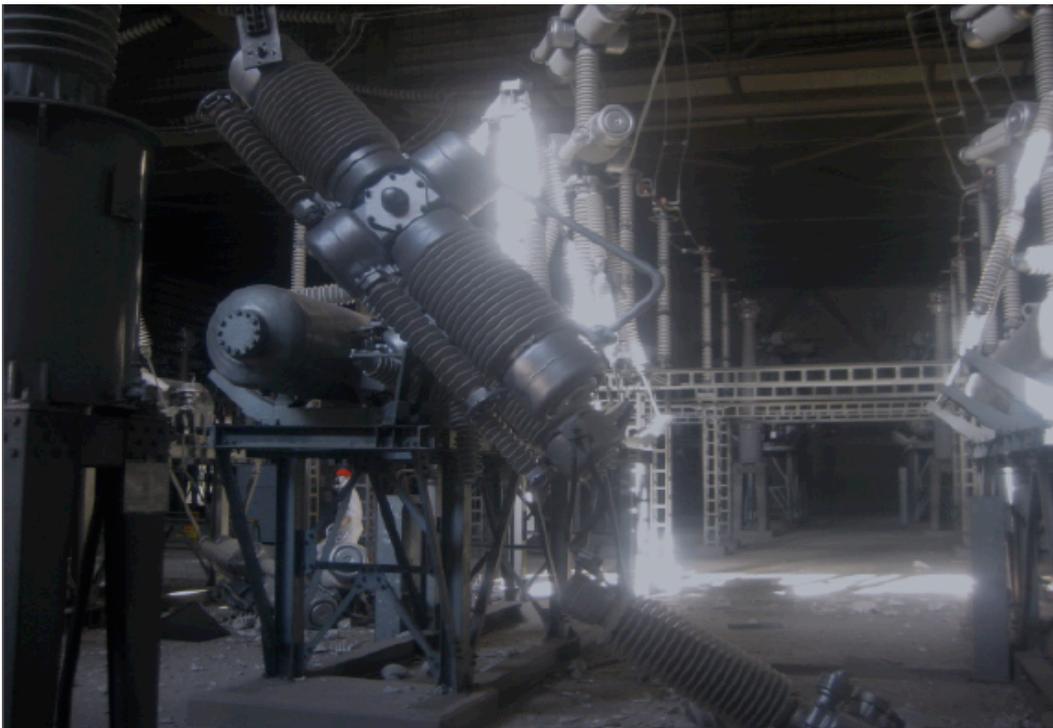


Photo : Tokyo Electric Power Company, March 11, 2011

(17) Current transformer, 500kV Section bus (damaged)



Photo : Tokyo Electric Power Company, March 12, 2011



(7) Circuit breaker O-41, Iwaki Main Line 1L (damaged)



Photo : Tokyo Electric Power Company, March 11, 2011

(5) Main transformer No.4 : V-suspended insulator (damaged)



Photo : Tokyo Electric Power Company, March 12, 2011

