

Il disastri de centrâl nucleâr di Fukushima Dai-ichi*

ALESSANDRO PASCOLINI**

Ristret. A vegnin analizâts i efets dal taramot Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki dai 11 di Març dal 2011 su la centrâl nucleâr Fukushima Dai-ichi, e di cheste a son descris i elements strutturâi fundamentâi. A vegnin consideradis lis carateristicis e i aparâts di sigurece dai reatôrs a aghe bulint interessâts dal incident; po dopo a son presentadis la evoluzion dai events dal implant e la ricostruzion dai procès che a àn puartât ae fusion dal nusel di trê reatôrs. Par vie di dams structurâi e esplosions e je stade une fuarte dispersion tal ambient di sostancis radioactivis, che e à obleât a evacuâ cirche 100.000 personis de zone dulintor; l'articul al presente la situazion cognossude a sîs mês dal incident doprant in particolâr il rapuart de Agenzie pe energjie atomiche di Viene (IAEA) e un rapuart detaiât dal guvier gjaponês presentât ae Conference ministeriâl su la sigurece nucleâr tignude a Viene dai 20 ai 24 di Jugn 2011.

Peraulis clâf. Reatôrs nucleârs, sigurece nucleâr, incident di Fukushima, radiazions nucleârs.

1. Introduzion. Il taramot Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki (*Great East Japan Earthquake*) dai 11 di Març dal an passât cu la serie successive des ondadis tsunami al è stât un dai plui disastros de storie dal Gjapon cun plui di 25.000 tra muarts e spierdûts, un numar tant plui grant di sfolâts, citâts interiis e paîs sdrumâts, dams enormis aes struturis e infrastruturis economicis e sociâls. Come tancj altris implants industriâi, ancje lis centrâls nucleârs de zone a àn subît lis violentis scossis dal taramot e lis fuar-

* Daûr a jessi publicât in "Atti e Memorie dell'Accademia Galileiana di Scienze Lettere ed Arti", Padue.

** Dipartiment di Fische, Universitât di Padue, Italie. E-mail: pascolini@pd.infn.it

tis ondadis di tsunami: Tokai Dai-ni, Higashi Dori, Onagawa, Fukushima Dai-ichi e Fukushima Daini.

I 11 reatôrs operatîfs tal moment dal taramot a son stâts studâts in automatic dai sistemis di control sismic dai implants, ma lis altis ondis di tsunami a àn creât problemis di divierse gravitât aes variis centrâls, cui efîets plui devastants a Fukushima Dai-ichi, dulà che l'incident al è stât classificât cul grât plui alt de scjale INES (*International Nuclear Event Scale*)¹ che e misure la gravitât dai incidents nucleârs. In trê reatôrs si è rivâts ae fusion dal nusel e par vie di dams strutturâi e esplosions si à vût une fuarte dispersion tal ambient di sostanziiis radioativis, obleant a evacuâ cirche 100.000 personis de aree dulintor.

A cuatri mêis dal incident la situazion dal implant di Fukushima no je ancjemò stabilizade e lis scossis sismichis a continuin a jessi fuartis e numerosis (517 parsore magnitudo 5). Chest al rint ancjemò impussibile une analisi detaiade di ducj i parametris di stât dai reatôrs colpîts e une ricostruzion precise dai events, ancje se al è stât definît un plan di interventi par puartâ la centrâl in plene sigurece e ripristinâ lis cundizions ambientâls drentri de metât dal 2012.

Une comission internazionâl di esperts costituide de Agenzie internazionâl pe energjie atomiche di Viene (IAEA)², di acuardi cul guvier gjaponês, e à inviât une mission a Fukushima ae fin di Mai par verificâ i fats e rigjavândi une lezion pe sigurece globâl; su cheste base e à redizût un rapuart (IAEA 2011) presentât ae Conference ministeriâl su la sigurece nucleâr tignude a Viene dai 20 ai 24 di Jugn, dulà che al è stât discutût ancje un rapuart detaiât dal guvier gjaponês (Japan Government 2011).

Su chescj rapuarts, e ancje sui comunicâts de *Nuclear Industrial Safety Agency* (NISA) e de *Nuclear Safety Commission* (NSC) gjaponesis, si fonde il gno contribût, che al rivuarde dome la centrâl Fukushima Dai-ichi e al è inzornât al mêis di Lui dal 2011.

2. La centrâl Fukushima Dai-ichi. La centrâl di Fukushima Dai-ichi, di proprietât de *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO), si cjate dongje de citât di Okuma, su la cueste nord-orientâl dal Gjapon, e e jere tra lis plui grandis dal mont cui siei 6 reatôrs a aghe bulint (*Boiling Water Reactor* – BWR) par une potence totâl di 4,7 GWe (Figure 1).



Figure 1. La centrâl di Fukushima Dai-ichi prin dal taramot.

La Tabele 1 e mostre lis carateristichis essenziâls des 6 unitâts; tal moment dal taramot lis primis 3 a jerin in funzion, chês altris fermis par revision periodiche: de unitât 4 al jere stât gjavât dut il combustibil e il reatôr al jere jemplât di aghe; lis unitâts 5 e 6, daûr a jessi controladis prin di rientrâ in funzion, a jerin tal stât di “fermade frede”, vâl a dî studadis, cui elements di combustibil cuvierts di aghe, a pression atmosferiche e temperature di 30 °C cirche.

Il combustibil doprât al è ossit di urani cuntun bas inricjiment de component urani-235 (*Lightly Enriched Uranium* – LEU) che al è l’isotop che al subîs fission: se tal urani naturâl l’urani-235 al è presint dome pal 0,72%, pal lôr funzionament i reatôrs BWR a domandin un inricjiment di cirche il 3%³. Dongje dal LEU si pues doprâ une misture di ossit di urani naturâl (o impuarît) cun cirche il 5% di ossit di plutoni (*Mixed Oxides* – MOX), che al constituîs l’element di fission: te unitât 3 a son presints 32 modui cun MOX (un reatôr BWR nol pues vê plui dal 33% di MOX tal so combustibil totâl)⁴.

Il combustibil al è prodot in cilindruets ceramics (par solit 1 cm di dia-

Tabele 1. I reatôrs di Fukushima Dai-ichi tal moment dal taramot.

	Unitât 1	Unitât 2	Unitât 3	Unitât 4	Unitât 5	Unitât 6
Potence (MWe/MWt)	460/1380	784/2381	784/2381	784/2381	784/2381	1100/3293
Tipologjie	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
Sisteme di contigniment	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark I	Mark II
Jentrade in funzion	1971	1974	1976	1978	1978	1979
Elements di combustibil tal nusel	400	548	548	0	548	764
Cjame di urani (t)	69	94	94	94	94	132
Sbaris di control	97	137	137	137	137	185
Elements di combustibil tes vascjis di imazinament	292 esaurîts 100 gnûfs	587 esaurîts 28 gnûfs	514 esaurîts 52 gnûfs	1331 esaurîts 204 gnûfs	946 esaurîts 48 gnûfs	876 esaurîts 64 gnûfs
Potence termiche tes vascjis di immagazinament (kW)	60	400	200	2000	700	600
Tipologjie di combustibil	LEU	LEU	LEU e MOX	LEU	LEU	LEU
Stât	atîf	atîf	atîf	studât	studât	studât

metri par 1,5 cm di altece) che a vegnin intassâts dentri di sbaris lungjis 4 m rivistudis di une lee di zirconi, un materiâl permeabil ai neutrons e resistant ae corosion; un fas di 60 sbaris al forme un element di combustibil. L'insiemit dai elements, poiâts jù intune cierte maniere, al costituîs il nusel dal reatôr, vâl a di la font di energjie.

Dopo cirche 2 agns di operazion il combustibil si esaurîs, stant che une frazion consistent di urani-235 (o plutoni) e subis fission; a chest pont i elements esaurîts, che a contegnin prodots di fission une vore radioatîfs, a vegnin gjavâts fûr dal reatôr e par cirche 3 agns tignûts te aghe, che a 'nt assorbîs lis radiazions e il calôr; passât chest timp a puedin jes-

si immagazinâts in ambient sec prin di jessi tratâts in altre maniere.

In ogni unitât de centrâl e je une vascje di immagazinament posizionade dongje dal nusel dal reatôr, par podê gjavâ fûr i elements mantignintju te aghe (il reatôr al ven viert par disore e jemplât di aghe). Lis vascjis a son fondis 12 m e a garantissin une cuvierture di 7-8 m di aghe borade⁵ parsore dal combustibil; lis sbaris a vegnin tignudis in struturis rigidis distanziadis par evitâ situazions di criticitât; la temperadure e je mantignude par solit a 30 °C cun ricicli de aghe di disfredament midiant di pompis eletrichis (l'immagazinament al reste sigûr in plene cuvierture di aghe fin a 85 °C). Tes vascjis a son tignûts ancje i elements gnûfs intant che a spietin di jessi inserîts dentri dal nusel.

Dopo 18 mêis il combustibil al è trasferît intune unitât di immagazinament centrâl, logade dongje de unitât 4, indotade di une vascje di 12 m par 29 m par 11 m di profunditât (capacitât 3828 m³) e costruïde par tignî 6840 elements di combustibil (6375 tal moment dal sisme). Te centrâl al è ancje un dipuesit di contignidôrs di elements suts, logât dongje dal fabricât des turbinis de unitât 5.

La reazion di fission a cjadene che e prodûs la energjie primarie e je regolade di sbaris di control fatis di materiâl che al assorbîs i neutrons, ridusint il flus e diminuint il tas di fission (tai BWR lis sbaris a vegnin metudis dentri dal bas); l'inseriment des sbaris par dute la lôr lungjece al ferme la reazion a cjadene in dut il volum dal nusel e al stude il reatôr.

Ducj i reatôrs di Fukushima a son costruîts sul cret⁶ e progjetâts par resisti ai taramots previodûts su base storiche, come ducj i reatôrs giapponês; controlâts dopo dal taramot Miyagi dal 1978 (acelerazion 122 Gal par 30 s) no mostravin nissun dam; tal 2006 la resistence sismiche e je stade puartade a accelerazions orizontâls tra 441 e 489 Gal e verticâls tra 412 e 429 Gal, a seconde de unitât. I fabricâts des unitâts 1-4 a son a 10 m sore il nivel dal mâr e a son un dongje di chel altri, invezit lis unitâts 5 e 6 a son fatis sù intun altri puest, un fregul plui alt (13 m sul nivel dal mâr). I locâi des turbinis a son da pît dai reatôrs; al plan tiere dal fabricât des turbinis a son i gjeneradôrs eletrics diesel di emergjence (EDG) disfredâts cun aghe di mâr, come ancje i cuadris di comant des conessions e dai implants eletrics. Lis unitâts 1-5 a an 2 EDG ognidune e la unitât 6 a 'nd à 3: un dai EDG des unitâts 2, 4 e 6 al è disfredât a aiar e si cjate intun fabricât dongje dal reatôr.

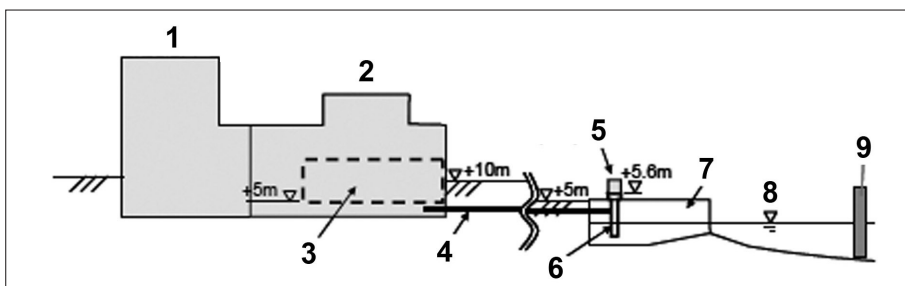


Figure 2. Sezion de centrâl di Fukushima Dai-ichi in corispondence de unitât 1: 1) fabricât dal reator; 2) fabricât des turbinis; 3) sale dai gjeneradôrs diesel di emergjence; 4) tubazion di prese de aghe di mâr; 5) motôr de pompe pe aghe di disfredament; 6) pompe pe aghe di disfredament; 7) fuesse pe prese de aghe di mâr; 8) superficie dal mâr; 9) barriere a mâr (alte 10 m).

Lis diviersis struturis de centrâl a son protetis dai tsunamis cun barrieris taieondis buinis di lavorâ cun ondis fin a 5,7 m sul nivel dal mâr (Figure 2), une siele basade su dâts storics e fats resints.

3. I reatôrs a aghe bulint BWR

3.1. *I BWR e il sisteme di contigniment Mark I.* I reatôrs di Fukushima a son basâts suntun projet de General Electric americane, svilupât di Toshiba e Hitachi. Il nusel dal reator al è tignût sot aghe e al davuelç doi compits fundamentâi:

- al fâs di moderadôr, ven a stâi al ralente i neutrons “veloçs” prodots tes fissions (velocitât cirche 20000 km/s) al stât di neutrons “termics” (velocitât mancûl di 2 km/s), une vore plui eficients tal provocâ fissions⁷;
- al davuelç une azion di disfredament dal reator: al assorbìs il calôr prodot de fission tal nusel e al prodûs il vapôr che al covente par alimentâ lis turbinis colegadis ai alternadôrs che a produsin la energjie eletriche.

I reatôrs a lavorin ae temperature di 286 °C e ae pression di 6930 kPa (~ 68 atm); te part alte dal reator il vapôr prodot al ven suîât prin di jessi fûr dal contignidôr a pression (*Reactor Pressure Vessel* – RPV) dilunc de linie di vapôr direte ae turbine; tal vessel e jentre la linie di rimant de aghe di alimentazion. Il vessel (un cilindri di acâl dal spessôr di cirche 15 cm, alt par solit 20 m e cuntun diametri di 6 m) al costituìs il prin conti-

gnidôr dal reatôr e al rive a sopuartâ pressions fint a 8240 kPa (~ 81,6 atm) a 300 °C. A bassis pressions l'idrogjen e altris gas che si vegnin a formâ a son sfogâts travièrs filtris di cjarvon di len che a assorbissin la gran part dai radionuclidis (se a 'nd è) liberâts des sbaris.

Tai BWR la part superiôr dai elements di combustibil e je tignude a muel intune misture bifase aghe-vapôr che e ridûs l'efiet di moderazion dai neutrons e la densitât di potence⁸; i BWR a son bogns di autoregolâsi, rivant a modificâ la potence cence agjî su lis sbaris di control ma aumentant o ridusint, cun pompis di ricicli, il flus de aghe, di mût di variâ il nivel de part dal combustibil che e je te aghe rispiet a chê tal vapôr e duncje la frecuece des reazions.

Tal sisteme di contigniment Mark I (unitâts 1-5) il vessel a pression RPV e i sistemis ausiliârs direts a son instalâts dentri di une struture primarie di contigniment (*Primary Containment Vessel* – PCV) che e je fate di une cjamare sute a forme di bulbi di ačâl (spessôr 30 mm) rinfuarcide di un strât di ciment armât e colegade travièrs di un sisteme di respîrs a une cjamare umide a forme toroidâl cuntune vascje di sbroc pal scaric dal vapôr tal câs di emergjencis o di pressions masse altis te cjamare sute (vascje di sopression des sorepressions); la aghe te vascje di sbroc (3000 m³ tes unitâts 2-5) e permet di assorbî calôr se al è un incident.

Il PCV al à la funzion di protezi il reatôr des interferencis esternis e di contignî la energjie tal câs di incidents cun pierdite de refrigerazion (*loss-of-coolant accident* – LOCA) e al è in stât di sopuartâ pressions fin a 500 kPa (~ 5 atm). In situazions normâls lis cjaminis sute e umide a son jempladis di azôt inert a pression pôc plui alte di chê de atmosfere e la vascje di sbroc e je a temperature ambient e e sopuarte pressions fin a 300 kPa. Une cierte quantitat di idrogjen si forme normalmentri par decjadiment radiolitic de aghe; sostancis recumbinantis dentri dal PCV a mantegnin minime la quantitat di idrogjen libar, e la atmosfere di azôt e rive a prevignî reazions cul ossigjen.

Une struture secondarie di contigniment in ciment armât e cuvierç la struture primarie plui i sistemis di disfredament di emergjence dal nusel e la vascje di immagazinament dai elements di combustibil; e je mantignude a une pression un pôc plui basse di chê atmosferiche par evitâ che a jessin fûr gas radioatîfs travièrs des porosîtâts dal ciment e no sopuarte pressions masse altis; il fabricât dal reatôr al à un altri plan dulà che al è

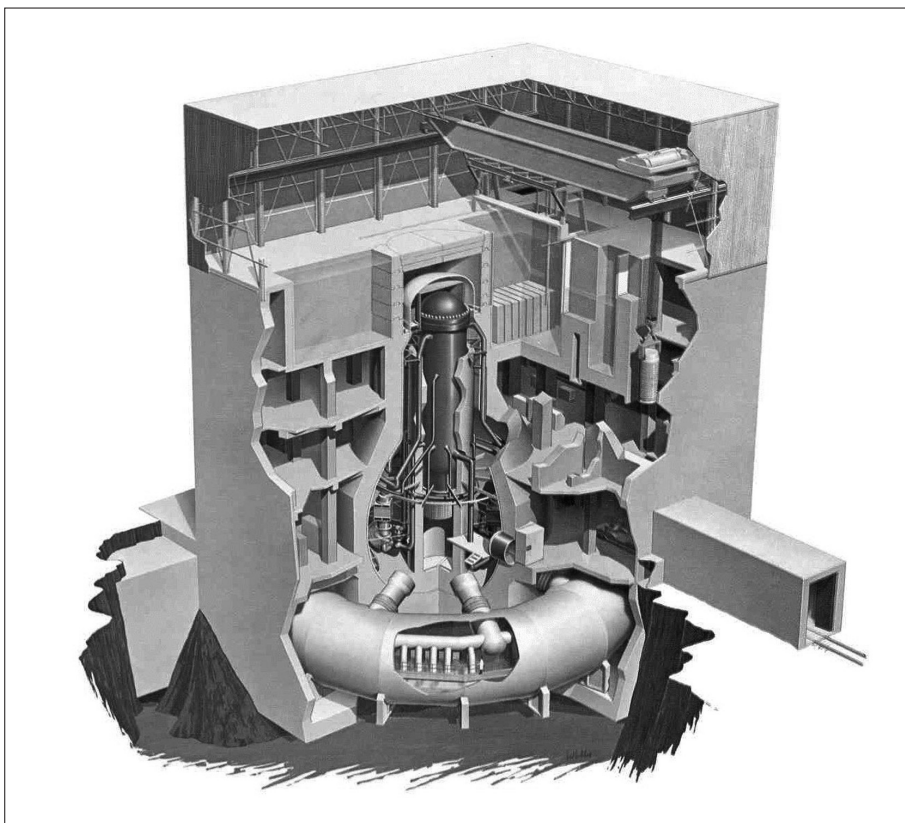


Figure 3. Scheme dai elements structurâi des unitâts 1-5 de centrâl di Fukushima.

l'implant par inserî e gjavâ il combustibil e al è protet di un normâl cuviert industriâl; par sigurece tal câs di esplosions di idrogjen il cuviert e i mûrs dal plan superiôr dal fabricât a son stâts pensâts come “sacrificabii”, vâl a di a puedin colâ par ridusi la onde di urt su lis struturis sot. La Figure 3 e mostre un scheme dal fabricât dai reatôrs 1-5 di Fukushima (la unitât 6 e à une unitât di contigniment Mark II plui avanzade).

3.2. I sistemis di disfredament dal nusel. In cundizions operativis normâls il sisteme di disfredament primari, cun potentis pompis a vapôr, al fâs jentrâ tal vessel aghe clipe di mût di tignî sot aghe il nusel compensant il vapôr suriscjaldât che al ven gjavât par fâ zirâ lis turbinis: un sisteme se-

condari al disfrede il vapôr che al jes des turbinis condensantlu te aghe che e torne dentri tal nusel; il circuit secundari al dopre tant che refrigerant aghe di mâr prelevade cun pompis eletrichis e il calôr residui dal condensadôr al ven butât fûr tal ocean, che al constituìs il poç termic dal implant (la centrâl no dopre tors di disfredament come altris centrâls termichis).

La refrigerazion dal nusel e à di là indevant ancje cul reatôr studât: ancje se no je produzion di energjie traviars di fissions, la radioativitât dal combustibil, dai prodots di fission e dal materiâl ativât dai neutrons e prodûs calôr e il reatôr al manten une potence residue, che tal moment che il reatôr si stude al rive di norme al 6% de potence di esercizi, par ridusìs tal zîr di cualchi ore ai valôrs minims de configurazion di “studament frêt” se la refrigerazion e continue regolarmente. In chestis cundizions il disfredament dal reatôr al è garantît di un sisteme specific di rimozion dal calôr residui (*Residual Heat Removal* – RHR), colegât aes pompis di ricicli, che al dopre un so scambiadôr di calôr cun dissipazion finâl tal mâr; ancje lis pompis di chest sisteme a van a elettricitât. Cul reatôr studât la linie di vapôr e va diretamentri tal condensadôr midiant di un by-pass, taiant fûr lis turbinis, e il calôr al finìs tal mâr.

Se invezit no si rive a gjavâi il calôr residui, il nusel si riscjalde, la aghe e evapore o e bol, e la pression e cres fint a superâ la resistance dal vessel, che al sclope. La evaporazion e puarte, cun di plui, ae diminuzion de cuvierture di aghe dai elements dal combustibil; a temperaduris di cirche 1200 °C il rivistiment in zirconi des sbaris si fressure e sore dai 1300 °C e partìs la reazion dal zirconi cul vapôr de aghe produsint ossit di zirconi e idrogjen, liberant altre energjie (5,8 MJ par kg di zirconi); a 1850 °C il zirconi si disfe e al reagìs cul ossit di urani produsint une fusion eutetice che e libare prodots di reazion radioatîfs: chei volatii (i gas nobii cripton e xen, in plui di iodi e cesi) si zontin al idrogjen gjenerât, invezit chei altris a colin tal fonts dal RPV. Lis tecnichis che par solit a prevenin il fûc (o la esplosion) dal idrogjen libar no son in stât di controlâ lis grandis quantitâts prodots dal zirconi tal câs di un LOCA grâf. Tal zîr di cualchi desene di oris dopo che il reatôr al è stât studât, almancul che no si proviodi a disfredâlu, al è facil che si rivi a temperaduris criticis e ai fenomens associâts aes altis temperaduris.

Se no si rive a disfredâ, la temperature dal combustibil e cres e fra i

2500 e i 2850 °C lis sbaris dal combustibil si disfin creant il “corium”, une misture licuide di combustibil, zirconi e açâl che e cole tal fonts dal vessel e in presince di aghe residue si indurîs crevantsi; viodût che l’açâl dal vessel si disfe a cirche 1500 °C e je la pussibilitât che il corium al pasi tes parêts dal vessel sbusantlu e danegjant il contignidôr primari⁹. Une fusion totâl dal nusel e je une vore plui probabile se un LOCA al sucêt cuant che il reatôr al funzione a plen che no cul reatôr studât.

Ancje il materiâl esaurît tes vascjis di immaginament al à di jessi disfredât par che no svapori la aghe di cuviertidure, cu la pussibilitât di reazioni dal zirconi cun liberazion di idrogjen, che in presince di ossigjen al pues cjapâ fûc e esplodi danegjant lis sbaris fint a creâ situazions di criticitât. Tal câs di une fuarte pierdite di aghe a altis temperaduris la reazion zirconi-vapôr e pues autosostignîsi brusant il rivistiment di zirconi, di mût che al cjape fûc dut l’element di combustibil.

Considerade la funzion cruciâl dal disfredament, i reatôrs a àn sistemis di sigurece ridondants par evitâ i pericui dal suriscjaldament dal nusel cun dut ce che i ven daûr: ogni unitât e à un *Emergency Core Isolation Cooling System* (ECICS), che al funzione cun modalitâts diferentis sedi a alte sedi a basse pression, par tirâ dentri tal vessel aghe de vascje di sbroc e di une vascje esterne; a alte pression al dopre turbinis a vapôr e cuant che la pression e je plui basse si coleghe al RHR.

La unitât 1 e à un condensadôr di isolament (IC) pal disfredament passîf dal nusel, bon di gjavâ calôr par 8 oris: al lavore par circolazion naturâl a gravitât di refrigerant travers di un scambiadôr di calôr a imersion logât intune grande vascje di aghe tal fabricât dal reatôr, propit par sore dal vessel, e al bute fûr il vapôr intun condensadôr esterni. Lis unitâts 2-5, invece, a àn un *Reactor Core Isolation Cooling* (RCIC) che al jentre in funzion in automatic tal câs di LOCA par proviodi di aghe il nusel (cence un circuit di rimozion dal calôr): al dopre une piçule turbine alimentade dal vapôr di decjadiment termic e al iniete aghe cjapantle di une cistierne esterne o de vascje di sbroc. Ducj chescj sistemis a domandin une certe potence eletriche par vierzi lis valvulis e controlâ lis operazioni, e in cualchi câs a doprin batariis eletrichis a corint continue. In plui, tai agns ’90 la TEPCO e à instalât un sistema di furnidure di aghe al vessel travers dal implant antifûc des unitâts, colegantsi al circuit dal RHR.

4. Il taramot e i siei efîets immediâts

4.1. *Il taramot e il tsunami.* Il taramot dai 11 di Març dal 2011 (14:46 ore locâl), cun epicentri tal mâr a 130 km de penisule di Ojika ae profunditât di 24 km, al à vût une durade di cuasi 3 minûts e une magnitudo di 9 MMS (energjie liberade in superficie $1,9 \pm 0,5 \times 10^{17}$ J, acelerazion 2933 Gal) cun scossis di assestament aes 15:06 (7,0 MMS), 15:15 (7,4 MMS) e 15:26 (7,2 MMS); a jerin stâts diviers precursôrs, il plui fuart (magnitudo 7,2 MMS) ai 9 di Març. Si previôt che il taramot al larà indevant par cualchi mê: dai 11 di Març ai 8 di Lui si son regjistradis 517 scossis di magnitudo parsore di 5 MMS, di chestis 85 parsore di 6 MMS e 5 parsore di 7 MMS. Il sisme al à provocât une serie di ondis tsunami enormis, che a son rivadis a une altece massime di 38,9 m a Aneyoshi (Miyako) e a àn alagât e distrut une aree di cirche 560 km², causant la gran part dai dams e dai muarts.

Te centrâl di Fukushima Dai-ichi il taramot al è rivât ae magnitudo di 7 MMS (acelerazions massimis: orizontâl 550 Gal e verticâl 302 Gal). Tal zîr di 2 s i sistemis automatics di sigurece antisismiche a àn studât ducj i reatôrs atîfs, fermant lis reazions di fissions cul inseriment totâl des sbaris di control; come previodût in chest câs, la linie vapôr e je stade dirotade in automatic al condensadôr, taiant fûr la turbine che, pes sôs dimensions, e rapresente un pont di debolece dal circuit primari in câs di taramot. La consequence principâl dal sisme e je stade la interuzion totâl de furnidure eletriche ae centrâl, par vie dai dams aes 6 liniis esternis e aes centrâls di comutazion internis, fasint jentrâ subit in funzion 12 gjeneradôrs diesel di emergjence (un al jere in riparazion).

Cundut che la intensitât dal taramot e à superât i limits di resistance di proget pes unitâts 2 (acelerazion 550 Gal cuintri di 438 Gal), 3 (acelerazion 507 Gal cuintri di 441 Gal) e 5 (acelerazion 548 Gal cuintri di 452 Gal), ducj i implants a àn continuât a lavorâ tal mentri e subit dopo dal taramot, sigurant lis trê funzions fundamentâls di sigurece: controlâ la reativitât, disfredâ il nusel e no dispierdi i materiâi radioatîfs.

La prime ondade di tsunami e je rivade ae centrâl aes 15:30, 44 minûts dopo dal taramot, cun ondis fin a 14-15 metris di altece che a àn superât di un biel toc la bariere a mâr, inagant dute la centrâl. Lis ondis e i rotams puartâts vie de aghe, plombant cun violence parsore de centrâl, a àn danegjât e in cualchi câs butât jù i fabricâts (tra di lôr la centrâl ele-

triche principâl), i sistemis di sieradure, lis cistiernis, lis stradis e i colegaments internis, cun inagaments fin a 5 m di altece, scjariant dapardut savalon, pantan, rudinaçs e rotams e copant dôs personis, plui une che e jere muarte cul taramot.

I dams plui grâfs a àn rivuardât lis funzions di sigurece de centrâl: il tsunami al à distrut i implants di prese de aghe dal mâr che a alimenta vin i sistemis di disfredament dai condensadôrs dai circuits principâi e dai implants ausiliaris, e in particolâr dai RHR; cun di plui, si son interotis lis conessions ae rêr idriche esterne e al poç finâl di calôr (il mâr), di mût che al è diventât impussibil scjamâ il calôr prodot; i fabricâts des turbinis a son lâts sot aghe e duncje no funzionavin i 10 gjeneradôrs ausiliaris e lis conessions eletrichis dai EDG a aiar des unitâts 2 e 4: al restave operatîf dome un EDG te unitât 6; ancje lis batariis des unitâts 1 e 2 a son finidis sot aghe e no podevin jessi dopradis; lis batariis a corint continue de unitât 3 si son salvadis garantint la lûs te sale di control e il funzionament di cualchi strument di misure e di control par cirche 30 oris, fin che no si son scjariadis ancje lôr e, mancjant la corint alternade, no si son podudis tornâ a cjariâ; cence corint eletriche ducj i fabricâts, e in particolâr lis salis di control, a son restâts tal scûr e no funzionavin gran part dai struments di misure¹⁰; in plui, stant che i struments a jerin analogjics (la centrâl e je dai agns '70), no si podeve scjariâ e elaborâ i dâts a distance pes ativitâts di diagnosi e riparazion; no funzionavin plui la distribuzion di aiar comprès e altris servizis; gran part dai machinaris, dai aparâts di sigurece, dai dosimetris e dai tocs di ricambi a son lâts pierdûts o nol è stât pussibil recuperâju; un altri probleme e jere la dificoltât des comunicazions internis (il centri di control des emergjencis al rivave a comunicâ cu lis scuadris al lavôr cuntun unic telefon par ogni sale di control) e esternis.

La devastazion de aree tor ator, cun dams enormis aes infrastruturis e aes viis di comunicazion, e i problemis a chei altris implants nucleârs plui dongje a àn rindût une vore problematiche la assistance esterne. In chestis cundizions, i tecnicos de centrâl si son cjatâts a frontâ une situazion cence precedents pe cuantitât e varietât dai problemis che, tal stes moment, a metevin in pericul la sigurece dai sîs reatôrs, des sîs vascjis di immagazinament des unitâts e di chê grande centrâl, in plui dal dipuesit dai contignidôrs di elements suts. Il numar di personis a disposizion tal

moment dal incident (130 operadôrs e 270 adets ae manutenzion) al jere dal dut insuficient a gjestî il control e il recupar des struturis in pericol.

In plui, gran part dal personâl al jere restat cence cjase, e in cualchi câs al veve pierdût familiârs tal disastri, e sul imprin al viveve cun grandis dificultâts e privazions in sistemazions di fortune. Une vore util, so-redut tai prins moments des operazions di emergjence, si è dimostrât il robust fabricât antisismic fat sù tal 2007, dopo dal taramot che al veve colpît la centrâl Kashiwazaki-Kariwa, protet ancje dal tsunami e indotât di sistemis di aerazion filtrants in stât di sigurâ une abitabilitât plene a plui di 2000 personis ancje in câs di emissions radioativis; il fabricât al faseve di centri di control des emergjencis e al è stât ancje doprât par dâ ricet al personâl impegnât tes operazions di intervent (comprendûts i tecnics esternis, i vigjii dal fûc e i militârs rivâts a dâ une man) tai moments critics. Une base logjistiche par preparâ il personâl di emergjence, cun abitazions, mensis, servizis e un centri sanitari e je stade metude in pîts ai 17 di Març tal vilaç J, un centri pal alenament di balon, a cirche 20 km de centrâl.

4.2. *La gjestion de emergjence.* La base legâl pe gjestion des emergjencis nucleârs in Gjapon al è l'*Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness* (ASMCNEP), che al specifiche lis responsabilitâts e ativitâts dai diviers atôrs in câs di emergjence, lis funzions e i obblis dai gjestôrs dai implants, des aministrazions locâls e di chês nazzionâls. Il sisteme di rispueste ae emergjence si divît in trê nivei: il guvier centrâl al nomine un centri diretîf gjenerâl di emergjence (cun a cjâf il prin ministri), al met in pîts [sot de direzion dal vice ministri anzian dal Ministeri de economie, cumierç e industrie (METI)] centris di emergjence locâi, al prepare plans e proceduris nazzionâls e al cjape decisions su lis cuestions e cuintrimisuris plui impuartantis. I guviers locâi (prefeturis) a àn responsabilitât ognidun sul lôr centri di emergjence locâl e a son responsabii dal monitoraç de situazion, des azions protetivis urgjentis e des cuintrimisuris tal lunc periodi, cjapant dentri tal procès ancje i sin-gui comuns. L'operadôr di une centrâl nucleâr al è responsabil de rispueste di emergjence sul puest e de notifiche dai events al guvier nazzionâl, aes prefeturis e ai comuns.

Tal câs di Fukushima, la devastazion dal teritori causade dal taramot e dal tsunami e à impedît la realizazion des structuris e proceduris previodudis dai protoçoi, e il centri nazonâl al à fat ançe funzions che a saressin stadis di competence dai centris locâi¹¹; in particolâr il Ministeri de istruzion, culture, sport, sience e tecnologjie (MEXT) si è ocupât des misurazions e analisis de radioativitât ambientâl.

Il rapuart dai esperts internazionai al à rilevât che il sisteme di reazion gjaponês pe sô complessitât strutturâl e organizative al compuarte un pericol di ritart tal cjapâ decisions urgjentis, ma che lis azions puartadis indevant a son stadis coretis e a àn permetût une rispueste eficiente te emergjence, ançe considerant la enormitât e la dificolât dai problemis di frontâ.

Su la fonde des provisions dal ASMCNEP (articul 10), aes 15:46 dai 11 di Març la direzion de centrâl e à dât notizie al guvier nazonâl e aes autoritâts locâls de emergjence dovude a “events operatîfs anormai”¹²; come prescrit, tal zîr di 60 minûts il METI al à istituît i centris di emergjence locâi e la prefeture di Fukushima e à ordenât la evacuazion de popolazion che si cjatave a une distance di 2 km de unitât 1 de centrâl, slargjade plui tart in chê di a 3 km. Intant il guvier al proclamave il stât di emergjence nucleâr e aes 19:03 al jentrave in plene funzion ançe il centri diretîf gjenerâl di emergjence. La di dopo, par vie dal aument di pression tal reatôr 1, il rai de zone di evacuazion al è stât puartât a 10 km, come previodût dai plans di emergjence, e, dopo de esplosion te unitât 2, al è stât slargjât a 20 km. Ai 15 di Març, dopo de esplosion te unitât 2, al è stât domandât ai abitants te zone tra i 20 e i 30 km di distance di restâ sierâts in cjase (disposizion ritirade ai 22 di Avrîl), sugjerint la evacuazion volontarie.

Intervents di socors esterni a son tacâts te gnot dai 11 di Març, dant prioritât al disfredament dai trê reatôrs a pene studâts e al ripristin de potence eletriche; i gjeneradôrs eletrics mobii a son rivâts 9 oris dopo dal tsunami, ançe se di potence plui basse di chei de centrâl, e a son tacâts i lavôrs par imbastî colegaments eletrics di emergjence tai implants, stant che no si saressin podûts doprâ i gjeneradôrs alagâts o danegjâts dal tsunami. Lis liniis eletrichis esternis a son stadis ripristinadis ai 20 di Març; lis unitâts 5 e 6 a son stadis colegadis ai 21 dal mê; i implants de unitât 4 la di dopo e la lûs aes salis di control e je rivade ai 22 (aes 22:45) te unitât 3, ai 24 (aes 11:30) te unitât 1, ai 26 (aes 16:46) te unitât 2 e ai 29 di Març (aes 11:50) te unitât 4.

Pal disfredament dai reatôrs e des vascjis di immagazinament, viodût che i sistemis internis no funzionavin plui, a son stadis dopradis autopompis, canons a aghe, autobetonieris, elicotars, utilizant aghe dal mâr; un prin ponton american cun aghe frescje al è rivât ai 22 di Març e ai 26 a 'nd è rivât un secont di 2280 m³; ai 26 e je jentrade in funzion une gno-ve condote che e partive di un lâc artificiâl a 10 km de centrâl, eliminant dal dût l'ûs di aghe di mâr. Li structuris danegjadis a son stadis netadis e ripristinadis, rinfuarcintlis par podê resisti a altris taramots; a son stadis fatis sù gnovis barrieris anti-tsunami, par meti al sigûr la centrâl di ondadis fin a 10 m.

5. La evoluzion dai reatôrs e des vascjis di immagazinament

5.1. Lis unitâts 1, 2 e 3. No jessint ancjemò pussibil un control complet e une misurazion detaiade di ducj i parametris impuartants pes unitâts interessadis, la ricostruzion dai acjadiments a cuatri mêis dal incident, basade in part su simulazions numerichis, no si pues considerâ definitive, se no pai aspiets fundamentâi. I reatôrs des trê unitâts a àn vût, ancje se cun timps e mûts diferents, une evoluzion similâr, tipiche (doprant un tiermin de ingegnerie dai sistemis) de “emergence progressive”: une se-quence di fats dulà che la pierdite di un component e ingjenere une cja-dene successive di emergjencis (Figure 4).

Aes 15:42, une ore dopo che si jerin studâts pe mancjance di potence elettriche, i nusei dai reatôrs a produsevin (pe radioativitât dai prodots di fission) ancjemò l'1,5% cirche de potence termiche nominâl: plui o man-cul 22 MW il reatôr 1 e 33 MW i reatôrs 2 e 3, une potence suficiente par fâ boli, tal ordin, 35 m³ e 52 m³ di aghe ogni ore, in assente di inter-vents esternis, e duncje in stât di dispierdi in pocjîs oris la aghe di cu-viertidure dal nusei. La pierdite di corint alternade e à impedît in dutis lis unitâts la jentrade in funzion dai sistemis di disfredament RHR e di chei di emergence ECICS tes unitâts 1 e 2.

Te unitât 1, tal moment che si è studât il reatôr, al è stât fat intervignî il condensadôr di isolament (IC) par acelerâ il disfredament; l'IC al jere l'unic sisteme a disposizion par disfredâ il nusei dopo dal tsunami, ma al è rivât a funzionâ dome cualchi ore; a chel pont e je stade prontade la furnidure di aghe cul sisteme antifûc, che e je tacade aes 5:46 dai 12 di Març cun autobots dai vigjii dal fûc.

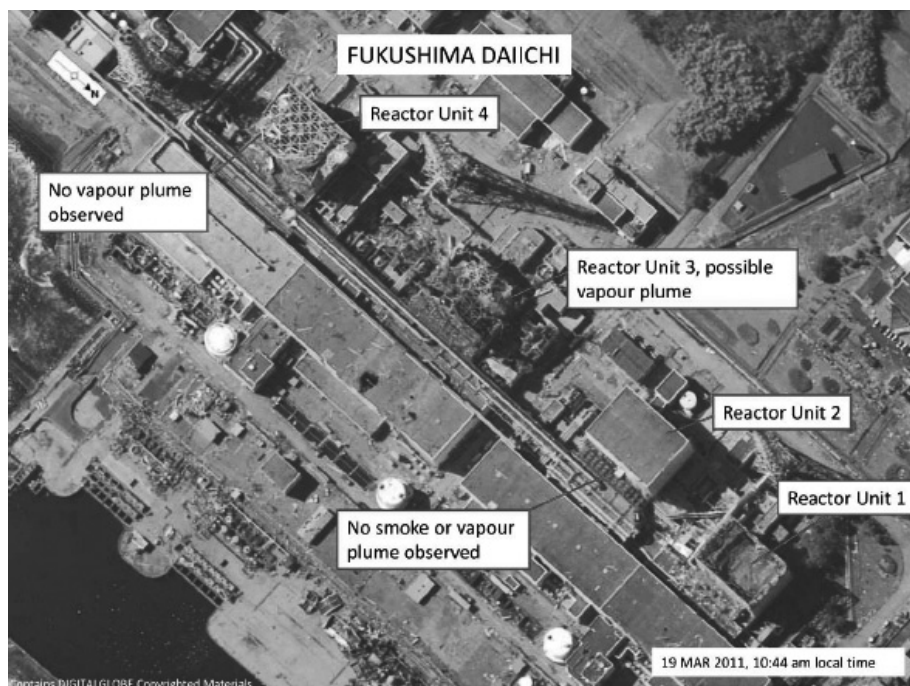


Figure 4. Imagin aeree des unitâts 1-4 de centrâl ai 19 di Març.

Une ricostruzion de evoluzion dal nusel fate a posteriôrs de TEPCO e de NISA su la fonde di simulazions computerizadis e à puartât a concludi che za dopo trê oris dal moment che si jere studât il reatôr la aghe di cuviertidure si jere sbassade fin a tocjâ la part alte dai elements; dopo altris 90 minûts dut il nusel al jere restât scuvier, danegjant lis sbaris e causant la fusion de part centrâl dal nusel dopo 5 oris dal studament; dopo altris 10 oris dut il nusel al jere disfât e il combustibil colât tal fonts dal vessel, che in ogni câs al someave ancjemò intat.

Intant la reazion dal zirconi cu la aghe e veve prodot une cuantitât di idrojen enorme, che si jere messedade cul vapôr liberât de ebolizion de aghe di cuviertidure e cun prodots di reazion radioatîfs volatii (soredut jodi, xen, cripton e cesi) liberâts des sbaris danegjadis e disfatis. Chescj gas a alte pression a son jessûts dal vessel e finîts inte vascje di sopresion, dulà che a àn aumentât la pression te strutture di contigniment primari fin a 900 kPa tal RPV e 850 kPa tal PCV; a chel pont si è scugnût

butâ fûr il vapôr par ridusi la pression ai limits di sigurece, doprant la condote a pueste; mancjant potence eletriche si è doprât une strumentazion di fortune ma la operazion (aes 14:30 dai 12 di Març) e à vût un efiet une vore limitât e gran part dal gas e je finide tal ultin plan dal fabricât, dulà che l'idrojen al à fat reazion cul aiar provocant une esplosion (15:36).

La esplosion e à fat saltâ il cuviert dal fabricât de unitât 1, cun dams grâfs al plan servizis, mandant ator altris rotams e liberant materiâl radioatîf par dut il fabricât, te centrâl (in particolâr tes salis di control des unitâts 1-4, dulà che i operadôrs a scugnivin alternâsi dispès) e te atmosfere.

Intant tor des 14:30 dai 12 di Març e jere finide la aghe frescje des autobots (80 t), cussì a partî di chê sere si à tacât a inietâ tal vessel aghe di mâr borade (par ridusi il pericol di reazions a cjadene) doprant il circuit antifûc e lis pompis mobilis dai vigjii dal fûc; cheste forme di disfredament e je restade la uniche a disposizion fin ai 23 di Març cuant che si à rivât a tornâ a meti in funzion la normâl linie di furnidure de aghe, alimentade dai 25 cun aghe frescje (cun zontis periodichis di bôr). Ai 24 di Març il vessel al è rivât ae temperature massime di 400 °C, superant il limit di proget di 302 °C, e si à scugnût aumentâ il flus di aghe; di in chê volte la temperature dal vessel e à tacât a sbassâsi e dal mêis di Avrîl e je restade sot dai 120 °C; ae fin di Lui la temperature e jere di 105 °C e la pression e jere chê atmosferiche. Cun di plui, par prevignî esplosions di idrojen, dai prins di Avrîl si sta inietant azôt tal vessel. Ai 26 di Avrîl a son tacadis lis ispezions dal fabricât de unitât, davueltis in chei prins moments di robots, fin che ai 20 di Mai al è stât un prin sorelûc di tecnics par misurâ lis cundizions dal reatôr. Tal fabricât de unitât al è stât instalât un sisteme di filtrazion dal aiar par ridusi la emission radioactive; il plan tiere dal fabricât al è ancjemò alagât cun 4 m di aghe contaminate.

Te unitât 2 la pierdite di potence eletriche causade dal tsunami e à fermât l'ECICS; si che duncje si à scugnût inlineâ manualmentri il sisteme di valvulis par meti in azion il sisteme RCIC che, come che si à dit parsore, pe pompe al dopre une turbine azionade dal vapôr che al salte fûr dal vessel e si scjarie te vascje di sbroc. Il RCIC al à continuât a funzionâ rivant a mantignî il nusel sot de aghe fin aes 13:25 dai 14 di Març, cuant che la aghe de vascje di sopression e à tacât a boli.

A chel pont la pierdite dal disfredament e à provocât tal zîr di pôc

timp la ebolizion tal vessel e si stime che 76 oris dopo che il reatôr si jere studât i elements di combustibil a son restâts cence aghe; dopo ancjemò une altre ventine di oris part dal nusel si è disfate liberant idrojen e radionuclidis di fission; ancje il vessel al somee danegjât.

Plui o mancul sîs oris dopo che il RCIC si jere fermât, e fin ai 26 di Març, si à proviodût a furnî aghe di mâr doprant une autopompe dai vigji dal fûc¹³ e scjariant il vapôr te vascje di sbroc. Chest procediment di disfredament, mancjant un poç termic esterni, al à puartât a un aument continui de temperaturade e de pression te struture primarie di contigniment PCV fin a 650 kPa; cun grandis dificultâts si à rivât a sfogâ fûr il gas ai 13 e ai 15 di Març e a vierzi un panel sul tet par sfogâ il gas e evitâ esplosions di idrojen come che al jere sucedût te unitât 1.

Aes 6:14 dai 15 di Març si à vude une rotture de vascje di sbroc cun tune brusce decompression dal PCV, probabilmentri causade di une esplosion di idrojen, cun emission di une grande cuantitât di aghe une vore radioative e une fuarte contaminazion atmosferiche. Dai 17 di Març la pression dal vessel e je chê atmosferiche e chê de cjamare sute di cirche 200 kPa; ae fin di Lui la temperaturade dal vessel si manten a 120 °C. Dai 26 di Març la furnidure di refrigerant si fâs in mût similâr ae unitât 1.

Ai 2 di Avrîl si à scuviert che il poç dai fii eletrics des pompis di prese de aghe di mâr al veve une crevadure di 20 cm, e che di li e saltave fûr aghe une vore radioative (1000 mSv/h) che e rivave dal fabricât de unitât; il dam al è stât comedât ai 6 di Avrîl.

Ancje te unitât 3 il sisteme RCIC, jentrât in funzion tal moment dal tsunami, si è fermât aes 11:36 dai 12 di Març; dopo une ore al è jentrât in funzion ancje l'ECICS, controlât di batariis a corint continue, ma si è fermât aes 5:13 de dì dopo; dome 7 oris plui tart si è rivâts a prontâ un sisteme alternatîf di disfredament (cun aghe di mâr borade traviars dal sisteme antifûc) dopo vê sfogât il vapôr a alte pression doprant batariis di machine e strumentazion di emergjence. Tal fratimp, a tacâ des 9 di buinore dai 13 di Març (te ricostruzion de NISA), il nusel al à scomençât a danegjâsi come che al jere sucedût tes unitâts 1 e 2, ancje se i calcui a indichin che la fusion e je stade dome parziâl cun dams plui limitâts.

La buinore dai 14 di Març si è cirût, une seconde volte, di sfogâ fûr il gas par ridusi la pression, ma la operazion e à vût risultâts dome che parziâi: l'idrojen si è ingrumât in gran cuantitât tal plan di servizi, causant

une esplosion une vore violente aes 11:01 che e à fat saltâ buine part dal tet e dai mûrs e butât jù la part alte dal fabricât, mandant ator un grum di rotams e rudinaçs une vore radioatîfs.

Dai 25 di Març, dopo une iniezion di 4495 t di aghe di mâr, ancje pe unitât 3 si è passâts a aghe frescje come pe unitât 1; cul jutori di robots si à proviodût a netâ il fabricât dal reatôr (1 Lui) e a cjàpâ misuris dosimetrichis (2 Lui); ai 19 di Lui al è stât instalât un cuviert temporani tal fabricât des turbinis, che al veve vût dams. Ae fin di Lui la temperature dal vessel si manten a 108 °C ae pression atmosferiche.

5.2. Lis unitâts 4, 5 e 6. Il reatôr de unitât 4 nol veve combustibil, duncje la uniche struture a vê problemis di disfredament e je stade la vascje di immagazinament, come che o viodarìn plui indevant. Ai 15 di Març aes 6:00 si à vût une esplosion violente al cuart plan dal fabricât de unitât cun distruzion dal cuviert e dai mûrs laterâi, seguite di un fûc al tierç plan (aes 9:38), che si è studât di bessôl. La esplosion e à interessât ancje il fabricât de unitât 3, aumentant i dams aes sôs sorestruturis.

Ancje cheste esplosion si considere causade dal idrogjen; intun prin moment si pensave che il gas al fos stât liberât te vascje di immagazinament par vie che i elements a jerin restâts cence aghe e il zirconi al veve fat reazion cul vapôr acui. La analisi dai nuclidis presints in champions di aghe prelevade de vascje e lis cundizions de vascje stesste a escludin però cheste ipotesî; si pense, pluitost, che la esplosion e sedi stade une consequence dal tentatîf di sfogâ la pression de unitât 3 fat la dì prime; stant che lis liniis di respîr des dôs unitâts a àn un toc in comun al è probabil che part dal idrogjen ingrumât al sedi finît tal ultin plan dal fabricât de unitât 4.

I reatôrs 5 e 6 pe lôr posizion plui alte a àn patît mancûl dams cul tsunami. Ancje in chest câs, però, i locâi des turbinis a son finîts sot aghe cu la pierdite dai 3 gjeneradôrs di emergjence e des conessions eletrichis logadis tai semintierâts; si son interots la prese di aghe marine e il scaric in mâr dal calôr, invezit si è salvât l'EDG de unitât 6 disfredât a aiar. Cu la interuzion dal sisteme di disfredament RHR, che nol jere plui colegât al mâr, la temperature tai doi reatôrs e je cressude tal zîr di poc timp rivant fintremai a 128 °C (unitât 5) e 100 °C (unitât 6) e la pression e je rivade a 8 MPa te unitât 5. Cundut achel, doprant l'EDG de unitât 6 si à rivât a salvâ lis funzions essenziâls di ducj e doi i reatôrs e, dai 13 di Març, a

controlâ pression e temperature pompant aghe di un condensadôr traversiers di un circuit di sigurece e scjariantle te vascje di sbroc.

Ai 19 di Març al è stât realizât un circuit alternatîf di disfredament dal RHR (doprant aghe di mâr e pompis temporaniis) ripuartant ai 20 di Març ducj e doi i reatôrs te cundizion di “studament frêt”; lis unitâts a ricevin potence eletriche esterne dai 22 di Març (dai 21 la unitât 5) e cul mês di Avrîl si à scomençât a liberâ de aghe i fabricâts aluvionâts, traspuartantle in ci-stiernis temporaniis, e a ripristinâ dutis lis funzions operativis.

5.3. Lis vascjis di immagazinament. Ae pierdite di corint, si son fermadis ancje lis pompis dai circuits di disfredament des vascjis di immagazinament, no jessint colegadis a un EDG; cun operazions manuâls sul puest si varès podût meti in vore altris sistemis di disfredament, in particolâr il RHR, alimentâts di EDG, ma prime che si podès fâlu al è rivât il tsunami e i EDG des unitâts 1-5 a son finîts sot aghe. L’unic EDG ancjemò in funzion, chel de unitât 6, al è stât doprât in maniere saltuarie pal disfredament sfuarçât des vascjis des unitâts 5 e 6.

La grande cuviertidure di aghe (ancje se potenzialmentri ridusude in cualchi unitât par vie di sviersaments dovûts al taramot¹⁴) e la potence termiche avonde limitade a concedevin diviers dîs di sigurece prime che la aghe e tacàs a boli, ridusisi e infin scuvierzi la part alte dai elements, e partant no son coventadis azions imediadis; ai 14 di Març la temperadure de vascje de unitât 4 e jere di 84 °C e chê centrâl di 57 °C.

Lis esplosions che a àn distrut i cuvierts des unitâts 1, 3 e 4 a àn dât la pussibilitât di acedi aes vascjis di immagazinament par iniezioni periodichis di aghe (tal imprin aghe di mâr) cun elicotars, canons di aghe e autopompis (dai 17 di Març te unitât 3); dai 22 di Març (pe unitât 4) e je jentrade in funzion une autobetoniere indotade di un braç di 58 m, che e à permetût operazions plui precis tai fabricâts danegjâts (dai 27 di Març pe unitât 3 e dai 31 dal mês pe unitât 1). Pe unitât 2 (dai 20 di Març) a son stadis dopradis lis tubazioni esistentis; plui indevant a son stâts realizâts circuits alternatîfs gnûfs cun scambiadôrs di calôr dongje dai fabricâts pes unitâts 2, 3 e 4 e si è daûr a lavorâ a une soluzion similâr ancje pe unitât 1. La vascje de unitât di immagazinament centrâl e je stade jemplade ai 21 di Març e i sistemis normâi di disfredament a son stâts ripristinâts trê dîs plui indevant.

Dal mês di Lui, dutis lis vascjis a àn une cuviertidure plene e temperaturis tra 30 e 40 °C; osservazions fotografichis a mostrin che lis cundizions dai elements a son buinis, cun dams limitâts. A son stadis rinfuarcidîs lis struturis di sostegn de vascje (pês pluî di 2000 t) de unitât 4, dulà che dut il fabricât al à patît dams te esplosion.

6. La contaminazion radioactive. I pluî grancj problemis sanitaris e sociâi dai incidents nucleârs a son causâts des emissions radioativis tal ambient tor ator. L'impât biologjic des radiazions jonizantis al è dovût al trasferiment di energjie ai atoms e aes moleculis des celulis dai organisms, che a 'nt puedin vignî danegjadis.

I efîets a dosis altis¹⁵ a puedin jessi imediâts o palesâsi tal timp. I disturps si manifestin subit cuntune dose efficace di pluî di 300 mSv; une dose di 1 Sv su dut il cuarp e cause une patologjie grave (sindrome acude di radiazions) che parsore dai 3 Sv e à il 50% di pussibilitâts di jessi mortâl dentri di 30 dîs se no je tratade; parsore dai 8 Sv si à muart sigure. Efîets ritardâts di une dose di 200-300 mSv o pluî a puedin jessi la formazion di cataratis tai voi, leucemie o tumôrs in diviers orghins, mê e ancje agns dopo de esposizion. Une dose pluî piçule no à efîets deterministics, ma a puedin aumentâ, in maniere stocastiche, lis probabilitâts di inmalâsi di ciertis patologjiis tai agns.

La radiazion naturâl tal Gjapon (come ancje in Europe) e cambie di puest in puest lant di 2 mSv fin a 4 mSv ad an (in ciertis zonis tal mont e pues lâ parsore dai 100 mSv/y). I limits di dose fissâts tal Gjapon pal personâl des centrâls al è di 100 mSv in 5 agns, cuntun massim di 50 mSv ad an e 5 mSv in trê mê e pes feminis; pai operadôrs impegnâts in operations di emergjence la dose totâl (interne e esterne) individuâl, fissade tal imprin a 100 mSv, e je stade puartade ai 17 di Març de NISA a 250 mSv (par chescj intervents il limit de *International Commission on Radiological Protection* al è di 500 mSv).

In cundizions di esercizi normâl dai reatôrs, i neutrons a produsin te aghe dal primari, par cature di ossigjen, il radionuclide azôt-16, che si disative tal zîr di pôc timp (timp di smiezament 7 s) cun emission gamma di alte energjie¹⁶; dai elements di combustibil si puedin liberâ ancje gas nobii e il volatil jodi-131, sostancis che a vegnin filtradis tes emissions di gas e vapôrs.

Tes sbaris di combustibil a son une vore di radionuclidis (dai isotops dal cripton a chei dal plutoni) e tal incident di Fukushima une part di lôr e je stade liberade dai reatôrs danegjâts lant a dispierdisi tal aiar e te aghe; i principâi radionuclidis emetûts tal incident a son il jodi-131 e il cesi-137. Il jodi-131 al è assorbît facilmentri dal cuarp e si concentre te tiroide; stant che al decjât in pôc timp (timp di smiezament 8 dîs) intal xen-131, che al è inerte, al domande protezion tes fasis iniziâls de emission e tal zîr di trê mêis nol da plui nissun probleme.

Il cesi-137 al è un fuart produtôr di rais gamma cuntun timp di smiezament di 30 agns, duncje al contamine a lunc il teren dulà che al cole; al è solubil e al pues jessi assorbît dal organisim, ma no si concentre intun orghin particolâr e tal cuarp si smieze in 70 dîs; par une valutazion complessive de emission radioative si convertîs la radioativitât dal cesi in jodi-ecuivalent, moltiplicantele par un fatôr 40. Un altri impuartant radionuclide emetût tal incident al è il cesi-134, che al à un timp di smiezament di 2 agns.

6.1. Emissions atmosferichis. Il prin segnâl di emission radioative si lu à vût ai 12 di Març dopo de esplosion di idrogjen te unitât 1, cuant che pe prime volte si à cjatât la presince di jodi e cesi dongje dal implant, segnâl che il combustibil al veve vût dams. Lis emissions di jodi-131, cesi-137 e cesi-134 a son continuadis tai dîs seguitîfs, soredut dopo des esplosions te unitât 3 e dal danegjament de vascje di sopression de unitât 2; grandis quantitâts di jodi-131 e xen-133 a son ladis fûr dai respîrs, ma la gran part dal cesi-137 (plui dal 90%) e dal cesi-134 e je jessude de unitât 2 dopo dai 15 di Març.

Al va ricuardât che la gran part dai struments di misure di radioativitât te centrâl e in dute la prefeture di Fukushima e je lade distrute cul tsunami, e duncje al è difîcil ricostruî la dispersion radioative tai prins dîs dopo dal incident. Dai 15 di Març il MEXT al à vût la responsabilitât dal monitoraç ambientâl, cun struments gnûfs e la colaborazion de IAEA e dal Dipartiment de energjie american, e di in chês volte al controle la radioativitât tal teren, tal aiar e in mâr, te aghe di bevi e te vegetazion¹⁷.

Lis misuris ripuartadis de IAEA a mostrin che i nivei di radiazion te atmosfere a àn vût trê pics dai 12 di Març, cuntune emission une vore fuarte ai 15 di chel mêis, ma si son stabilizâts dai 16 di Març a nivei un

Tabele 2. Concentrazions (in Bq/m³) di radionuclidis in campions cjolts ai 26 di Març dongje des 4 unitâts danegjadis di Fukushima.

Nuclidis	Unitât 1	Unitât 2	Unitât 3	Unitât 4
Jodi-131	$1,5 \times 10^5$	$1,3 \times 10^7$	$3,2 \times 10^5$	$3,6 \times 10^2$
Cesi-134	$1,2 \times 10^5$	$2,3 \times 10^5$	$5,5 \times 10^4$	$3,1 \times 10^1$
Cesi-136	$1,1 \times 10^4$	$2,5 \times 10^5$	$6,5 \times 10^3$	$3,7 \times 10^0$
Cesi-137	$1,3 \times 10^5$	$2,3 \times 10^6$	$5,6 \times 10^4$	$3,2 \times 10^1$

Tabele 3. Dosis orariis misuradis te centrâl di Fukushima de NISA.

Date	Dose orarie mSv/h	Date	Dose orarie mSv/h
11 Març	0,05	21 Març	2,0
14 Març	12	24 Març	0,2
15 Març	400	4 Avrîl	0,12
16 Març	3,4	17 Avrîl	0,1
20 Març	3	metât di Lui	$1,4 \times 10^{-4}$

Tabele 4. Stime de radiazion emetude (in Bq) de centrâl di Fukushima e confront cun chê emetude a Chernobyl.

	Stime NISA (12 Avrîl)	Stime NSC (5 Avrîl)	Stime NISA (Jugn)	Chernobyl
Jodi-131	$1,3 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{17}$	$1,6 \times 10^{17}$	$1,8 \times 10^{18}$
Cesi-137	$6,1 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{16}$	$1,5 \times 10^{16}$	$8,5 \times 10^{16}$
Cesi Jodi-ecivalent	$2,4 \times 10^{17}$	$4,8 \times 10^{17}$	$6,1 \times 10^{17}$	$3,4 \times 10^{18}$
Totâl Jodi-ecivalent	$3,7 \times 10^{17}$	$6,3 \times 10^{17}$	$7,7 \times 10^{17}$	$5,2 \times 10^{18}$

grum pluî alts dal normâl ma avonde bas di permeti lis operazions dal personâl; dal mês di Avrîl lis dosis si son sbassadis fint a rivâ a metât di Lui a cirche 1,7 mSv/y te zone ator de centrâl; la emission totâl ai 5 di Avrîl e jere stimade in 154×10^{12} Bq/d, par sbassâsi a 24×10^{12} Bq/d ai 26 di Avrîl e di un altri fatôr mil (a 4×10^9 Bq/d) a metât di Lui; la Tabele 2 e presente lis concentrazions di radionuclidis in campions cjapâts ai 26 di Març dongje des 4 unitâts e la Tabele 3 e ripuarte misuris de NISA in cierts ponts de centrâl.

Tignint cont di chescj dâts e des simulazions numerichis de evoluzion dai reatôrs, la NISA e la NSC a àn produsût stimis des emissions di radiazion di jodi-131 e cesi-137 (Tabele 4), radiazion che e risulte jessi cir-

che il 0,16% dal totâl presint tai reatôrs tal moment che si son studâts (cirche 81×10^{18} Bq di jodi-131); daûr des ricostruzioni, la unitât 1 e à mandât fûr il dopli di jodi-131 rispiet ae unitât 3 e la unitât 2 dîs voltis chel de unitât 1. La cuantitât di radiazion individuade e à puartât, ai 12 di Avrîl, ae classificazion dal incident di bande de NISA al massim grât (7) de scjale INES¹⁸, che prime al jere stât classificât dome l'incident di Chernobyl, che al veve vût une emission cirche 8 voltis superiôr. Lis stîmis atuâls des emissions radioativis a son ancjemò preliminârs, jessint stade valutade dome la emission di jodi-131 e cesi-137 e mancjant une ricostruzione precise de evoluzion dai singui reatôrs.

6.2. Contaminazion ambientâl. La gran part de contaminazion radioative si slargje de centrâl in direzion nord-ovest, a seconde di indulà che al tirave l'aiar tal moment dal incident, interessant in mût significatîf e disomogeni une zone di plui o mancûl 1000 km² (Figuris 5-6).

Ai 4 Avrîl te citât di Fukushima il nivel di radiazion al jere di 0,06 mSv/d, 60 voltis il valôr normâl, ma cence pericui pe salût; controî fats ai 13 di Avrîl fûr de zone di 20 km de centrâl a àn cjetât un pont "cjalt" tal paisut di Iitate cun dosis fintremai di 0,266 mSv/d, ma pal rest la radiazion e jere inferiôr di un fatôr 10; ae fin di Lui il massim nivel di radioativitât te fasce di 30 km ator de centrâl al jere di 0,84 mSv/d, misurât a Namie a 24 km de centrâl.

Il guvier a metât Avrîl al à fissât un limit di sigurece pe popolazion al viert di 3,8 µSv/h (0,09 mSv/d) e al à ordenât la evacuazion dai teritoris dulà che si previôt, tai prossims doi agns, une dose anuâl di 20 mSv e plui: teritoris che a cjapin dentri cirche metât de zone dentri di 20 km de centrâl e localitâts fintremai a 40 km in direzion nord-ovest. In dut a son stadis evacuadis sù par jù 100.000 personis, che a podaran tornâ tes lôr cjasis dome dopo che si saran stabilizâts i reatôrs danegjâts e bonificât il teritori, bonifiche che il guvier al intint puartâ insom dentri de primevere dal 2012.

Naturalmentri dut il Gjapon al è stât cjapât dentri te ricjadude radioative, cun dosis a man a man plui piçulis cu la distance, e misurazions di radioativitât a vegnin fatis di un continui. In dut l'emisferi setentrionâl a son stâts cjetâts jodi e cesi radioatîf in relacion aes emissions de centrâl; lis concentrazions massimis in Europe a son stadis osservadis ai 4-5 di

Avrîl; tal laboratori ambientâl di Munic de IAEA si son misurâts in chei dîs $350 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ di jodi-131, $40 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ di cesi-137 e $30 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ di cesi-134, vatôrs tal ordin 120, 2000 e 700 voltis plui bas di chei misurâts dopo Chernobyl. Il Comitât sientific dal ONU sui efîets des radiazions atomichis (UNSCEAR) al à inviât un studi di 12 mêis su lis emissions radioativis te atmosfere e in mâr e su lis dosis ricevudis de popolazion e dai lavoradôrs.

Par impedî che l'air e la ploie a puedin dispierdi il materiâl radioatîf depositât, la TEPCO e à cuviert 40 etars de centrâl cuntune resine polimeriche che e bloche il polvar, smiezant in cheste maniere la radioativitât dal teren; in plui a son stâts puartâts vie i rotams radioatîfs sparniçâs ator (cun dosis di $30\text{--}40 \text{ mSv/h}$ a 1000 mSv/h) doprant mieçs controlâts a distance e jemplant uns 500 containers. Par fermâ lis emissions in atmosfere de unitât 1 si è daûr a tirâ sù une struture che e siere tor ator il fabricât ($42 \times 47 \text{ m}^2$ di base e alte 54 m) in stât di resisti ai events atmosferics (neveadis fintremai a 30 cm e air fin a 90 km/h); la struture e je indotade di sistemis di misure e control, une condote di aghe e sistemis di ventilazion filtrants par $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Struturis similârs a son previodudis par chês altris 3 unitâts danegjadis; lis unitâts 1-4 a vignaran dismetudis par simpri¹⁹, intant che une consultazion populâr e deciderà se i reatôrs 5 e 6 a varan di tornâ a funzionâ.

Al va osservât che a man a man che si controlin i fabricâts si scuvierzin ponts particolârs cun concentrazions di radioativitât une vore altis, che a vegnin isolâts o bonificâts a seconde dal câs specific.

6.3. Gjestion de aghe contaminade. Il probleme principâl pe centrâl tancant de tierce setemane dal taramot al è stât chel di eliminâ la aghe contaminade che si cjatave tai fabricâts dai reatôrs e des turbînis, racuelte tai condensadôrs e tes fuessis e condots dai fîi e des tubazions, cun pierditis in mâr di aghe radioactive. Ae fin di Març ducj i volums a disposizion tes unitâts 1-4 (in pratiche i condensadôrs principâi e lis cistiernis di condensazion) a jerin colms di aghe contaminade pompade dai fabricâts des unitâts.

Come che o vin dit parsore, tra il 1 e i 6 di Avrîl de unitât 2 a son finîts tal mâr 520 m^3 di aghe cun $4700 \times 10^{12} \text{ Bq}$ di ativitât; ai 10-11 di Mai altris 250 m^3 di aghe cun $20 \times 10^{12} \text{ Bq}$ di ativitât a son stâts scjamâts de

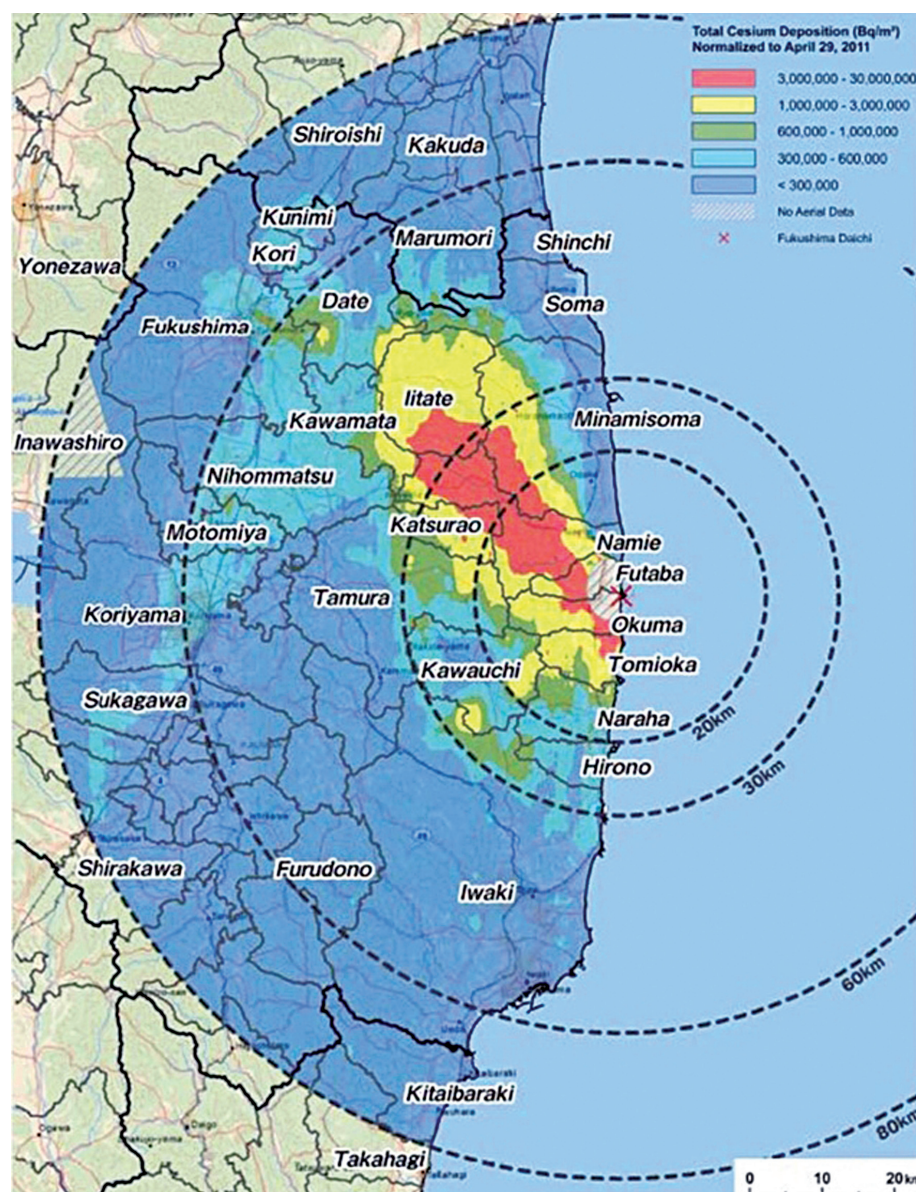


Figure 5. Nivei de contaminazion di cesi-137 ae fin di Avrîl misurâts in 42 rilêfs cun avions e elicotars te zone ator de centrâl.

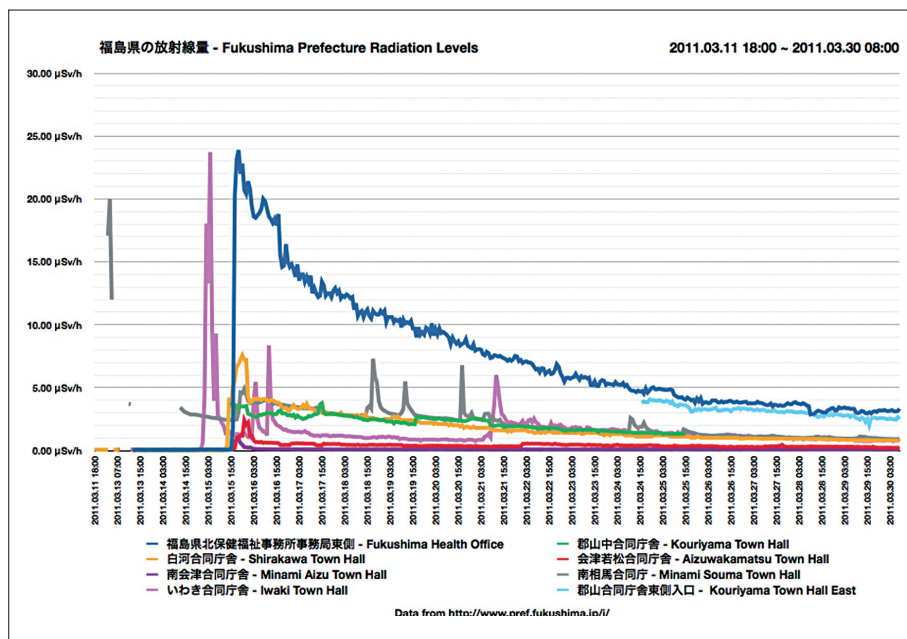


Figure 6. Andament dai nivei di radiazion te prefeture di Fukushima tal mê di Març dal 2011.

unitât 3 tal puart de centrâl. Par podê intervignî in cundizions di sigurece te unitât 2 al coventave liberâ il fabricât e il locâl des turbinis di cheste aghe une vore contaminate (fintremai 3×10^{12} Bq/m³ di jodi-131 e 13×10^{12} Bq/m³ di cesi-137), e a chest pro il guvier gjaponês al à dât il permès di scjamâ tal mâr tra i 4 e i 10 di Avrîl²⁰ cirche 10.400 m³ di aghe cun radioativitât lizere ($0,15 \times 10^{12}$ Bq) dal implant centrâl di decontaminazion, par fâ puest a chê plui contaminate.

Ai 21 di Mai a jerin stâts trasferîts 8.000 m³ di aghe de unitât 2 al implant di tratament; in chê di al è rivât ae centrâl un ponton-cistierne cun tune capacitât di 10.000 m³ tant che contignidôr temporani pe aghe di purificâ. Ai 12 di Lui a son ancjemò sù par jù 100.000 m³ di aghe che a spietin di jessi tratâts (16.980, 25.900, 30.600 e 23.000 m³ tes 4 unitâts, tal ordin), par une ativitât totâl di plui o mancul 750.000×10^{12} Bq, e 21.000 m³ a son tignûts te centrâl di decontaminazion.

Dal mê di Jugn al funzione un gnûf implant di purificazion de aghe contaminate, bon di tratâ 1200 m³ di aghe ogni dì; la prime fase de la-

vorazion e viôt la rimozion dai vuelis, la seconde l'assorbiment di cesi su zeolite, la tierce la precipitazion di altris impuritâts cun varis reagjents; a chel pont si procêt ae desalinizazion (par osmosi invierse) par produci aghe frescje di riciclâ tant che refrigerant dai reatôrs (84 m³/d pes unitâts 1 e 2 e 216 m³/d pe unitât 3). Fin ai 16 di Avost a son stâts tratâts 49.200 m³ di aghe, di chescj 16.900 riciclàts tant che refrigerant. Simpri de metât dal mêis di Jugn si è lâts indevant a depurâ dal cesi la aghe dal puart a un ritmi di 30 m³/h, e a son stâts instalâts 109 paneli di ciment par impedî sviersaments di aghe contaminate in mâr.

La contaminazion radioative marine, in plui dai sviersaments deliberâts e accidentâi, e je dovude ae ricjadude de radiazion atmosferiche e al traspuart di materiâl radioatîf par vie di events atmosferics; pal so timp di smiezament une vore curt, il jodi-131 nol è in pratiche plui presint, invece il cesi si sta slargjant bande est puartât de curint Kuroshio; la grande masse dal Pacific e dispierdarà in curt chest materiâl; misurazions in mâr a 30 km de cueste a mostrin une diminuzion rapide de radioativitât fintremai a nivei une vore bas a tacâ dal mêis di Avrîl. Tal mêis di Lui e je scomençade une indagjin internazionâl de contaminazion radioative dal ambient marin dongje dal implant, che e larà indevant par cuatri agns e che e sarà davuelte de IAEA insieme cui guviers di Australie, Coree dal Sud e Indonesie.

6.4. *Esposizion aes radiazions*. Dut il personâl che al à lavorât te centrâl dai 11 di Març (plui o mancûl 2000 personis impegnadis ogni dì, 7800 personis in dut fin ai 31 di Lui) al è stât tignût sot control par misurâ la esposizion ae radioativitât, calcolant sedi la dose esterne che chês interne, cun contadôrs par dut il cuarp: la esposizion medie des 7800 personis e je stade di 7,7 mSv, ma 103 lavoradôrs a àn ricevût dosis parsore di 100 mSv, 95 di lôr dosis tra 100 e 200 mSv, 2 tra 200 e 250 mSv e 6 tra 309 a 678 mSv: di chescj doi a jerin operadôrs de sale di control des unitâts 3 e 4 che tai prins dîs no vevin doprât respiradôrs protetîfs. Cundut che centenârs di lavoradôrs a àn ricevût dosis parsore dal normâl, nol è stât nissun câs di sindrome acude di radiazion e dome pôcs interventi sanitari mancûl grâfs. Ai 24 di Març 3 lavoradôrs di une dite apaltadore che a tiravin fîi te unitât 3 cence tutis protetivis completis a àn ricevût une dose parsore di 170 mSv e doi di lôr a àn scugnût jessi ricoverâts par bru-

saduris tai pîts, par vie di radiacions beta di aghe contaminade; dopo 4 dîs di tratament a son stâts dimetûts cence consequencis tal timp. Misuris preventivis e vistiduris di protezion a son stadis dopradis ancje dai militârs e dai vigjii dal fûc impegnâts in operacions di socors ae popolazion te aree di 30 km ator de centrâl, e ancje lôr a son stâts visitâts cun controis dosimetrics de radioativitât (limits di 50 mSv pai militârs e di 100 mSv pai vigjii dal fûc): nissun di lôr al è lât parsore dai limits.

Par ce che al rivuarde la popolazion, la evacuazion de zone fin a 20 km de centrâl ordenade ai 12 di Març e à evitât ai residents la esposizion ae emission plui fuarte dai 15 di Març, cun dutis lis pussibilis consequencis sanitariis. Ai 16 di Març la comission di sigurece nucleâr (NSC) e à raccomandât aes autoritâts locâls di fâ cjoli aes personis evacuadis cun mancûl di 40 agns di etât une dose (daûr de etât) di jodi stabil par prevignî la ingestion (par esempli cul lat) di jodi-131, e pirulis e sirop (pai fruts) a son stâts dâts fûr tes zonis di ricovar.

A son stâts fissâts limits su la radioativitât de robe di mangjâ e davuelts controis imediâts in dutis lis prefeturis; te prefeture di Fukushima cierts prodots agricui, il lat e une specie di pes a son lâts parsore dai limits par un ciert periodi e a son stâts gjavâts dal marcjât; cuantitâts di jodi-131 fûr dai limits previodûts pai fruts a son stadis individuadis par un curt periodi te aghe di bevi di ciertis prefeturis.

Nissun efiet danôs pe salût al è stât cjatât tes 195.345 personis residents dongje de centrâl controladis ai 31 di Mai; nissun dai 1080 fruts sot dai 15 agns che ur è stade esaminade la tiroide al à passât la dose critiche di 0,2 μ Sv/h. Te prefeture di Fukushima si previôt di tignî sot control medic dute la popolazion (2 milions). A chest pro, il guvier al à nomenât un grup di esperts par monitorâ lis cundizions sanitariis dai residents; il grup al cjape dentri personâl de prefeture di Fukushima e di facultâts universitariis di medisine, ancje chês di Hiroshima e Nagasaki.

Ancje se l'incident nucleâr nol à causât la pierdite di vitis umanis e nol à creât problemis sanitaris, al à vût chel istès un impat sociâl une vore fuart par vie de evacuazion obleade di tante int, cun dutis lis consequencis di privacions, stress, pierdite di lavôr e alterazion dai rapuarts umans e de vite comunitarie. L'incident al à creât, cun di plui, une grande preocupazion de bande de int, sedi in Gjapon che tal forest, pai pussibii efiets sanitaris e ambientâi de radioativitât emetude. Infin, al è une vore impuartant l'imp

economic dovûr ae pierdite de centrâl e ai coscj pai interventis di emergjence, che si zontin ai dams provocâts dal taramot e dal tsunami.

7. Primis leziions dal incident. L'incident di Fukushima al presente aspiets unics te storie dai events nucleârs, in particolâr pe compresince di elements une vore grâfs che a àn rindût pardabon dificil il control de situazion e de sigurece dal implant, dal personâl e de popolazion: pierdite totâl di potence eletriche e dal poç di calôr, inagament des struturis, interessament di plui reatôrs, ripetizion di scossis sismichis fuartis, intun contest ambientâl devastât dal taramot e dal tsunami cun distruzion des infrastruturis sociâls tant che traspuarts, telecomunicazions, furnidure eletriche e altris servizis essenziâi.

Pe sô complessitât chel di Fukushima al è calculât tant che un câs particolâr di incident “sevêr”, vâl a dî un incident che al va di là des ipotesis progetuâls dai implants e duncje al domande un nivel superiôr di “difese in profonditât” tal scheme di protezion multiple definît de IAEA pe sigurece dai implants nucleârs (INSAG 1999). Il scheme al previôt misuris a plui nivei, ognidun cun margjins di eficacie ulteriôrs, di mût di: prevignî la pussibilitât di situazions anormâls (nivel 1), impedî il peiorament di anormalitâts in incidents (nivel 2), ridusi l'impât dai incidents (nivel 3). Tes ipotesis progetuâls dai implants si previodin di norme misuris di sigurece daûr dai 3 nivei indicâts sore; par frontâ events che a puartin a incidents sevêrs a coventin, invezit, misuris plui complessis (nivel 4) di mût di impedî un peiorament ulteriôr dal incident e ridusi i siei efjets. I rapuarts presentâts a Viene dal guvier gjaponês e de comission de IAEA a cjapin in considerazion lis proceduris dopradis par frontâ i incidents sevêrs, dant indicazions su cemût potenziâls a nivel nazionâl e internazionâl ae lûs dai events esternis e di ce che si jere rivâts a savê su la evoluzion dai reatôrs e de emission radioative e su la gjestion de emergjence.

Il document dal guvier al individue lis principâls carencis struturâls e operativis che a àn contribuît ae evoluzion negative dal incident, presentantlis te forme di 28 “leziions” dividudis jenfri cinc areis di intervent:

- analizâ la severitât dal incident e riviodi lis misuris preventivis par cheste tipologjie di incident;

- valutâ se lis rispuestis al incident a son stadis adeguadis;
- reconsiderâ lis rispuestis aes situazions di emergjence par disastri nucleâr;
- controlâ la robustece des infrastruturis di sigurece dai implants elettronucleârs;
- esaminâ la soliditât de culture di sigurece.

La prime aree e cjape dentri interventi tant che: rinfuarcî lis misuris preventivis cuntri di taramots ecezionâi e tsunamis, inzornant lis previssions e cjapant in considerazion il pericol di inagament; garantî lis furniduris eletrichis cuntune plui grande diversificazion des fonts e ridondance des struturis di emergjence; incressi la eficacie des funzions di disfredament di reatôrs, struturis di contigniment e vascjis di immagazzinament; modificâ lis misuris di gjestion de emergjence, introdusint tecnicis probabilistichis di gjestion dal pericol e rimplaçant un aproç basât su la iniziative individuâl cuntun fondât su normativis di pueste; reconsiderâ i problemis di sigurece globâi dai implants cun plui di un reatôrs, rindint lis diversis unitâts independentis par strutture e gjestion de sigurece; riviodi i projets architetonics in maniere di corezi lis mancjancis che a àn contribuît ae evoluzion negative dal incident; sigurâ la impermeabilitât des struturis dai implants critics.

Te seconde categorie lis leziions a previodin: rinfuarcî lis misuris di prevenzion di esplosions di idrogjen; potenziâ i sistemis di contigniment dai respîrs di gas e vapôr; miorâ l'ambient di rispueste ae emergjence, di mût di permeti une azion continue in cundizions operativis di comoditât e eficacie; potenziâ il sisteme di gjestion de esposizion dal personâl aes radiazions; miorâ la comunicazion ae popolazion des informazions sui incidents; miorâ la sigurece e la resistence de strumentazion pal control des cundizions dai reatôrs e dai contignidôrs primaris; centralizâ la organizazion dal supuart logjistic di materiâi e dotazions di emergjence e la formazion di scuadris di intervent.

Te tierce aree di intervent lis azions a rivuardin: la gjestion di emergjencis contemporaniis in presince di un incident nucleâr sprolungjât compagnât di disastri ambientâl; il rinfuarciment dal monitoraç ambientâl; la definizion di une division precise dal lavôr e des responsabilitâts tra lis variis organizacions centrâls; il miorament de comunicazion ae popolazion des informazions relativis ai incidents; la creazion di

struturis e proceduris par judâ la colaborazion internazionâl e comunicâ in maniere imediade cu la comunitât internazionâl; la identificazion precise dai efîets pussibii dai materiâi radioatîfs emetûts; la definizion clare des areis di evacuazion e des liniis vuide di protezion sanitarie tes emergjencis nucleârs.

Te ultime categorie si considere: il rinfuarciment des istituzions responsablis de regolamentazion de sigurece, separant la NISA dal NETI par rindile autonome dal guvier; la revision des normis legâls, dai criteris e des liniis vuide, tignint cont ancje des esperiencis internazionâls e des indicazions de IAEA; il potenziament des risorsis e competencis umanis pe preparazion e gjestion des emergjencis nucleârs; la garanzie de indipendence e diversificazion dai sistemis di sigurece; l'ûs eficaç di metodologiis di sigurece probabilistichis te gjestion dai pericui; la creazion di une culture de sigurece in dutis lis organizazions e personis impegnadis in divierse maniere te energjie e tecnologjie nucleârs.

Suntun plan plui concret, il guvier si è impegnât a inviâ un plan di potenziament de ricercje su lis infrastruturis di sigurece nucleâr, di revision de sigurece dai implants esistents e di inzornament de normative su lis prospetivis de energjie nucleâr in Gjapon. Cun di plui al à metût dongje un grup independent di 10 esperts, in gran part academics e cun doi consulents tecnicos, par une analisi critiche dai events e de gjestion dal incident di Fukushima; il grup al à tacât a lavorâ tal mêis di Jugn cun cuatri scuadris di indagjin; un prin rapuart al varès di vignî fûr ae fin dal 2011 e chel finâl sîs mêis plui indevant.

Ancje il rapuart de IAEA al formule “lezions” di caratar gjenerâl dongje di “conclusions” sul episodi specific. Tes conclusions si osserve che la “difese in profonditât” no je stade suficiente; che a coventin inzornadis lis normis e proceduris di sigurece gjaponesis tignint cont ancje dai standards di sigurece previodûts de IAEA; che il sisteme gjaponês di preparazion e rispueste aes emergjencis al è ben organizât, ma pe complessitât de struture al compuarte la pussibilitât di ritarts tal cjapâ decisions urgjentis; che la IAEA è a di riviodi lis vuïdis e i regolaments di sigurece par tignî cont de gjestion di incidents sevêrs in implants cun plui reatôrs; che al sarès util adeguâ lis regolamentazions di sigurece nazionâls ai standards internazionâi su la fonde des gnovis esperiencis; che e covente une gnove mission internazionâl par assistî il guvier gjaponês

tal disvilup di un gnûf sisteme di regulis pe sigurece nucleâr.

Lis lezions a presentin indicazions svilupadis su la fonde des carencis evidenziadis dal incident, tant che: tignû cont te progetazion dai implants dai pericui leâts a events naturâi, in particulâr tsunamis e inagaments di cualsisei sorte, garantint la sigurece globâl e specifiche des structuris essenziâls cun separazion fisiche e ridondance dai sistemis di sigurece e revisions e inzornaments periodics; istituî centris operatîfs sigûrs indotâts di struments e aparâts par intervients esternis, in câs di incidents grâfs cun pierdite di funzions essenziâls; pal centri di rispuete aes emergjencis di ogni centrâl nucleâr individuâ un fabricât protet dai events esternis, indotât di sistemis di comunicazion e servizis e in grât di garantî cundizions di comoditât e bon stâ al personâl; preparâ in mût specific personâl e risorsis par frontâ situazions di emergjencis simultaniis in plui centrâls nucleârs e tes centrâls cun plui reatôrs tal stes implant; creâ sistemis resistentis di comunicazion e di monitoraç par un control puntuâl de evoluzion dai fats e la trasmission des informazions relativis.

I esperts a concuardin intal rapuart che “in considerazion des circostancis estremis di chest incident, la gjestion locâl dal incident e je stade puartade indevant miôr che si podeve e lant daûr dai principis fondamentâi di sigurece” (conclusion 2) e a ricognossin che in graciis dal impegn e de dedizion di dirigjents e lavoradôrs e de flessibilitât e buine organizazion dal sisteme si à rivât a dâ rispuestis eficacis anje in situazions imprevistis e si à prevignût un impat plui fuart dal incident su la salût de popolazion e dai lavoradôrs (conclusion 7).

¹ La scjale INES e misure la gravitât dai events nucleârs e radiologjics tignint cont di trê areis di impat (IAEA 2009):

- personis e ambient: e considere lis dosis di radiazion pes personis prossimis al event e la dispersion ambientâl di sostancis radioativis;
- barrieris e control radiologjic: e rivuarde nivei eccessîfs o emissions di radioativitâts no previodûts ma limitâts ai implants nucleârs, cence efîets su la popolazion e l'ambient;
- sigurece in profunditât: e considere events dulà che lis misuris previodudis pe preven-

zion dai incidents no àn funzionât come che a varessin vût.

La scjale e à 8 nivei, di 0 (deviazion insignificante) a 7 (incident estremi), dulà che la gravitât di ogni nivel e je 10 voltis plui grande dal nivel prin.

² L'*International Atomic Energy Agency* (IAEA) al è un organisim autonom intergovernatîf di sience e tecnologie dedicât ae cooperazion nucleâr mondiâl, part de famee di istituzions che a fasin riferiment aes Nazions Unidis, istituît tal 1956 cun sede a Viene. I siei compits a son:

- assisti i paîs membris tal disvilup di sience e

tecnologjiis nucleârs in varis setôrs civîl e favôrî il trasferiment di chestis cognossincis e tecnologjiis;

- disvilupâ standards di sigurece nucleâr e promovi nivei di sigurece alts tes aplicacions de energjie nucleâr e pe protezion sanitarie e ambientâl des radiazions (Pascolini 2006 e 2007);
- verificâ cuntun sisteme di ispezions il rispjet dal Tratat di no-proliferaçion e di altris acuar-dis di no-proliferaçion par che materiâi e struturis nucleârs par ûs pacifics no vegnin indreçâts a ûs militârs.

Al mês di Lui dal 2011 i paîs membrîs a son 151, il segretariât tecnic al è componût di 2300 personis e il diretôr gjenerâl al è il diplomatic japonês Yukiya Amano.

³ Par informazions essenziâls su lis proprietâts dai isotops dal urani e su lis tecnichis di inricjiment viôt, par esempi, Pascolini (2008).

⁴ Il Gjapon al è tra i paîs plui interessâts al ricicli dal plutoni tant che combustibil MOX (von Hippel 2010).

⁵ Il bôr al assorbîs neutrons, ridusint la pussibilitât di une reazion a cjadene.

⁶ Par podê poiâ i reatôrs a nivel dal cret, a Fukushima si è scugnût gjavâ vie il strât sedimentari di cuvierdure dal teren, sbassant la altece sul nivel dal mâr di cirche 13 m.

⁷ Par informazions essenziâls su la fisiche e tecnologjie dai reatôrs nucleârs, viôt par esempi Charpak et al. (2005).

⁸ Il vapôr acui nol è un bon ralentadôr di neutrons e in ambient soredut di vapôr la reazion a cjadene si stude in pôc timp: chest al costituîs un fatôr di sigurece intrinsic dai reatôrs a aghe, stant che in assente di refrigjerant il reatôr si stude. Invezit, tai reatôrs moderâts a grafite e disfredâts a aghe la vaporizazion dal refrigerant e à l'efiet di acelerâ lis reazions nucleârs, aumentant fûr di misure la potence dal reatôr, come che al è sucedût a Chernobyl (Pascolini 2006).

⁹ Tal incident di Three Mile Island (1979), dulà che si è vude la fusion di cirche metât dal nusel, il corium al è penetrât par 15 mm tal spessôr di 225 mm di açal dal vessel, che al è diventât incandescent par cirche une ore, ma nol è rivât a sbusâlu.

¹⁰ Tai prins dis dopo de pierdite di potence eletriche tantis misuris dai parametris dai reatôrs a son stadis cjapadis a man cun strumentazion alimentade di batariis recuperadis des autoveturis di strutris dal tsunami. Batariis e compressôrs par

martiei pneumatics a son stâts doprâts ancje par vierzi o inlineâ a man lis valvulis dai circuits idrics e des tubazions di respir dal vapôr.

¹¹ Al va ricuardât che in plui de emergjence nucleâr il Gjapon al veve di frontâ tal stes moment ancje lis emergjencis causadis dal taramot e dal tsunami. Ancje par chês a son stadis prontadis struturis di rispueste a trê nivei, gjestidis di varis ministeris, prefeturis e autoritâts locâls. Di fat no je previodude nissune forme legâl e operative di coordinament tra lis unitâts operativis des variis emergjencis.

¹² L'articul 10 dal ASMCNEP al impon la notifiche se la dose di radioativitât e je parsore di cierts valôrs: in chest câs che ancje i riveladôrs di radiazion de centrâl no funzionavin – e in consideraçion de gravitât de situaçion – la notifiche e je stade fate cence tignî cont de radioativitât.

¹³ In dut tal reatôr 2 a son stadis inietadis 9197 t di aghe di mâr, a intervai regolârs e cuntune zonte di acit boric; la operazion e je stade sospindude par cualchi timp cuant che la autopompe e je restade cence carburant.

¹⁴ Par vie de mancjance di strumentazion e dai alts nivei di radioativitât, par tancj dis dopo dal taramot no si è podût determinâ il nivel efetif de aghe tes vascjis des unitâts 1-4. La situaçion plui delicade e rivuardave la unitât 4, pal grant numar di elements contignûts te vascje: in mancjance di sistemis di disfredament, a coventavin cirche 100 m³/d di aghe par recuperâ la evaporazion produsude dal calôr di decjadiment.

¹⁵ La unitât di misure de radioativitât al è il bequerel (simbul Bq): 1 Bq = 1 decjadiment al secont. La unitât di misure de esposizion aes radiazions (dose) al è il gray (simbul Gy): 1 Gy al corrispuint al assorbiment di 1 joule di energjie par kilogram di masse. Stant che no dutis lis radiazions a àn chei stes efietis biologjics, in dosimetrie si dopre tant che unitât di dose efficace il sievert (simbul Sv), che si oten moltiplicand la dose in gray par coeficients carateristics des variis radiazions (1 par eletrons, rais X e gamma, 2 par protons, tra 5 e 20 par neutrons a seconde de energjie, 20 par rais alfa) e dal gjenar di tiessût colpît (0,01 pe piel, 0,05 pe tiroide, 0,12 pe medole, 0,2 pes gonadis).

¹⁶ Par vie de radioativitât gamma dal azôt-16, cuant che i BWR a son in funzion nol è pussibil acedi al locâl des turbinis.

¹⁷ In chest moment tes misurazions di radioati-

vitât ambientâl a son impegnadis 54 universitâts e 47 prefeturis, che a cjapin misuris ogni ore e a presentin i dâts ogni dì al MEXT. I dâts a son publicats ancje su internet.

¹⁸ Il nivel 7 de scjale INES, “incident estremi”, si à tal câs di emissions di grandis cuantitâts di radioativitât (“superiôrs a diversis desenis di miârs di terabequerel di jodi-131”), cun efîets sanitaris e ambientâi cussî grâfs di domandâ cuintrimisuris di grandis proporzions. Tal câs specific si son ricognossûts chescj fats: emission radioative fûr dai limits, esposizion eccessive di lavoradôrs (ma no de popolazion), contaminazion de centrâl, da-

negjament des barieris e dal combustibil, personis feridis e probleme ancjemò viert.

¹⁹ Un projet di dismission des unitâts 1-4 al è stât prontât di un consorzi vuidât di Hitachi-GE e Toshiba; al previôt di gjavâ il combustibil tal zîr di une desene di agns, sigjilâ i reatôrs par altris 10-20 agns par permeti il decjadiment dai materiâi ativâts dai neutrons tal vessel, e infin procedi ae demolizion definitive. Ancje la Areva e je daûr a preparâ un projet similâr.

²⁰ Il guvier gjaponês al à presentât scusis formâls ai paîs de cueste par no vèju informâts par timp di cheste operazion.

Bibliografie

- Charpak G., Garwin R.L., Journé V. (2005). *De Tchernobyl en Tchernobyls*. Paris: Jacob.
- IAEA (2009). *INES. The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual*. Vienna: IAEA.
- IAEA (2011). *Report of the IAEA International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-Ichi Npp accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, 24 May-2 June 2011*. Vienna: IAEA.
- INSAG (1999). *Basic safety principles for nuclear power plants. 75-INSAG-3, Rev. 1. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. INSAG series, 12*. Vienna: IAEA.
- Japan Government (2011). *Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations*. Tokyo: Government of Japan.
- Pascolini A. (2006). Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare. Parte prima: l'incidente. *Pace Diritti Umani*, III (2): 23-45.
- Pascolini A. (2007). Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare. Parte seconda: accordi e convenzioni internazionali. *Pace Diritti Umani*, IV (2): 49-74.
- Pascolini A. (2008). Una pesante eredità della guerra fredda: le enormi scorte di materiali fissili con potenzialità militari. *Pace Diritti Umani*, V (3): 53-93.
- Von Hippel F.N. (Ed) (2010). *The Uncertain Future of Nuclear Energy*. Princeton: International Panel on Fissile Materials.