

L'Energia Nucleare

- Storia e sviluppo,
- Funzionamento,
- Caratteristiche Generali,
- Possibili eventi in un centrale nucleare,
- Le scorie nucleari,
- Riprocessamento,
- Le scorie nel ciclo del combustibile nucleare,
- Effetti delle scorie radioattive,
- Impatto ambientale in caso di incidente.

Storia

La prima centrale nucleare commerciale al mondo fu quella di Calde Hall, a Sellafield in Inghilterra, e iniziò a lavorare nel 1956 con una potenza iniziale di 50 MW (successivamente divenuti 200 MW). Il primo reattore nucleare operativo negli Stati Uniti fu invece il reattore di Shippingport, in Pennsylvania (dicembre 1957). Una delle prime organizzazioni che svilupparono la tecnologia nucleare fu la Marina Americana, per la propulsione dei sottomarini e delle portaerei. Grande sostenitore di questa applicazione del nucleare fu l'ammiraglio Hyman Rickover, che tra l'altro sostenne anche la costruzione del reattore di Shippingport.

La Marina Americana ha utilizzato più reattori nucleari di qualsiasi altra organizzazione, inclusa la Marina Sovietica. Il primo sottomarino nucleare, USS Nautilus (SSN-571), solcò i mari nel 1955. Due sottomarini nucleari statunitensi, USS Scorpion (SSN-589) e USS Thresher (SSN-593), andarono dispersi in mare.

Enrico Fermi e Leo Szilard condivisero il brevetto U.S. Patent 2,708,656 nel 1955 per il primo reattore nucleare, garantendosi tardivamente per il loro lavoro svolto durante il progetto Manhattan.

Il Progetto Manhattan (più propriamente Manhattan Engineering District, in italiano "Distretto di ingegneria di Manhattan") era il criptonimo del programma di ricerca condotto dagli Stati Uniti durante la Seconda guerra mondiale, che portò alla realizzazione delle prime bombe atomiche.

In Italia un piccolo reattore nucleare, chiamato "Enrico Fermi" venne costruito nel 1959 nel Politecnico di Milano sede di città studi, tra via Ponzio e via Bassini, a scopo didattico e di ricerca. Venne utilizzato fino al 1979 e sviluppava una minima potenza in grado pari a quanto richiesto da 25 ferri da stiro



Sviluppo

Andamento storico dell'utilizzo di energia nucleare (in alto) e del numero di centrali nucleari attive (in basso).

La potenza complessiva delle centrali nucleari aumentò velocemente, passando da meno di 1 GW nel 1960 a 100 GW nei tardi anni settanta e 300 GW nei tardi anni ottanta. Dal tardo 1980 la potenza è andata crescendo molto più lentamente, raggiungendo i 366 GW nel 2005, con la maggiore espansione avutasi in Cina. Tra il 1970 e il 1990 furono in costruzione centrali per più di 50 GW di potenza, con un picco a oltre 150 GW tra il tardo 1970 e i primi anni ottanta; nel 2005 sono stati pianificati circa 25 GW di nuova potenza. Più dei 2/3 di tutti gli impianti nucleari programmati dopo il gennaio 1970 furono alla fine cancellati.

Durante gli anni settanta e ottanta il crescere dei costi economici (legati ai tempi di costruzione delle centrali) e la diminuzione dei prezzi dei combustibili fossili resero gli impianti nucleari allora in costruzione meno economicamente attrattivi. Negli anni ottanta, negli Stati Uniti, e negli anni novanta, in Europa, la crescita meno marcata della potenza e la liberalizzazione dell'elettricità hanno anche contribuito a rendere la tecnologia meno attraente.

La crisi del petrolio del 1973 ebbe un forte effetto sulle politiche energetiche: la Francia e il Giappone che usavano soprattutto petrolio per produrre energia elettrica (rispettivamente, in tal modo producevano il 39% e il 73% dell'energia elettrica totale) investirono sul nucleare. Oggi le centrali nucleari forniscono rispettivamente circa l'80% e il 30% di elettricità in queste nazioni. Tuttavia, ciò non le rende indipendenti dall'estero sia per il reperimento dell'uranio, sia per la stessa produzione elettrica: è tipico di ogni inverno che la Francia si veda costretta ad importare grandi quantità di energia elettrica dai paesi confinanti per sopperire alle proprie esigenze di picco, come avvenuto ad esempio nel dicembre 2009 quando è stato necessario importare una potenza pari a quella di 5-7 reattori a seconda delle giornate, anche a causa del contestuale fuori servizio di 11 reattori su 59 operanti.

L'opinione pubblica, in seguito a incidenti quali quello di Three Mile Island (USA) nel 1979 e il disastro di Chernobyl del 1986, ha dato vita negli ultimi venti anni del XX secolo ad alcuni movimenti che hanno influenzato la costruzione di nuovi impianti in molte nazioni.

Diversamente dall'incidente di Three Mile Island, il più grave incidente di Chernobyl non influì sulla regolamentazione della costruzione dei nuovi reattori occidentali, dato che la tecnologia di Chernobyl che utilizzava i problematici reattori RBMK era sfruttata solamente in Unione Sovietica ed era carenti di strutture di contenimento. L'Associazione Mondiale di Operatori del Nucleare (WANO) venne creata nel 1989 allo scopo di promuovere la cultura della sicurezza e lo sviluppo professionale degli operatori impiegati nel campo dell'energia nucleare.

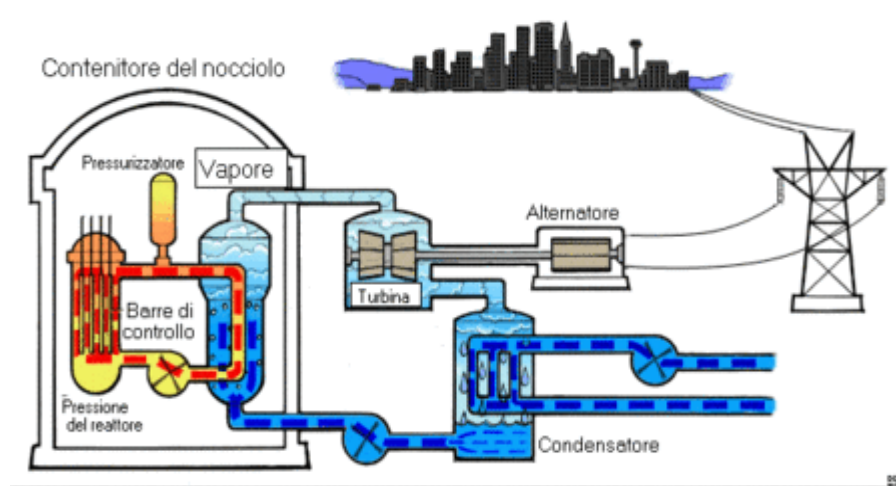
In Irlanda, Nuova Zelanda e Polonia l'opposizione ha impedito lo sviluppo di programmi nucleari, mentre in Austria (1978), Svezia (1980) e Italia un referendum ha bloccato l'utilizzo del nucleare.



Funzionamento






Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione di tipo PWR. Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito tramite un fluido refrigerante a un flusso di acqua che genera vapore saturo. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica.

In una centrale nucleare a fissione refrigerata ad acqua leggera, come ogni centrale elettrica basata su un ciclo al vapore, avviene una reazione che libera calore utilizzato per la vaporizzazione dell'acqua e quindi la generazione di lavoro meccanico. Il principio fisico alla base della generazione del calore in una centrale nucleare a fissione è dunque la fissione nucleare, ovvero la scissione del nucleo di atomi pesanti quali uranio e plutonio.



Caratteristiche Generali

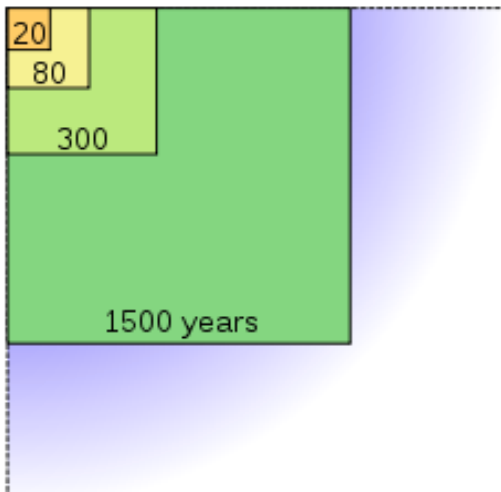
La stima dell'uranio disponibile dipende dalla tipologia di risorse considerate. I quadrati rappresentano le dimensioni relative delle differenti stime, dove i numeri in basso indicano la durata di una specifica fonte in base al consumo attuale.

-  Riserve nelle miniere attuali
-  Riserve economiche conosciute
-  Fonti convenzionali non ancora scoperte
-  Fonti minerarie totali del pianeta ipotizzate
-  Fonti non convenzionali ipotizzate (almeno 4 miliardi di tonnellate)

Ad agosto 2007 vi erano 439 centrali nucleari operative nel mondo, in 31 diversi stati, che attualmente producono il 17% dell'energia elettrica mondiale.

La potenza degli impianti varia da un minimo di 40 MW fino ad oltre un gigawatt (1000 MW). Le centrali più moderne hanno tipicamente potenza compresa tra i 600 MW e i 1600 MW. Solo le centrali termoelettriche a combustibili fossili e le centrali nucleari raggiungono questa potenza con un singolo impianto, attualmente.

La vita operativa di una centrale nucleare attuale è in genere intorno ai 25-30 anni, anche se oggi si progettano centrali che, mediante la sostituzione periodica di importanti componenti, si ritiene che possano arrivare a 60 anni. Al termine di questo periodo l'impianto va smantellato, il terreno bonificato e le [scorie](#) stoccate adeguatamente.



Possibili eventi in una centrale nucleare

Si possono verificare degli eventi che non garantiscono la sicurezza dell'impianto durante il suo periodo di vita. La IAEA ha stabilito una scala (scala INES - International Nuclear Event Scale) di gravità degli eventi possibili in una centrale nucleare o in altra installazione, che si articola nei seguenti 8 livelli:

- Livello 0 (deviazione): evento senza rilevanza sulla sicurezza.
- Livello 1 (anomalia): evento che si differenzia dal normale regime operativo, che non coinvolge malfunzionamenti nei sistemi di sicurezza, né rilascio di contaminazione, né sovraesposizione degli addetti.
- Livello 2 (guasto): evento che riguardi malfunzionamento delle apparecchiature di sicurezza, ma che lasci copertura di sicurezza sufficiente per malfunzionamenti successivi, o che risulti in esposizione di un lavoratore a dosi eccedenti i limiti e/o che porti alla presenza di radionuclidi in aree interne non progettate allo scopo, e che richieda azione correttiva.
 - esempio: l'evento di Civaux, Francia 1998 e di Forsmark, Svezia 2006
- Livello 3 (guasto grave): un incidente sfiorato, in cui solo le difese più esterne sono rimaste operative, e/o rilascio esteso di radionuclidi all'interno dell'area calda, oppure effetti verificabili sugli addetti, o infine rilascio di radionuclidi tali che la dose critica cumulativa sia dell'ordine di decimi di mSv.
- Livello 4 (incidente grave senza rischio esterno): evento causante danni gravi all'installazione (ad esempio fusione parziale del nucleo) e/o sovraesposizione di uno o più addetti che risulti in elevata probabilità di decesso, e/o rilascio di radionuclidi tali che la dose critica cumulativa sia dell'ordine di pochi mSv.
- Livello 5 (incidente grave con rischio esterno): Evento causante danni gravi all'installazione e/o rilascio di radionuclidi con attività dell'ordine di centinaia di migliaia di TBq come ^{131}I , e che possa sfociare nell'impiego di contromisure previste dai piani di emergenza.
 - esempio: l'incidente di Three Mile Island, USA (1979) e l'incidente di Windscale, Gran Bretagna (1957)
- Livello 6 (incidente serio): evento causante un significativo rilascio di radionuclidi e che potrebbe richiedere l'impiego di contromisure, comunque meno rischioso dell'incidente di livello 7.
 - esempio: l'incidente di Kyshtym, URSS (1957)
- Livello 7 (incidente molto grave): evento causante rilascio importante di radionuclidi, con estesi effetti sulla salute e sul territorio.
 - esempio: L'incidente di Chernobyl, URSS (1986)
- I casi di incidenti gravi con estese contaminazioni esterne sono fortunatamente stati pochi; molto più numerosi e spesso poco noti sono gli incidenti con potenziale rischio esterno dovuti principalmente a errori umani e che sono stati confinati all'interno delle centrali grazie alle misure di sicurezza ed in qualche caso anche grazie alla fortuna, come nel caso di Browns Ferry in cui un gruppo di tecnici provocarono un incendio nel tentativo di riparare una perdita d'aria da un tubo. Continui e molto frequenti sono gli eventi di livello 0 e 1, sia in occidente che nel resto del mondo e sono registrati sul sito dell'IAEA.

Le scorie nucleari

In genere si definisce scoria radioattiva lo scarto di combustibile nucleare esausto derivante dalla fissione nucleare. Questa definizione però è incompleta, il combustibile esausto è infatti considerato scoria nucleare di III categoria, cioè scorie di alta radiotossicità e di grande persistenza nell'ambiente. Si classificano scorie di I e II categoria invece prodotti contaminati o rifiuti radiologici da ambito nucleare, industriale e radioterapico.

All'interno di un reattore nucleare a fissione il materiale fissile (uranio, plutonio ecc) viene bombardato dai neutroni prodotti dalla reazione a catena: tuttavia non si ha mai una fissione totale di tutto il "combustibile", anzi la quantità di atomi effettivamente coinvolta nella reazione a catena è molto bassa. In questo processo si generano quindi due principali categorie di atomi:

una quota di atomi "trasmutati" che hanno "catturato" uno o più neutroni senza "spezzarsi" e si sono dunque "appesantiti" (si tratta di elementi facenti parte del gruppo degli attinidi).

una parte di cosiddetti prodotti di fissione cioè di atomi che sono stati effettivamente "spezzati" dalla fissione e sono pertanto molto più "leggeri" dei nuclei di partenza (cesio, stronzio ecc); in parte sono allo stato gassoso.

A seconda del "combustibile" e del ciclo (cioè in pratica della tipologia di reattore/i) utilizzati, la radiotossicità delle scorie può essere nettamente differente; questo si traduce in tempi di isolamento delle scorie che oscillano indicativamente dai 300 anni al milione di anni. Questo è il tempo necessario affinché le scorie diminuiscano la loro radiotossicità fino al valore dell'uranio naturale; dopo tale periodo la radiotossicità delle scorie non è zero, ma comunque, essendo pari a quella dei giacimenti di uranio normalmente presenti nella crosta terrestre, è accettabile in quanto sostanzialmente si ritorna -in termini di radiotossicità- alla situazione di partenza.

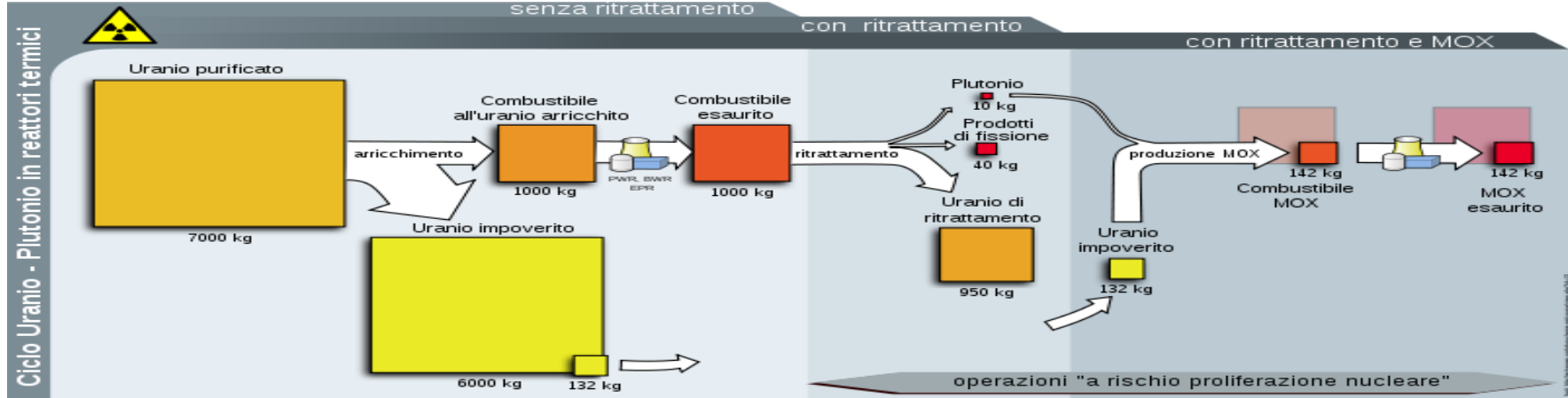
Riprocessamento

Come detto, in realtà, il combustibile estratto ("scaricato") dai reattori contiene ancora una grandissima quantità di elementi fertili (torio, uranio 238...) e fissili (uranio 233, 235, plutonio) potenzialmente utilizzabili. In particolare le scorie degli attuali reattori (2° e 3° generazione funzionanti ad uranio) contengono una grandissima quantità di U238 (94%), una piccola quantità di U235 e di plutonio (2%) una ancor minore quantità di altri nuclei pesanti (attinoidi) mentre un 3-4% è dato dagli atomi "spezzati" cioè dai prodotti di fissione.

Benché il plutonio sia radiotossico (la sua tossicità chimica è intermedia fra il cianuro e il concentrato di caffeina), il suo recupero insieme all'uranio 238 e 235 è talvolta attuato. Il problema è che tali atomi sono frammisti ai prodotti di fissione (anch'essi altamente radiotossici) e vanno dunque separati. Tale processo è detto ritrattamento o riprocessamento delle scorie e produce da un lato nuovi elementi fertili e fissili, dall'altra delle scorie inutilizzabili ed estremamente pericolose che devono essere collocate in luoghi sicuri. Per quanto riguarda i costi, dovendo operare sul "combustibile irraggiato" cioè "spento" ovvero altamente radioattivo, il ritrattamento è una operazione estremamente onerosa e non è detto che sia economicamente conveniente effettuarla.

Va inoltre sottolineato che gli impianti di ritrattamento (così come quelli di arricchimento) sono ovviamente a rischio di incidente nucleare; lo stesso trasporto dei materiali da e per questi impianti è soggetto a rischi. Alcuni degli incidenti più gravi oggi noti sono infatti avvenuti in queste installazioni. Nel 2008 in Francia sono avvenuti alcuni incidenti riguardanti proprio impianti di ritrattamento (come quello di Tricastin gestito dalla Areva).

Per tali motivi non è detto che il ritrattamento venga attuato (alcuni paesi come gli USA hanno deciso di non ritrattare il combustibile esausto): pertanto con "scorie" si può intendere sia il combustibile scaricato dai reattori, sia lo scarto inutilizzabile dei processi di ritrattamento. Nei due casi i volumi da smaltire (così come i rischi ed le problematiche citate) sono molto differenti.



Le scorie nel ciclo del combustibile nucleare

Attualmente vengono principalmente proposti due modi per depositare le scorie (preventivamente solidificate se liquide o gassose): per le scorie a basso livello di radioattività si ricorre al deposito superficiale, ovvero il confinamento in aree terrene protette e contenute all'interno di barriere ingegneristiche; per le scorie a più alto livello di radioattività si propone invece il deposito geologico, ovvero allo stoccaggio in bunker sotterranei profondi e schermati in modo da evitare la fuoriuscita di radioattività nell'ambiente esterno.



Effetti delle scorie radioattive



Bisogna inoltre tener conto dei rischi che si corrono nella estrazione dei combustibili fossili rispetto all' estrazione dei minerali di uranio. Lavorare in una miniera di uranio, fonte di energia nucleare, è dieci volte meno pericoloso che lavorare in una miniera di carbone, poiché quest'ultimo è in assoluto la fonte di energia che provoca più morti: 6-7 mila all'anno senza contare le vittime della silicosi che colpisce tutti i minatori. L'uomo può essere esposto alla radioattività in due modi:

per esposizione esterna, che avviene quando l'individuo si trova sulla traiettoria delle radiazioni emesse da una sorgente radioattiva situata all'esterno dell'organismo; si parla, in questo caso, di irradiazione

per esposizione interna, che si verifica quando la sorgente radioattiva si trova all'interno dell'organismo, a causa di inalazione per respirazione, e/o ingestione, ovvero per introduzione attraverso una ferita; si parla, in questo caso, di contaminazione interna

L'esposizione esterna cessa quando l'individuo si allontana dalla sorgente ovvero vengono interposti opportuni schermi tra sorgente e individuo. Le radiazioni alfa, beta e gamma da esposizione esterna non fanno diventare radioattiva la materia che le assorbe.

L'esposizione interna cessa quando i radioisotopi respirati o ingeriti o introdotti attraverso ferite sono completamente rimossi dall'organismo (ad esempio: con l'urina, le feci, ecc.).

L'esposizione a dosi più o meno elevate di radiazioni ionizzanti può avere effetti a lungo termine che possono provocare cancro o leucemia. Inoltre bambini che vivono entro 5 km dai reattori sono soggetti ad un incremento del 76% del rischio di contrarre una leucemia rispetto ai coetanei che vivono almeno a più di 50 km. Questo incremento di probabilità si riduce al 26% tra 5 e 10 km, al 10% tra il 10 ed 30 km, dello 0,5% tra 30 e 50 km.

Tali effetti si manifestano in modo aleatorio, che non si può predire in modo certo per ciascuna persona sottoposta alle radiazioni.

In questi casi, si parla di probabilità di accadimento, che cresce o diminuisce a seconda dell'entità più o meno rilevante della dose assorbita. La stima di tale probabilità è ricavata dai dati sperimentali (epidemiologia) ottenuti osservando le conseguenze dell'esposizione alle radiazioni su persone o gruppi di persone (ad esempio: i giapponesi sopravvissuti alle esplosioni nucleari di Hiroshima e Nagasaki; i lavoratori e le popolazioni limitrofe esposti alle conseguenze di incidenti in installazioni nucleari).

Si è potuto così stabilire che la probabilità di insorgenza di cancro o leucemia è elevata per alte dosi, mentre è assai limitata per basse dosi.



Impatto ambientale in caso di incidente

Mappa della contaminazione da cesio-137 conseguente all'incidente di Chernobyl in Bielorussia, Ucraina, Russia. Le zone rese inabitabili e quindi poste sotto sequestro si trovano entro un raggio di circa 300 km dalla centrale.

L'impatto ambientale in caso di incidente grave in una centrale è una delle preoccupazioni che riguardano l'uso civile dell'energia nucleare. Non è tuttavia l'unico impatto possibile: anche l'estrazione, la purificazione e l'arricchimento dell'uranio comportano notevoli impatti ambientali, non solo dal punto di vista della semplice radioattività, ma anche in termini di consumo di risorse idriche ed energetiche nonché l'uso di sostanze chimiche (fluoro, acido solforico) per l'attività di produzione del combustibile nucleare. Il trasporto e lo stoccaggio delle scorie nucleari comporta infine notevoli rischi potenziali.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale in caso di incidente, un criterio fondamentale di radioprotezione è che maggiore è la distanza dal sito dell'incidente, minore è il rischio. Questo aspetto è stato tragicamente riscontrato con il Disastro di Chernobyl del 1986: benché la nube radioattiva abbia percorso praticamente tutta l'Europa con gravi conseguenze, va rilevato che le aree circostanti la centrale sono tuttora inadatte alla permanenza umana (fu evacuata un'area di circa 30 km di diametro), mentre così non è per il resto d'Europa.

Il motivo di questa differenza va ricercato nella tipologia di emissioni radioattive: gli elementi più pesanti ed a emivita lunga-lunghissima (uranio, plutonio...) tendono infatti a ricadere nelle immediate vicinanze di un impianto severamente danneggiato. Viceversa elementi altamente radioattivi ma leggeri ed a vita relativamente breve-brevissima (cesio, iodio ed in generale i prodotti di fissione) tendono a "volare" più facilmente e quindi coprire ampie distanze. Il tempo di permanenza "in volo" permette tuttavia ad una quota di radioattività di decadere, per cui maggiore è la distanza dal sito incidentato minore sarà l'impatto radioprotezionistico. Naturalmente anche le condizioni meteorologiche hanno una notevole importanza nel trasportare o far cadere al suolo gli elementi radioattivi. In considerazione di ciò, non è corretto affermare che la presenza di centrali nucleari oltreconfine (Francia, Svizzera) determini situazioni analoghe all'avere impianti sul territorio italiano: in genere l'area di maggior controllo in caso di incidente severo è stimata in 50–70 km dal sito, corretta in base alla situazione meteo.