

Scienza e Pace

Science & Peace

ISSN 2039-1749

Vol. XIII, No 1 (2022)

Quando il nucleare per la pace può diventare un'arma: i rischi di un attacco militare alla centrale ucraina di Zaporizhzhia

Alessandro Rizzo
Enrico Borra

*Online Journal of the "Sciences for Peace"
Interdisciplinary Centre - University of Pisa*



This paper has been refereed through double-blind peer review

Received: 29 August 2022.

Accepted: 3 November 2022.

To cite this article:

Rizzo, A., Borra, E. (2022), “Quando il nucleare per la pace può diventare un’arma: i rischi di un attacco militare alla centrale ucraina di Zaporizhzhia”, *Scienza e Pace*, XIII (1), pp. 55-83.

Creative Commons BY-NC-SA 4.0



Quando il nucleare per la pace può diventare un'arma: i rischi di un attacco militare alla centrale ucraina di Zaporizhzhia

Alessandro Rizzo^{*}, Enrico Borra^{}**

Abstract

La possibilità che una centrale nucleare operativa sia colpita in un attacco durante operazioni militari è diventata di drammatica attualità nell'odierna crisi ucraina. Gli incidenti ipotizzabili in tale scenario si dividono, a seconda della tipologia di attacco, in incidenti di criticità oppure incidenti convenzionali. I primi potrebbero verificarsi nel caso in cui sistemi ausiliari e di sicurezza del reattore venissero colpiti simultaneamente, provocando un raggiungimento incontrollato della criticità del reattore. I secondi, potrebbero comportare il rilascio di radioattività nell'ambiente a seguito di detonazioni ed incendi in siti della centrale contenenti materiale radioattivo. Spesso ed in modo scorretto negli ultimi mesi, commentando gli eventi accaduti alla centrale di Zaporizhzhia a partire da Marzo 2022, i media hanno paragonato la portata delle conseguenze di tali attacchi a quelle dell'utilizzo di un'arma nucleare tattica. Dal punto di vista della letalità per la popolazione, dei radionuclidi coinvolti, dell'entità della contaminazione dell'ambiente i due eventi sono profondamente diversi. Il presente lavoro, a carattere esplicativo, si propone di studiare l'impatto sull'uomo e sull'ambiente delle conseguenze di un attacco militare alla centrale e quelle della detonazione di un ordigno nucleare tattico della potenza di 10 kt (kiloton).

Parole chiave: Centrale nucleare, Zaporizhzhia, Attacco militare, Testata nucleare tattica, dose.

[†] Gli autori tengono a ringraziare i revisori anonimi per le loro indicazioni e Carlo Schaerf, Sandro Sandri e Luca Falconi per i loro importanti suggerimenti e le loro considerazioni, che hanno contribuito molto alla redazione del presente lavoro.

^{*} Alessandro Rizzo è ricercatore sui temi della protezione radiologica e dell'emergenza nucleare presso l'Istituto di Radioprotezione (IRP) dell'ENEA ed Esperto di Radioprotezione di III grado.

^{**} Enrico Maria Borra è primo tecnologo presso l'Istituto di Radioprotezione (IRP) dell'Enea ed Esperto di Radioprotezione con esperienza ventennale nelle valutazioni radiologiche e nucleari.

Abstract

A direct strike on an operative nuclear power plant during military operations has become a possible dramatic scenario in the present Ukrainian crisis. Plausible accidents in such a scenario could be divided into criticality and conventional accidents. The former could occur if auxiliary and safety power plant systems are hit simultaneously, reaching the reactor criticality in an uncontrolled way. The latter could involve the release of radioactivity into the environment as a result of detonations and fires at power plant sites containing radioactive material. Often and incorrectly in recent months, commenting on events at the Zaporizhzhia power plant started on March 2022, the media have compared the consequences of such attacks to that of using a tactical nuclear weapon. From the standpoint of lethality to the population, radionuclides involved, and the extent of contamination of the environment, the two events are deeply different. This explanatory paper aims to study the impact on humans and on the environment of an attack's consequences on the Zaporizhzhia power plant and those of the detonation of a tactical nuclear warhead of 10 kt (kiloton).

Keywords: Nuclear power plant, Zaporizhzhia, military attack, nuclear tactical warhead, dose.

Introduzione

Il discorso del presidente russo Vladimir Putin del 21 Febbraio 2022, con cui ha riconosciuto le repubbliche indipendentiste del Donbass, oltre ad essere prodromico all'intervento militare in Ucraina, ha riacceso la paura di un conflitto atomico nel mondo. In tale atmosfera di apprensione, i fatti accaduti alla centrale nucleare di Zaporizhzhia fin dalle prime settimane dell'invasione hanno avuto molto risalto nei media occidentali, i quali spesso, oltre che informare, hanno proposto anche azzardate speculazioni sull'equivalenza delle conseguenze di un attacco deliberato ad una centrale rispetto a quelle dell'utilizzo di un'arma nucleare tattica. Non occorre essere degli esperti del campo per capire che le conseguenze dei due scenari sono molto diverse, sia

per i rischi per la popolazione sia per le caratteristiche del fall-out nucleare (impronta lasciata sul territorio nel tempo). Anche la sola evidenza storica mette in luce le diverse conseguenze sulla popolazione e sul territorio tra le detonazioni avvenute su Hiroshima e Nagasaki durante la seconda guerra mondiale e l'incidente di Chernobyl del 1986. Nel primo caso un gran numero di vittime è stato registrato immediatamente con l'esplosione, ma le città sono state ricostruite nello stesso luogo negli anni successivi, mentre nel caso di Chernobyl la maggior parte delle vittime è stato registrato nel tempo a causa degli effetti nocivi a lungo termine delle radiazioni ed ancora oggi Prypiat non è abitabile. Queste semplici considerazioni aiutano a capire che la fisica sottesa agli eventi è diversa e conseguentemente gli effetti sono diversi, anche se nell'immaginario comune, entrambi questi eventi si trovano sotto il grande 'ombrello' della parola nucleare, senza una chiara distinzione tra le loro conseguenze.

Con gli scontri del 4 Marzo 2022 tra le forze ucraine e quelle russe nei pressi della centrale nucleare di Zaporizhzhia e il successivo sorvolo di missili a bassa quota nei pressi della stessa centrale del 26 Aprile, il mondo ha iniziato a considerare uno scenario di guerra che storicamente non si era mai presentato, dove un incidente nucleare poteva essere generato da manovre militari e scontri nei pressi di un'installazione quale la centrale elettrica di Zaporizhzhia. Gli eventi di agosto poi, che hanno visto la centrale come obiettivo primario di attacchi militari, con danneggiamenti di alcuni sistemi secondari, hanno aumentato e rafforzato la preoccupazione per un incidente che potrebbe coinvolgere ampi territori abitati.

1. La centrale nucleare di Zaporizhzhia: ubicazione e caratteristiche

La centrale nucleare di Zaporizhzhia è la centrale più grande d'Europa che nel 2020 ha prodotto circa il 19% dell'elettricità utilizzata in Ucraina (Greenpeace 2022). Essa è situata sul bacino idrico di Kachovka sulla riva sinistra del fiume Dnepr, in prossimità della cittadina di Enerhodar e dista circa 60 km in linea d'aria dalla città di Zaporizhzhia (Figure 1 e 2).

La centrale è equipaggiata con 6 reattori VVER-1000 (acronimo russo per Reattore ad Acqua Pressurizzata, in inglese PWR – Pressurized Water

Reactor), ognuno capace di produrre 950 MW di potenza elettrica netta, per un totale di 6000 MW lordi. Ogni reattore è caricato con 163 elementi di combustibile di forma esagonale, ognuno dei quali ospita 312 barre contenenti pellets di biossido di uranio arricchito al 3.3 o 4.4% (Vettori 2003), per un totale di circa 80 ton di uranio in ogni VVER-1000. I reattori sono progettati per operare per 30 anni: le unità 1 e 2, le prime ad essere installate (i sei reattori sono stati installati nell'arco temporale che va dal 1984 al 1995), hanno superato tale limite ed hanno ottenuto un'estensione del tempo di vita (Power 2022).

La centrale è passata sotto il controllo dei russi nelle prime settimane dall'inizio dell'invasione e ad oggi si trova quasi sulla linea dei fronti separati fisicamente dal fiume Dnepr. Tale ubicazione ha reso purtroppo possibile ad oggi il coinvolgimento della centrale nelle azioni militari sul territorio.



Figura 1: Cartina delle località di interesse. Credits: Institute for the study of war.



Figura 2: Veduta dei sei reattori della centrale di Zaporizhzhia. I reattori sono dei VVER-1000/320s di fabbricazione sovietica, di tipo ad acqua pressurizzata (Pressurized Water Reactor o PWR) e ognuno è in grado di generare circa 950 MW netti di elettricità. Credits Energoatom.

2. Incidente di criticità e incidenti convenzionali: siti sensibili della centrale

In una centrale nucleare gli eventi emergenziali si possono dividere in incidenti di criticità o incidenti convenzionali. Gli incidenti di criticità includono tutte quelle emergenze che nascono dal raggiungimento incontrollato della condizione di criticità del reattore, come successe a Chernobyl dove tale condizione portò all'esplosione di vapore del nocciolo con le conseguenze oggi ben note (WNA 2022). Incidenti di tipo convenzionale sono invece tutti quelli che comportano un rilascio (potenziale o reale) di radioattività dall'interno della centrale all'esterno di essa, in seguito a eventi esterni come ad esempio un incendio o l'esplosione di un ordigno bellico anche in siti diversi dagli edifici dei reattori. Nel caso specifico della centrale di Zaporizhzhia, è lecito domandarsi quale tra questi due scenari ha la maggiore probabilità di accadimento nella situazione ucraina odierna.

Per dare una risposta a questa domanda occorre considerare la tipologia di attacco in cui la centrale può essere coinvolta, a partire dagli eventi che sono stati registrati dall'inizio delle operazioni belliche in Ucraina fino ad oggi, riportati nella Tabella 1.

Data	Evento	Fonte
3-4 Marzo '22	Le forze russe prendono il controllo della centrale. Scontri con le forze ucraine. Distrutta una struttura per l'addestramento dei tecnici nucleari. L'incendio ha interessato la parte esterna di uno dei 6 reattori al momento non funzionante poiché sotto ristrutturazione.	New York Times: 3 Marzo '22
26 Aprile '22	Sorvolo a bassa quota di missili da crociera russi sopra la centrale.	Reuters: 26 Aprile '22
5 Agosto '22	Tre attacchi alla centrale, colpite due linee elettriche di approvvigionamento alla centrale.	TASS: 5 Agosto '22
6 Agosto '22	Attacco al deposito del combustibile nucleare esausto.	Interfax-Ukraine 10 Agosto '22
11 Agosto '22	Sono stati registrati 10 colpi nell'area della centrale. 5 hanno interessato l'officina delle saldature e 5 la caserma dei pompieri, poco fuori dall'area della centrale.	Ukrinform 15 Agosto '22

Tabella 1: Maggiori eventi che hanno interessato la centrale al 15 Agosto '22.

Sono indicate le fonti che con maggior dettaglio forniscono i dati tecnici, confermati da fonti indipendenti, come la IAEA.

Facendo riferimento alla Tabella 1, è possibile suddividere le tipologie di attacchi in deliberati, dove la centrale è obiettivo primario (eventi di Agosto), e attacchi il cui obiettivo non è la centrale stessa, ma che colpiscono, o che possono colpire questa come bersaglio collaterale (eventi di Marzo e Aprile).

Sia nel caso di attacco deliberato che non, incidenti di tipo convenzionale generati ad esempio dall'esplosione di ordigni bellici in zone particolarmente sensibili dell'impianto, con rilascio reale o potenziale di radioattività all'esterno del sito della centrale sono quelli con maggiore probabilità di accadimento rispetto incidenti di criticità. Questi ultimi hanno probabilità non nulla di accadere prevalentemente in attacchi deliberati, soprattutto se questi si prefiggono tale risultato come obiettivo dell'operazione.

Considerando il caso specifico della centrale di Zaporizhzhia, dove i sistemi di raffreddamento dipendono in modo critico dalla rete elettrica, dalla disponibilità di tecnici nucleari e personale qualificato (l'automazione è limitata) e dell'accesso all'equipaggiamento in caso di emergenza (Burnie 2022), sarebbe possibile indurre un incidente di criticità colpendo simultaneamente i sistemi ausiliari del reattore (raffreddamento, collegamento alla rete elettrica e generatori diesel d'emergenza, vedi Figura 3) e impedendo al contempo al personale tecnico di raggiungere i punti chiave del reattore. Per scatenare un incidente di criticità potrebbe essere sufficiente anche solo colpire 2 o 3 di questi obiettivi, almeno i sistemi di raffreddamento ed il collegamento alla rete elettrica, sui 4 elencati.



Figura 3: Veduta dall'alto della centrale. 1) Torri di raffreddamento 2) Bacino di Raffreddamento 3) Reattori 4) Sito stoccaggio combustibile esausto (SFDSF) 5) Uffici teatro degli scontri del 4 Marzo 6) Piloni Elettrici. Credits: Google maps.

Tale tattica richiederebbe una conoscenza approfondita della centrale (che nel caso specifico entrambe le parti belligeranti hanno) e avrebbe verosimilmente

una probabilità di successo maggiore rispetto a quella di un attacco diretto al reattore, protetto dal cemento armato dell'edificio e dello schermo biologico. Tali eventi non sono considerati nelle valutazioni del presente lavoro a causa della grande variabilità in termini gravità dell'incidente e delle possibili ricadute sulla popolazione e sul territorio, che non ne permettono una stima realistica.

Per quanto riguarda gli incidenti di tipo convenzionale, essi possono variare molto in termini di ricadute sul territorio e sulla popolazione in funzione dell'ordigno coinvolto nell'attacco e del sito della centrale colpito.



Figura 4: Contenitori in cemento (Cask) contenenti le barre esauste immagazzinate 'a secco'. Credit NNEGC Energoatom

A parte gli stessi edifici dei reattori, i siti sensibili della centrale di Zaporizhzhia, che se colpiti potrebbero essere coinvolti in incidenti convenzionali con ricadute massicce in termini di radioattività sul territorio e sulla popolazione riguardano i siti di stoccaggio del combustibile esausto (Castelvecchi 2022).

La centrale di Zaporizhzhia, dopo l'indipendenza dell'Ucraina dalla Russia siglata nel 1992, immagazzina infatti direttamente in loco il combustibile esausto non potendolo più mandare al riprocessamento in Russia. In particolare, il combustibile, dopo aver trascorso circa 5 anni nelle piscine di

raffreddamento, è immagazzinato 'a secco' in posizione verticale in contenitori di cemento areati (Cask – modello VSC-24 progettati dalla Sierra Nuclear (IAEA-CN-102)) posti fuori dal corpo principale dei reattori, in un'area all'aperto all'interno dei confini della centrale stessa (spent-fuel dry storage facility – SFDSF, Figura 3 e 4). L'SFDSF può contenere 9000 elementi di combustibile irraggiato in 380 Cask, ognuno della capacità di 24 elementi (SFDSF 2022). Il deposito ha iniziato ad essere operativo nel settembre 2001, ma l'autorità ucraina per la sicurezza nucleare limitò il riempimento dei cask a 22 elementi, al fine di rafforzare la condizione di sotto-criticità nello stoccaggio del materiale (IAEA-CN-102).

Tale deposito ad oggi rappresenta uno degli azzardi maggiori della centrale nello scenario di attacco militare, poiché, situato esternamente agli edifici dei reattori, esso risulta meno protetto rispetto alle piscine per lo stoccaggio del combustibile esausto, che si trovano nel corpo principale all'interno della struttura di contenimento (IAEA-Report93).

Nonostante la posizione più riparata delle piscine di raffreddamento, occorre comunque considerare che un colpo che riuscisse a raggiungerle potrebbe portare non solo al rilascio diretto dei radionuclidi contenuti negli elementi nell'ambiente esterno, ma anche il rilascio di acqua contaminata che potrebbe raggiungere le falde acquifere o addirittura raggiungere il punto di ebollizione aero-disperdendo i radionuclidi su una vasta zona. Se fossero invece i Cask ad essere colpiti i radionuclidi potrebbero essere ulteriormente aerodispersi a causa dell'incendio che si svilupperebbe immediatamente dopo l'esplosione.

3. Massimo incidente convenzionale ipotizzabile

Il presente lavoro si prefigge di studiare la ricaduta sulla popolazione e sul territorio della radioattività rilasciata a seguito di un plausibile incidente convenzionale. Un incidente di criticità sembra infatti un obiettivo che poco probabilmente si prefiggono i due schieramenti in campo (anche se potrebbe comunque essere causato con bassa probabilità dagli attacchi inconsulti alla centrale, quali quelli a cui abbiamo assistito fino ad oggi). Questo poiché, a parte le conseguenze che potenzialmente potrebbero coinvolgere l'intero

territorio europeo compresa la Russia, un incidente di criticità comporterebbe a livello tattico-strategico per i due schieramenti:

- l'esposizione delle proprie truppe e conseguente inabilità a combattere se coinvolte nel fall-out;
- l'interdizione del territorio interessato per svariati anni alle truppe di entrambe gli schieramenti, che diventerebbe un ostacolo all'avanzamento delle truppe sia ucraine (riconquista) che russe (conquista);
- inutilizzabilità dell'area interessata, perdita delle risorse economiche e conseguente flusso migratorio della popolazione da quest'area;
- possibile esposizione della popolazione, non solo della zona di Odessa e Kiev, ma anche del territorio russo.

Per gli incidenti convenzionali il discorso potrebbe essere diverso: le parti potrebbero infatti giudicarli più gestibili e con impatto minore sul territorio, a partire da una supposta minore estensione della zona di fall-out, sfruttando l'accadimento per ottenere un vantaggio strategico (o anche solo politico, accusando la parte avversa di aver condotto una operazione sotto false-flag). Tuttavia sembra più probabile, almeno in termini di frequenza di accadimento, che un incidente convenzionale possa essere causato accidentalmente, ad esempio durante il sorvolo dell'impianto di missili a bassa quota, come quanto avvenuto ad Aprile.

In questo lavoro si ipotizza che uno dei cask dell'SFDSF venga colpito da un missile ed il suo contenuto, pari a 22 elementi di combustibile stoccati, venga interamente disperso nel territorio circostante. Tale ipotesi è stata preferita al danneggiamento delle piscine di raffreddamento a causa dell'impossibilità di stimare correttamente il cosiddetto *leakpath factor* (*LF*), ovvero quanto materiale coinvolto nell'incidente, riesca effettivamente a fuoriuscire attraverso la breccia fatta dal missile nell'edificio del reattore. Tale impossibilità è dovuta al fatto che le piscine di raffreddamento si trovano nel corpo principale dei reattori, costituito da mura di cemento di elevata resistenza e spessore, dove è impossibile valutare a priori l'entità della breccia che provocherebbe un missile. Per un cask è invece ragionevole ipotizzare che tutti gli elementi di combustibile contenuti siano coinvolti nell'esplosione, rilasciando tutto il loro contenuto nell'ambiente (*leakpath factor* uguale ad 1).

4. Impatto di un missile sul deposito del combustibile nucleare esausto: termine sorgente

Il presente lavoro non si propone di indagare chi è l'autore degli attacchi alla centrale, considerando soprattutto la guerra di informazione esistente tra i due schieramenti, i quali cercano di addossare all'avversario la responsabilità degli accadimenti. Poiché le conseguenze di un attacco all'SFDSF sono funzione della potenza della testata esplosiva, sono state analizzate le tipologie di missili utilizzate dai due schieramenti al fine di ottenere una stima realistica di un ordigno il cui impatto potrebbe comportare l'effettiva dispersione di materiale radioattivo nello scenario considerato. I missili considerati sono:

- Missile di tipo **Kalibr** (designazione NATO SS-N-30A) in dotazione all'esercito russo, può essere armato con una testata convenzionale con una potenza fino a 0.5 t (MTreath2022). Vola a bassa quota e può cambiare rapidamente direzione per non essere intercettato. Raggio 1500-2000 km (MTreath2022_1).
- Missile di tipo **R-360 Neptun**, in dotazione all'esercito ucraino per obiettivi navali, che opportunamente riprogrammato può essere utilizzato per colpire bersagli a terra. Ha una testata di 0.15 ton e un raggio fino a 300 km (Military2022).
- Missili di tipo **M30/M31**, in dotazione all'esercito ucraino con i lanciatori HIMARS. Essi hanno una testata di circa 0.1 ton ed un raggio di 80 km (Bulgarian2022).
- Missile **Iskander** (designazione NATO SS-26 "Stone"), in dotazione all'esercito russo. Ha una testata di circa 0.5 ton ed un raggio di azione di circa 500 km (MTreath2022_2).

Considerando le caratteristiche di cui sopra è ragionevole ipotizzare per il massimo incidente la deflagrazione di una testata pari a 0.5 ton di esplosivo (la massima). Occorre considerare che i missili possono essere armati con testate diverse, che possono anche essere del tipo altamente penetrante e altamente esplosivo. Tale variabilità non è però riproducibile nel codice di calcolo utilizzato in questo studio (vedi più avanti), per questo si considera esplosivo convenzionale (TNT).

Il termine sorgente considerato a seguito dell'impatto, è il contenuto di 22 elementi di combustibile esausto di un reattore di tipo PWR (come quelli di Zaporizhzhia) contenuti in un cask dell'SFDSF, ognuno dei quali contiene 487 kg di Uranio (inizialmente arricchito con U-235 al 2.3%*) con un burn-up di 33 MWd kgU-1 (CNWRA 93-006). L'ipotesi secondo cui tutto il contenuto del cask sia coinvolto nell'esplosione (parametro Damage Ratio o DR nella simulazione posto uguale ad 1), anche se cautelativa, risulta comunque ragionevole, considerando una resistenza nominale al picco di sovrappressione dei cask occidentali (NUREG2007) pari a circa 10 psi (circa 70 kPa) e un'onda d'urto superiore a 100 psi entro 10 metri dal punto di esplosione per una testata di 500 kg di TNT (risultati di HotSpot, vedi il paragrafo 5). Al fine di valutare realisticamente l'impegno di dose alla popolazione e l'estensione del fall-out si è fissata la percentuale di materiale radioattivo disperso in aria come particolato pari al 60 % (AF=0.6) e la frazione respirabile di tale particolato pari all'80 % (RF=0.8, in modo da considerare anche il contributo di un incendio che si svilupperebbe subito dopo l'esplosione). Si è inoltre considerata la presenza di particelle balistiche (non respirabili) nella distribuzione delle componenti della nube.

Per la definizione del termine sorgente consideriamo il grafico in Figura 5, che mostra la differenza in termini di attività di un elemento appena estratto dal reattore, ad un anno dell'estrazione e a 10 anni dall'estrazione. Un elemento di combustibile appena estratto presenta una radioattività molto elevata, dovuta in gran parte dai radionuclidi a breve tempo di dimezzamento (ad esempio della famiglia dello Xeno e dello Iodio) che contribuiscono all'attività dell'elemento per circa il 70%. Lo stoccaggio in piscina di raffreddamento per 5 anni, come nel caso della centrale di Zaporizhzhia, consente, sfruttando il tempo di decadimento di questi radionuclidi, di abbassare considerevolmente la radioattività della barra consentendone lo stoccaggio 'a secco' nell'SFDSF.

* I dati tabulati considerati in questo lavoro fanno riferimento ad elementi di combustibile esausti di centrali PWR di tipo occidentale. Le attività considerate sono state scalate alla massa effettiva dei singoli elementi utilizzati nelle centrali russe pari a 487 kg rispetto i 461 di una centrale di tipo occidentale. I reattori di tipo VVER1000 utilizzano combustibile con arricchimento di U-235 leggermente superiore (3.3% o 4.4%) rispetto al 2.3% delle centrali occidentali. I dati tabulati nella referenza (CNWRA 93-006) sono comunque rappresentativi per valutare l'impatto sulla popolazione e sul territorio in caso di incidente nucleare.

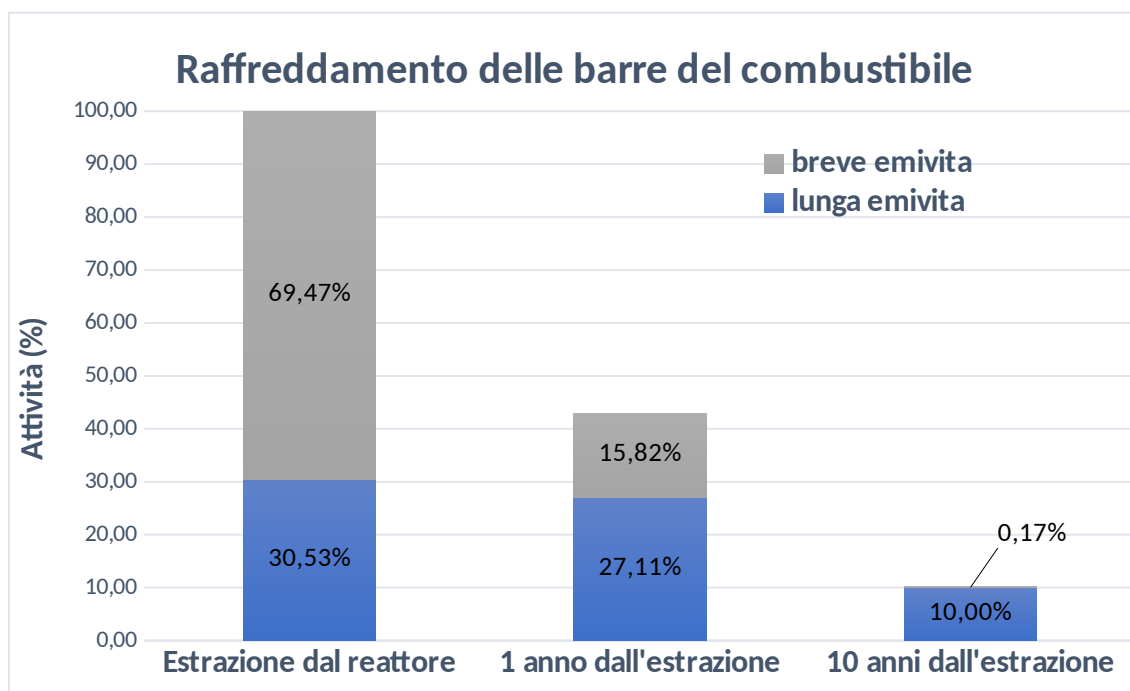


Figura 5: Andamento del contenuto di radioattività in seguito al raffreddamento delle barre di combustibile, al momento dell'estrazione dal reattore, ad 1 anno e 10 anni dall'estrazione. Nel grafico sono riportate le attività percentuali calcolate rispetto l'attività totale delle barre appena estratte (100%), dove il contributo dei radionuclidi a breve tempo di dimezzamento (minore o uguale ad 1 anno) e lungo tempo di dimezzamento (superiore ad un anno) è esplicitato. La barra al momento dell'estrazione ha un'attività totale di 2.88 MCi (2.88 milioni di Curie), pari all'attività di 2.88 ton di radio (Ra-226).

Lo stesso grafico permette di sottolineare anche il rischio nel caso in cui una delle piscine di raffreddamento venisse colpita da un ordigno: in questo caso, oltre ad esposizioni massicce della popolazione potenzialmente coinvolta, si avrebbe anche una maggiore estensione della contaminazione del territorio, poiché molti radionuclidi non ancora decaduti sono in forma maggiormente volatile. Come già indicato, il presente lavoro non analizza tale scenario.

5. Detonazione di una testata nucleare tattica: termine sorgente

Dato il carattere esplicativo del presente articolo e considerando le errate equivalenze fatte troppo spesso dai media riguardo le conseguenze di un attacco alla centrale e l'esplosione di un ordigno nucleare tattico, le

conseguenze dell'incidente convenzionale sono confrontate in questo lavoro con il fall-out dell'esplosione al suolo di un ordigno nucleare all'uranio della potenza di 10 kt (kiloton). Il valore della testata è stato scelto poiché considerato rappresentativo degli ordigni a basso potenziale presenti nell'arsenale russo non-strategico del sottogruppo tattico (gittata utile sotto i 5500 km in grado di colpire il territorio nemico fino a 300 km dalla linea del fronte (RUSI 2022)), la maggior parte dei quali hanno potenze che spaziano dalla frazione di kt fino a circa 25-50 kt (FOIR 2005). Occorre comunque considerare che la sola classificazione in termini di potenza delle testate non consente una discriminazione assoluta tra ordigni tattici e strategici. Basti pensare agli ordigni fatti esplodere su Hiroshima e Nagasaki, che ad oggi potrebbero essere classificati come bombe tattiche in termini di potenza, ma il cui uso sulle città ne ha fatto ordigni strategici che hanno spinto il Giappone alla resa nella seconda guerra mondiale.

Al momento dell'esplosione i radionuclidi più importanti in termini di dose agli individui immediatamente a seguito dell'esplosione sono riportati nel grafico mostrato in Figura 6 (Kraus 2022).

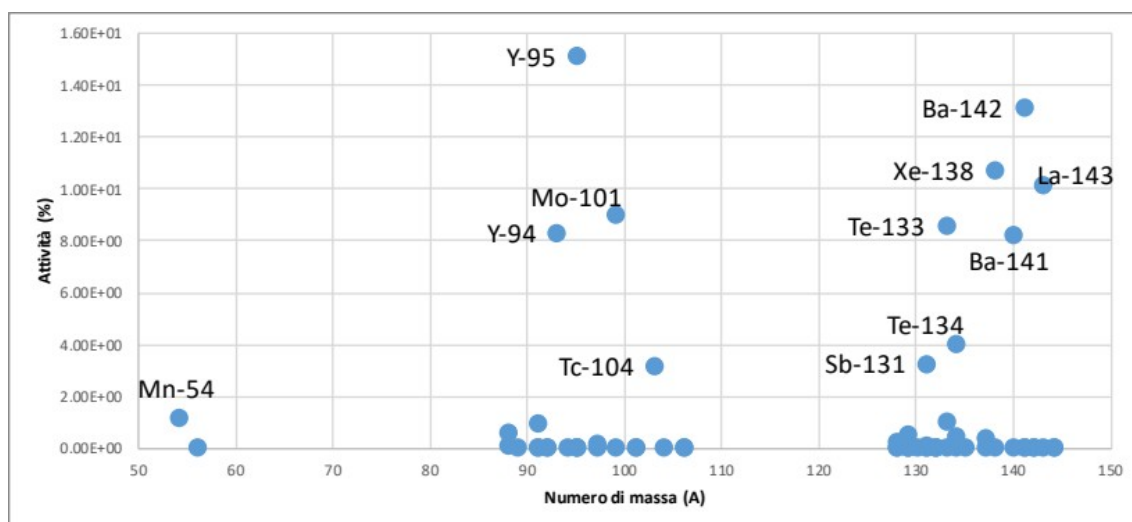


Figura 6: Caso dell'esplosione di un ordigno nucleare tattico di 10 kt all'uranio. Percentuale di attività dei singoli radionuclidi che maggiormente contribuiscono alla dose alla popolazione in funzione del loro numero di massa A. L'etichetta riportante il nome del radionuclide è mostrata per i soli radionuclidi più significativi.

Dal Grafico riportato in Figura 6 è possibile notare che la maggior parte dei radionuclidi considerati sono quelli prodotti dalla fissione (due gruppi, quello con

A tra 90 e 110 e quello con A tra 130 e 145, valori pari a circa la metà del numero di massa dell'uranio fissile 235), in misura decisamente minore (<2%) i prodotti di attivazione neutronica quali il Mn-54 o il C-14, che si forma a seguito della cattura di due neutroni da parte dell'isotopo stabile C-12 con una presenza abbondante nell'aria.

6. Impatto sull'ambiente e sulla popolazione: scenari a confronto

Lo studio dell'impatto sull'ambiente e sulla popolazione nel caso di incidente convenzionale e nel caso della detonazione della testata tattica all'uranio di 10 kt è stato condotto in questo studio con il software HotSpot dei Livermore National Labs (HotSpot 2022).

Prima di procedere al confronto occorre sottolineare che nel caso di detonazione della testata nucleare, sono state considerate le sole vittime dovute alle radiazioni e non quelle dovute agli altri effetti dell'esplosione. Come già evidenziato in precedenza nel caso considerato la gran parte delle vittime, circa il 50%, è provocato dall'onda d'urto (raggio stimato 440 m), circa il 35% dall'onda di calore (entro 1.4 km si verificano ustioni di terzo grado) e soltanto il 15% dalle radiazioni, suddiviso a sua volta nel 5 % di vittime nel primo minuto ed il 10% negli anni seguenti (risultati di HotSpot).

Esplosione della testata nucleare tattica. Considerando le vittime dovute alle radiazioni, la detonazione di una testata tattica presenta due termini sorgenti: la radiazione 'prompt', emessa interamente nel primo minuto dopo l'esplosione, costituita da fotoni e neutroni generati durante il processo di fissione e la cosiddetta radiazione 'residua', dovuta al decadimento dei radioisotopi formati nella fissione che si disperdono sul territorio circostante formando la cosiddetta nube di fall-out. Nella radiazione residua si devono considerare anche i radionuclidi di attivazione, che si formano a seguito dell'irraggiamento dei materiali che circondano il punto di esplosione da parte dei neutroni 'prompt'.

Per quanto riguarda la nube di fall-out nucleare dovuto alla testa tattica i modelli di valutazione della dose indicano una diminuzione del contributo dovuto all'irraggiamento (sommersione da nube e irraggiamento da terreno contaminato)

in favore del contributo dovuto all'inalazione all'aumentare della distanza. Questo fenomeno è facilmente spiegabile considerando il diametro del particolato: il particolato più grande ricade nelle vicinanze dell'esplosione e la sua dimensione lo rende meno respirabile. Quello con diametro più piccolo viaggia per percorsi maggiori e le sue dimensioni lo rendono inalabile dagli individui. Nel caso considerato il fall-out è solo locale poiché la testata è supposta detonare a terra con una nube che può svilupparsi fino ad un massimo di 8 km. Nel caso di bombe più potenti o di detonazioni in atmosfera, se la nube supera i 10 km di quota, il particolato più fine può iniziare a viaggiare negli strati più alti dell'atmosfera (stratosfera) e può ricadere dopo molto tempo, coinvolgendo l'intero pianeta. Si parla in questo caso di fall-out globale (Simon 2006).

Incidente convenzionale – cask colpito da un missile. Nell'esplosione di un ordigno convenzionale nell'ipotesi in studio che coinvolge un cask contenente 22 elementi esausti di combustibile nucleare, non vi è l'equipollente della radiazione prompt emessa nella detonazione della testata tattica nucleare. Avviene la dispersione del materiale radioattivo in aria con una nube di fall-out, che segue in scale minori le dinamiche di deposizione indicate nel caso dell'ordigno nucleare. Anche in questo caso il particolato radioattivo con diametro più piccolo viaggia più lontano: considerando però il contenuto delle barre, in particolare gli elementi transuranici, la dose maggiore si ha, praticamente a tutte le distanze, per inalazione dei radionuclidi e non per irraggiamento.

Confronto. È stato indagato l'effetto dei due accadimenti nella prima ora, in funzione della distanza dal punto dell'esplosione e i risultati sono riportati in Figura 7.

Nella figura la dose da radiazione 'prompt' è riportata nelle colonne blu scuro, che fanno riferimento alla scala di dose in Gray (Gy), mentre le dosi dovute alle nubi di fall-out sono riportate nelle colonne azzurre (testata nucleare) e viola (incidente convenzionale) e sono espresse in termini di TEDE (Total Effective Dose Equivalent), che considera sia il contributo da irraggiamento esterno che quello da contaminazione interna, espressa in Sievert (Sv). Nel grafico sono riportate anche le distanze rispetto alcuni luoghi di interesse (perimetro della centrale, città e fiume Dnepr) dal sito del deposito SFDSF in funzione delle diverse direzioni del vento.

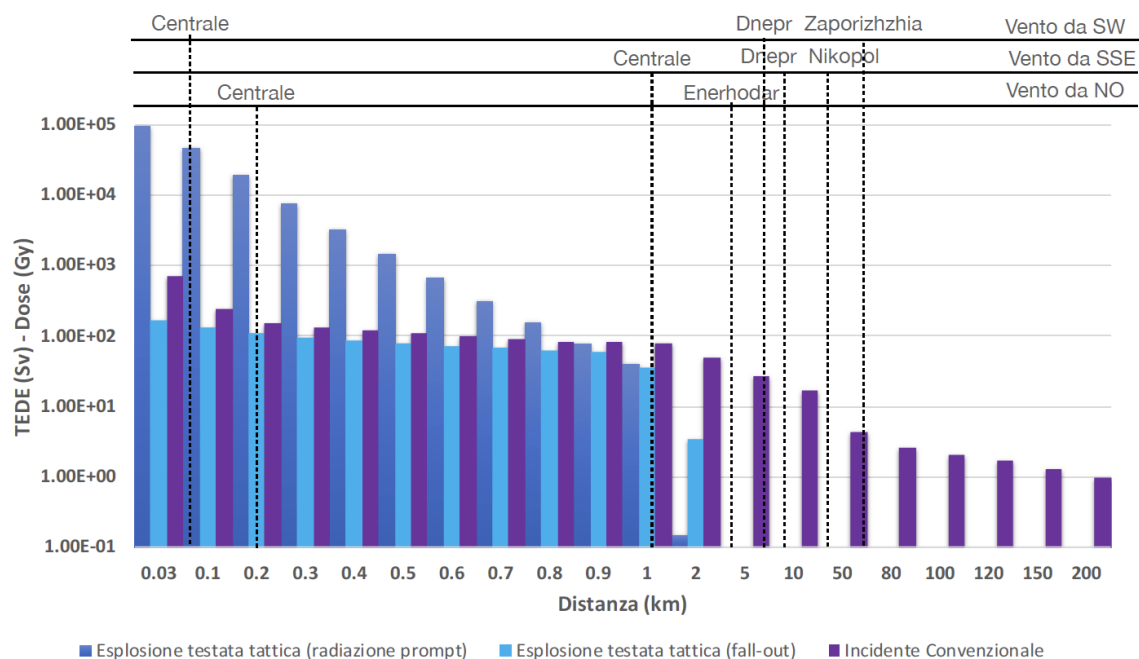


Figura 7: Dose alla popolazione nei due scenari nella prima ora dal momento dell'accadimento. Le linee tratteggiate indicano le distanze dal deposito SFDSF dei luoghi di interesse in funzione della direzione del vento.

Nel caso della radiazione prompt, si osservano le sindromi di irradiazioni acuta, quali quella del midollo osseo (dose superiore a 0.7 Gy), quella gastrointestinale (dose superiore a 6 Gy) e quella del sistema cardiovascolare e del sistema nervoso centrale (dose superiore a 10 Gy). La letalità, ovvero la probabilità di morte in un determinato intervallo di tempo, è stata calcolata in funzione della distanza dal punto della detonazione ed il risultato è mostrato in Figura 8.

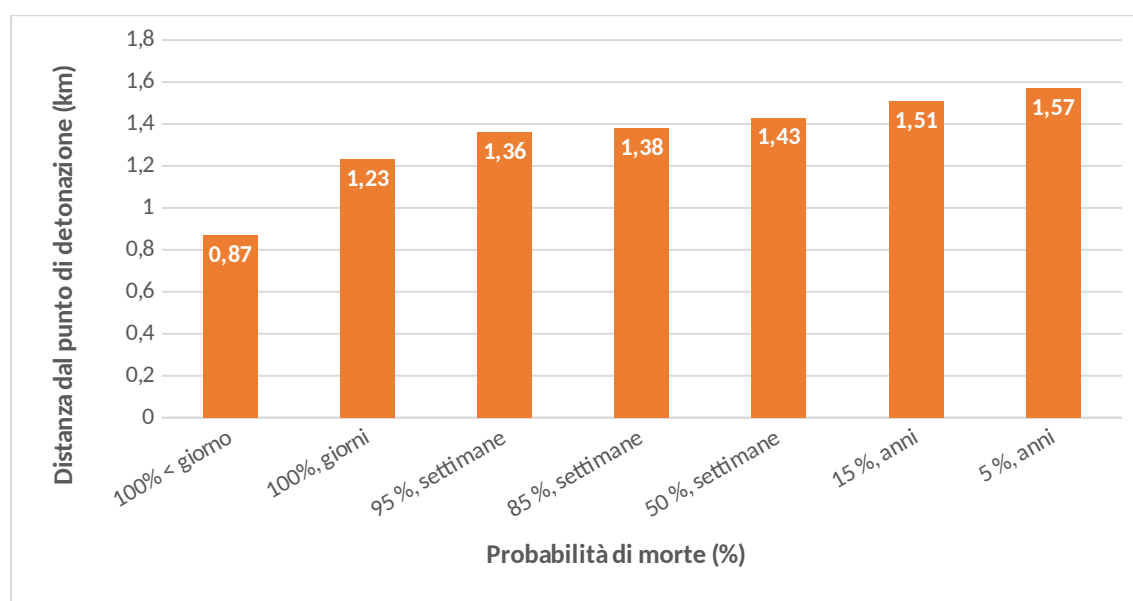


Figura 8: Esplosione a terra di una testata nucleare tattica di 10 kt all'uranio. Distanza dal punto della detonazione in funzione della letalità dovuta alle radiazioni (non sono considerate vittime da onda di pressione, onda di calore ed eventi convenzionali). La letalità è la probabilità di morte in un dato intervallo temporale, esplicitato nell'asse delle ascisse.

Considerando le distanze riportate in Figura 7, tali effetti riguarderebbero essenzialmente il sito della centrale e le prime case dell'abitato di Enerhodar.

Per quanto riguarda la nube di fall-out prodotta dalla testata nucleare, è possibile notare che nelle prime ore la sua estensione a terra è minore della nube di fall-out prodotta dall'incidente convenzionale. Tale caratteristica è imputabile alla maggiore altezza della nube (stimata a 8 km nel suo punto di massimo sviluppo) e una dispersione di particolato con diametro decisamente più piccolo rispetto al caso di quello prodotto da esplosivo convenzionale. Tale particolato impiega molto più tempo a depositarsi sul territorio e, su scale temporali maggiori, ne interessa potenzialmente di più.

Per quanto riguarda la nube di fall-out prodotta dall'incidente convenzionale, la maggior parte della dose (oltre il 98%) è dovuta all'inalazione del particolato radioattivo e dunque alla contaminazione interna. Solo la restante parte è imputabile all'irraggiamento esterno dovuto alla sommersione da nube (fall-out) e dall'irraggiamento da suolo contaminato. Nel caso di introduzione di radionuclidi, si parla di organi a rischio di ricevere una dose equivalente superiore a 0.5 Sv, che comporta l'insufficienza organica e anche lo sviluppo di lesioni nel tempo. I risultati sono riportati in Figura 9 per diversi organi considerati più a rischio.

Dal grafico in Figura 7 (colonne viola) e dal grafico in Figura 9 è possibile notare che, in funzione della direzione del vento, centri abitati come quello di Enerhodar, Nikopol e Zaporizhzhia possono essere interessati dal passaggio della nube, con dosi impegnate alla popolazione (dovute all'inalazione) che possono essere importanti, e che mettono a rischio la funzionalità di organi fondamentali.

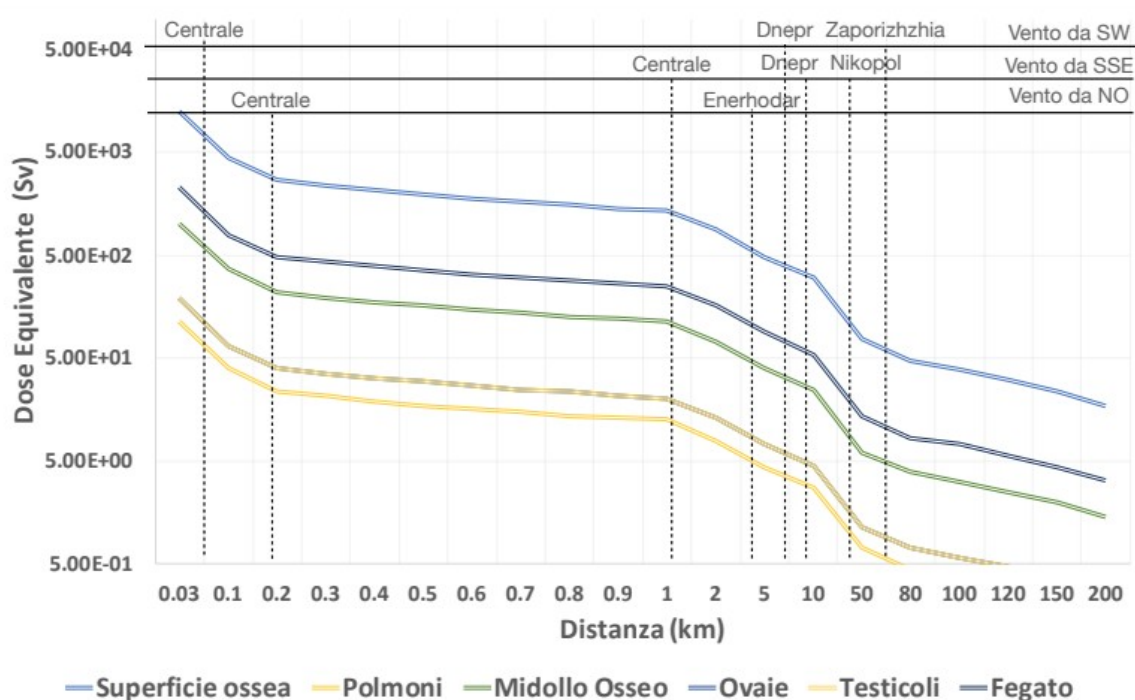


Figura 9: Organi maggiormente esposti, suscettibili ricevere una dose equivalente superiore a 0.5 Sv nel passaggio della nube di fall-out nel caso di incidente convenzionale, supponendo un'esposizione di 1 giorno.

In entrambi i casi si è calcolato il tempo in cui il fall-out si sviluppa sul territorio, raggiungendo i 200 km di distanza considerando condizioni meteorologiche del sito neutre (classe di Pasquil D), con velocità del vento pari a 2 m/s a 10 metri di altezza. La nube di fall-out dell'ordigno nucleare impiega circa 23 ore (early fall-out), contro le circa 16 ore della nube che si sviluppa nel caso di incidente convenzionale. Come già spiegato la differenza è imputabile sia alla differente altezza delle nubi (tra i 5 e gli 8 km nel caso della testa nucleare contro i 438 metri dell'esplosione convenzionale) sia al differente diametro del particolato proiettato in aria, considerevolmente più piccolo nel caso della testata nucleare (e che quindi tende a rimanere sospeso più a lungo negli strati atmosferici più alti).

Da questi primi risultati è possibile considerare che, nel caso di incidente convenzionale, vi è un tempo molto breve anche solo per ordinare il riparo al chiuso alla popolazione (misura protettiva), soprattutto in una situazione bellica come quella ucraina, dove la macchina del soccorso potrebbe essere rallentata da difficoltà oggettive. Inoltre sempre in tale scenario si avrebbe una contaminazione importante del sito della centrale che comporterebbe

sicuramente una problematica di non semplice soluzione anche della sola messa in sicurezza dei reattori.

Sono stati infine considerati gli effetti a lungo termine dei due eventi sul territorio e la sua abitabilità da parte della popolazione, supponendo sempre condizioni meteorologiche del sito neutre (classe di Pasquill D), con velocità del vento pari a 2 m/s a 10 metri di altezza e senza considerare lo strato di inversione (mixing) atmosferico che influisce sull'altezza delle nubi.

La grande variabilità di tali caratteristiche meteorologiche nel tempo e la forte dipendenza dei risultati di interesse da queste, non permettono infatti una scelta che sia realmente rappresentativa del caso reale. Per questo motivo nello studio condotto si è deciso di non considerarle in entrambi i casi, procedendo ad una valutazione comparativa degli effetti nei due scenari.

In particolare sono state calcolate l'estensione delle aree (in km²) dove, un ipotetico individuo, trascorrendovi 1 anno a partire da un dato momento seguente l'evento, è suscettibile ricevere una dose (sia per irraggiamento esterno che per contaminazione interna) superiore a 20 mSv/anno, oppure tra 20 ed 1 mSv/anno (in accordo con (Cevad 2010)). Valori che eccedono i 20 mSv fanno sì che il territorio sia interdetto (accesso solo a personale appositamente equipaggiato per un tempo limitato), quelli compresi tra 1 e 20 mSv/anno fanno sì che l'accesso (senza limiti temporali) a tale territorio sia comunque ristretto a personale appositamente equipaggiato, mentre per valori sotto 1 mSv/anno, il territorio può tornare ad esser abitato dalla popolazione. Nei grafici in Figura 10 sono riportati i risultati, con l'estensione delle aree valutate fino a 10 anni dall'accadimento.

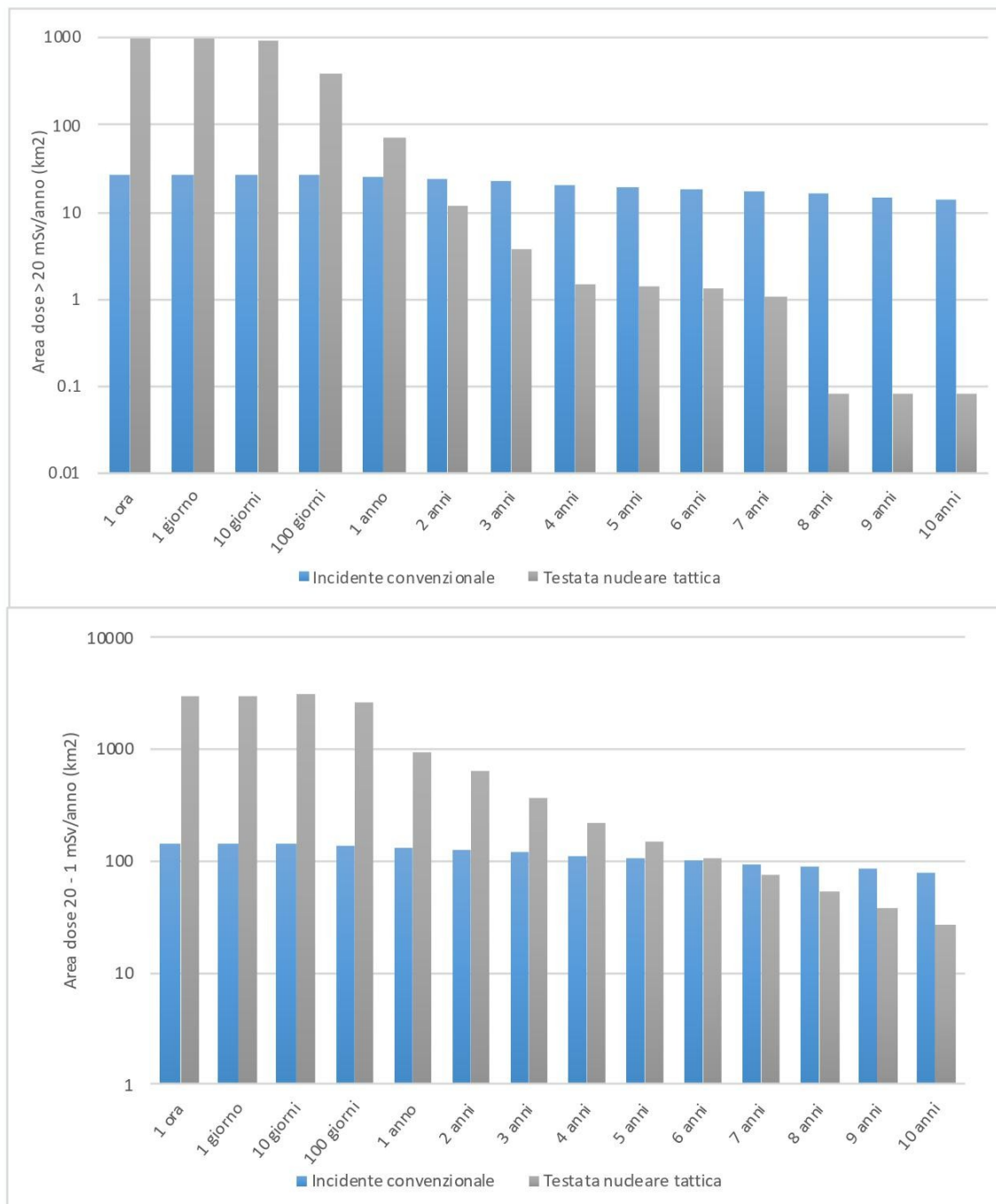


Figura 10: Estensione delle aree dove l'individuo è suscettibile ricevere una dose superiore a 20 mSv/anno (grafico in alto), tra 1 e 20 mSv/anno (grafico in basso). In blu sono riportati i dati relativi all'incidente convenzionale provocato dalla detonazione di un missile dove è coinvolto il contenuto totale di un cask dell'SFDSF (22 elementi), in grigio i dati relativi alla detonazione di un ordigno tattico all'uranio di 10 kt.

7. Discussione

Come è possibile notare dai grafici riportati nel paragrafo precedente, fino a circa 1 anno trascorso dall'accadimento dell'evento considerato, l'area interessata dal fall-out della testata tattica che comporta dosi superiori ai 20 mSv/anno o comprese tra questo valore ed 1 mSv/anno, risultano avere maggiore estensione di quelle che si generano a seguito dell'esplosione del missile che provoca un incidente convenzionale. L'ordine di grandezza delle aree contaminate in seguito al passaggio della nube di fall-out ed interdette è di un migliaio di km² per la testata tattica e dell'ordine di qualche decina di km² per l'esplosione convenzionale.

Nella valutazione delle zone colpite dal fall-out radioattivo occorre inoltre considerare che la centrale di Zaporizhzhia si trova sulle rive del fiume Dnepr: nello scenario di incidente convenzionale una contaminazione di tutto il corso d'acqua fino alla foce (passando per Kherson, con circa 300 mila abitanti), con i relativi problemi di contaminazione dei raccolti, dell'allevamento e della popolazione stessa (l'acqua è sia una matrice ambientale che alimentare) potrebbe essere più che probabile.

La stessa mole imponente degli edifici dei reattori non sarebbe sufficiente a schermare il fiume dalla nube di fall-out (vedi Figura 1 e Figura 2), poiché la sola nube dei detriti è stimata essere superiore ai 400 metri nel caso in studio.

D'altra parte è possibile notare che l'estensione delle zone interessate dal fall-out che segue la detonazione dell'ordigno tattico (Figura 10), si restringono nel tempo più velocemente di quelle interessate dall'incidente convenzionale. Tale caratteristica è facilmente spiegata dalla tipologia dei radionuclidi coinvolti nei due scenari. Nel caso della testata nucleare vengono prodotti dalla fissione molti radionuclidi a breve vita media, che sono quelli che maggiormente contribuiscono alla dose agli individui nel tempo immediatamente successivo all'esplosione.

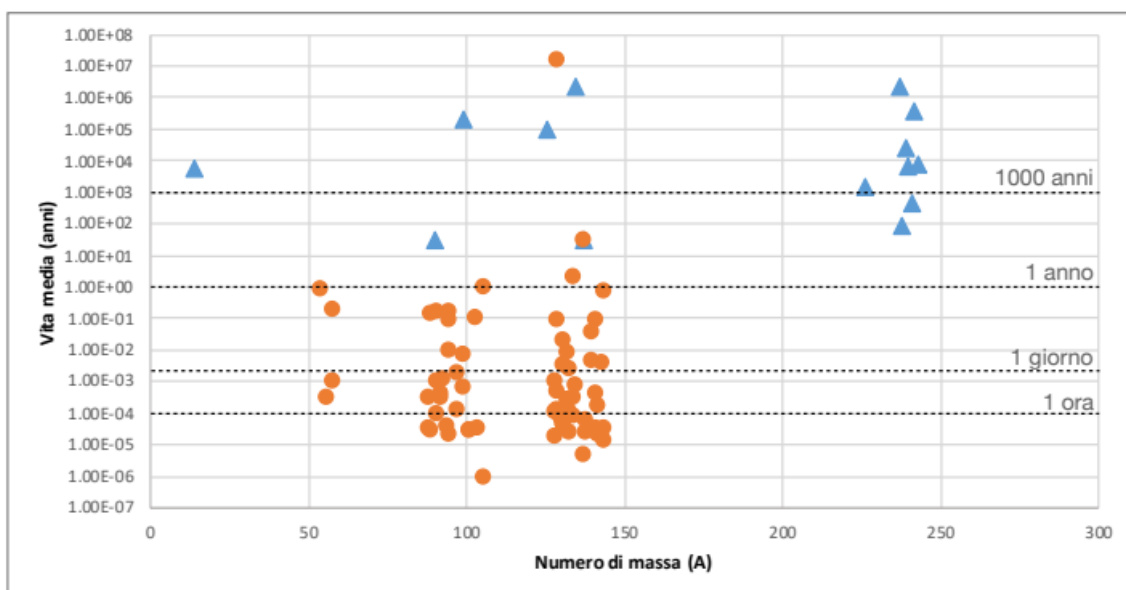


Figura 11: Vita media dei radionuclidi di interesse nei due scenari in studio in funzione del numero di massa (A) del radionuclide considerato. In arancione i radionuclidi di interesse nell'esplosione della testata nucleare tattica, in blu quelli prodotti nello scenario convenzionale prodotto dall'impatto del missile Kalibr.

Nel grafico in Figura 11 sono riportate le vite medie dei radionuclidi di interesse (quelli che maggiormente contribuiscono alla dose agli individui) nei due casi studiati in funzione del loro numero di massa. È possibile osservare che la maggior parte dei radionuclidi prodotti nella detonazione di un ordigno tattico hanno una vita media minore di un anno e provengono essenzialmente dal processo di fissione. Nel caso dell'incidente convenzionale tutti i radionuclidi di interesse hanno un'emivita maggiore di 10 anni (molti considerevolmente sopra questo valore), con i contributi più importanti dovuti ai prodotti della cattura neutronica a formare elementi transuranici quali americio, plutonio e curio.

Tutti questi sono alfa emettitori, e come tali presentano il maggior rischio in termini di dose impegnata per inalazione (rispetto emettitori beta-gamma), come riportato nel grafico in Figura 12.

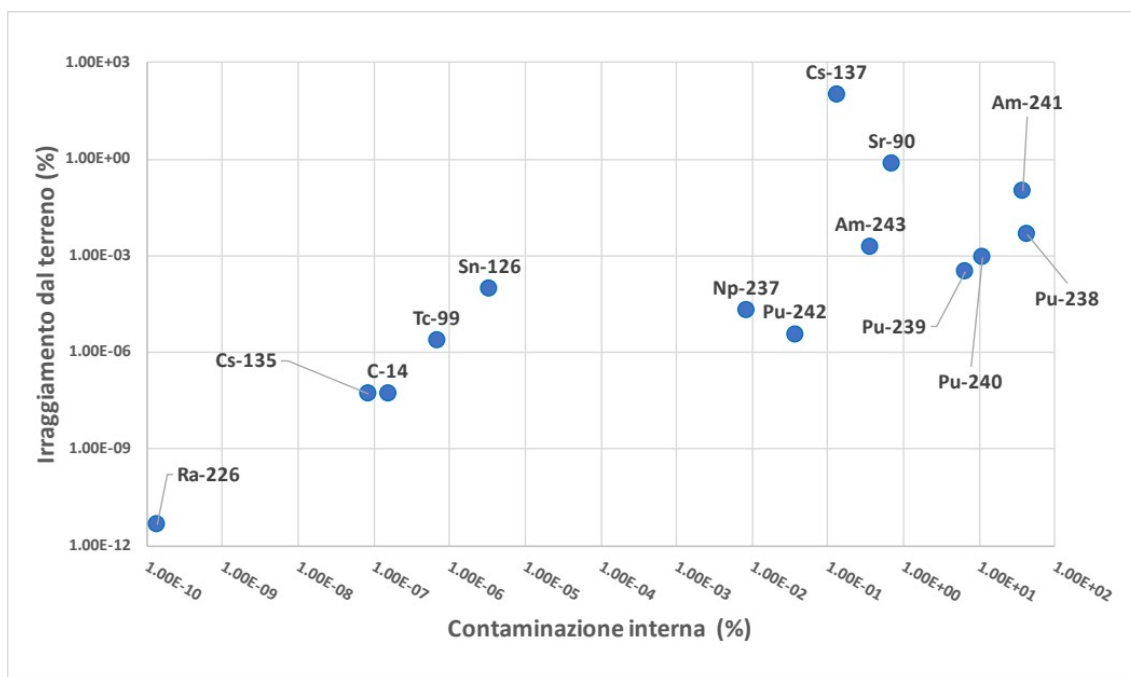


Figura 12: Incidente convenzionale - contributo percentuale dei radionuclidi alla dose da esposizione esterna (irraggiamento da terreno contaminato) e contaminazione interna (introduzione tramite respirazione dei radionuclidi risospesi in aria). È possibile notare che tutti i radionuclidi transuranici considerati, danno il maggior contributo di dose nel caso di contaminazione interna (inalazione). Gli unici radionuclidi prodotti di fissione, emettitori β/γ , che danno un contributo sostanziale alla dose da contaminazione interna, sono il Cs-137 e lo Sr-90.

Un'altra differenza fondamentale tra i due scenari è che nel caso di detonazione della testata tattica, la lista dei radionuclidi che maggiormente contribuisce alla dose all'individuo cambia nel tempo, a causa del decadimento e della formazione di altri radionuclidi (cosa, che a parità di intervallo temporale, è trascurabile nello scenario di dispersione di materiale della barra esausta). In particolare, per l'esplosione di una testata tattica, considerando i primi 5 radionuclidi in termini di contributo alla dose (sia per esposizione esterna che contaminazione interna) si ha (Kraus2022):

- **nelle prime 6-30 ore** il maggior contributo è dato dalle catene dello I-135, Zr-97, Sr-91, Sr-92 e Te-132;
- **entro i primi 1-2 giorni** il maggior contributo è dato dalle catene dello Zr-97, Te-132, I-135, I-133 e Sr-91;
- **entro i primi 5 giorni** il maggior contributo è dato dalle catene del Te-132, Zr-97, Ba-140, I-133 e I-135

- **entro il primo anno** il maggior contributo è dato dalle catene del Ba-140, Te-132, Zr-95, Zr-97 e I-133
- **entro i primi due anni** il maggior contributo è dato dalle catene dello Zr-95, Ce-144, Cs-137, Ru-106 e Mn-54

È possibile notare che la maggior parte dei radionuclidi che più contribuiscono all'impegno di dose alla popolazione sono prodotti dal processo di fissione, mentre soltanto su intervalli di tempo più lunghi iniziano a comparire nella lista anche radionuclidi di attivazione, come il Mn-54.

Conclusioni

Il lavoro presentato ha una natura esplicativa delle conseguenze dell'uso della forza militare su installazioni quali la centrale nucleare di Zaporizhzhia, ipotizzando le ricadute di un'esplosione di una testata di 0.5 ton su uno dei cask contenenti il combustibile irraggiato posti nell'area della SFDSF. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli calcolati per il fall-out dell'esplosione di una testata nucleare tattica all'uranio al suolo, evento che molte volte viene erroneamente equiparato ad un attacco diretto alla centrale.

In particolare il lavoro non si prefigge di calcolare delle quantità assolute in termini di impegno di dose e contaminazione dell'ambiente, ma piuttosto di avere una valutazione relativa delle conseguenze dei due attacchi, presentata in modo tale che anche un pubblico non addetto ai lavori possa comprenderla.

Purtroppo gli eventi a cui assistiamo oggi riguardanti la centrale di Zaporizhzhia potrebbero portare ad incidenti che, anche se non di criticità (la cui probabilità è comunque non nulla), potrebbero comunque avere ricadute molto più pesanti di quanto le due parti belligeranti possano valutare, o quanto meno, stiano valutando nel caso in cui perseguano questo obiettivo. Come già detto, il lavoro non si occupa di stabilire chi stia attaccando la centrale, ognuno può fare le proprie valutazioni autonomamente. Deve risultare prioritario evitare ogni attacco alla centrale e alle sue aree sensibili poiché le conseguenze sono difficilmente prevedibili e conseguentemente tantomeno gestibili. È importante che non vi sia impunità agli occhi del mondo: qualunque parte utilizzi la centrale

ed il suo territorio a scopi militari, tattici e/o strategici che mettano a rischio la popolazione e l'ambiente deve essere fortemente condannata dalla comunità internazionale e spinta a cessare immediatamente qualsiasi attività stia conducendo (che siano attacchi, movimentazione di truppe, sorvolo di missili).

In ultimo un richiamo al concetto di tabù nucleare e deterrenza. Il continuo riferimento all'utilizzo delle armi nucleari a cui stiamo assistendo nelle operazioni di propaganda mediatica delle classi dirigenti russe e occidentali, a cui finora non ha corrisposto un sostanziale cambiamento della postura di deterrenza dei due blocchi, ha portato purtroppo ad erodere il concetto di tabù nucleare e di come esso è percepito dalla popolazione. La discriminazione, nei canali informativi, tra ordigni tattici e strategici finalizzata a 'tranquillizzare' la popolazione sminuendo gli effetti dei primi rispetto ai secondi può essere un pericoloso precedente. Se a questo si aggiunge un'errata informazione alla popolazione sui possibili rischi, nel caso specifico di un attacco diretto ad una centrale nucleare e quello della detonazione di un ordigno tattico, il quadro relativo all'informazione della popolazione risulta preoccupante.

Ferma restando la libertà di espressione che i media hanno nello svolgere il loro importante servizio di informazione alla popolazione è importante che un argomento fondamentale come la deterrenza nucleare e il disarmo, soprattutto nella crisi Ucraina che vede, di fatto, contrapposte le due più grandi potenze nucleari del mondo (Russia e USA), venga trattato responsabilmente veicolando il messaggio che una guerra nucleare non deve essere mai combattuta in quanto nessuno è in grado di vincerla.

Riferimenti bibliografici

Bulgarian2022 - Ukraine received M30/M31 rockets with 51lb of PBX-109 high explosives-<https://bulgarianmilitary.com/2022/07/07/ukraine-received-m30-m31-rockets-with-51lb-of-pbx-109-high-explosives/> - ultimo accesso Agosto 2022

Burnie2022 - New analysis on severe nuclear hazards at Zaporizhzhia plant in Ukraine – only solution is immediate end to war – Greenpeace International - <https://www.greenpeace.org/international/press-release/52459/nuclear-hazards-zaporizhzhia-plant-ukraine-military-invasion/> - ultimo accesso luglio 2022

Castelvecchi2022 - Ukraine nuclear power plant attack: scientists assess the risks, nature news: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00660-z> - ultimo accesso Agosto 2022

Cevad2010 - Emergenze nucleari e radiologiche. Manuale per le Valutazioni Dosimetriche e le Misure Ambientali: <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/emergenze-nucleari-e-radiologiche-manuale-per-le> - ultimo accesso Agosto 2022

CNWRA 93-006 – Characteristics of spent nuclear fuel and cladding relevant to high level waste source term - Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses San Antonio, Texas, 1993.

FOIR2005 - Russia's Tactical Nuclear WeaponsPart II: Technical Issues and Policy Recommendations – Swedish Defence Research Agency - <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--1588--SE> - ultimo accesso Ottobre 2022.

Greenpeace2022 - New analysis on severe nuclear hazards at Zaporizhzhia: plant in Ukraine – only solution is immediate end to war: <https://www.greenpeace.org/international/press-release/52459/nuclear-hazards-zaporizhzhia-plant-ukraine-military-invasion/> - ultimo accesso Agosto 2022.

HotSpot2022 - Health Physics Codes for the PC - <https://narac.llnl.gov/hotspot>
- ultimo accesso Luglio 2022

Kraus2022 – Kraus T et al. Analysis of Fission and Activation Radionuclides Produced by a Uranium-Fueled Nuclear Detonation and Identification of the Top Dose-Producing Radionuclides. LLNL-JRNL-640177, Submitted to the Health Physics Society Journal, 2 Luglio 2013

IAEA-CN-102 – International conference on storage of spent fuel from power reactor: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/047/34047327.pdf?r=1 – ultimo accesso Agosto 2022

IAEA-Report93 - Status report 93 - VVER–1000 (V-466B) (VVER–1000 (V-466B)): [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000\(V-466B\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000(V-466B).pdf) – ultimo accesso Agosto 2022

Military2022 – Neptun - <https://www.military-today.com/missiles/neptun.htm> - ultimo accesso Agosto 2022.

MTreath2022_1 - 3M-14 Kalibr (SS-N-30A) - <https://missilethreat.csis.org/missile/ss-n-30a/> - ultimo accesso luglio 2022

MTreath2022_2 - 9K720 Iskander (SS-26) - <https://missilethreat.csis.org/missile/ss-26-2/> - ultimo accesso Agosto 2022.

NUREG2007 - A Pilot Probabilistic Risk Assessment Of a Dry Cask Storage System At a Nuclear Power Plant - U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research: <https://www.nrc.gov/docs/ML0713/ML071340012.pdf> - ultimo accesso Ottobre 2022

Power2022 - Zaporizhzhya Nuclear Power Plant, Ukraine - <https://www.power-technology.com/projects/zaporizhzhya-nuclear-power-plant/> - ultimo accesso Agosto 2022.

RUSI2022 - Russia's Nonstrategic Nuclear Weapons and Its Views of Limited Nuclear War -

<https://rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/russias-nonstrategic-nuclear-weapons-and-its-views-limited-nuclear-war> - ultimo accesso Ottobre 2022

SFDSF2022 - WWER Spent Fuel Management -
<https://www.uation.org/en/operating-dsfsf-at-Zaporizhzhia-npp#:~:text=The%20dry%20spent%20fuel%20storage%20system%20is%20designed%20for%20380,hold%20more%20than%209000%20SFAs.&text=The%20storage%20site%20can%20house,only%20from%20the%20Zaporizhzhia%20NPP.> - ultimo accesso luglio 2022.

Simon2006 - Fallout from Nuclear Weapons Tests and Cancer Risks -American Scientist, Vol. 94, number 1 pag 48:
<https://www.americanscientist.org/article/fallout-from-nuclear-weapons-tests-and-cancer-risks> - ultimo accesso Agosto 2022

Vettori2003 - Analisi di un evento di PTS originato da un incidente di tipo MSLB in un impianto nucleare WWER-1000/320 condotta mediante i codici accoppiati Relap5, Trio_U e Ansys – Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare, liberamente consultabile in: <https://etd.adm.unipi.it/theses/available/etd-11242003-105246/> - ultimo accesso Agosto 2022.

WNA2022 – Chernobyl accident 1986: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx> - ultimo accesso Agosto 2022