# Esperienze di controllo dei materiali allontanabili da impianti nucleari e da altre installazioni: determinazione dei fattori di correlazione e definizione dei criteri di accettabilità delle misure

Albertone L.[1], Altavilla M.[2], Marga M.[1], Porzio L.[1], Tozzi G.[1], Tura P.[1]

[1] *Arpa Piemonte – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici - Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti Nucleari - Via Trino 89, 13100 Vercelli*

[2] *ISIN – Via Capitan Bavastro 116, 00154 Roma*

l.albertone@arpa.piemonte.it

**Riassunto**

*Arpa Piemonte esegue da tempo controlli sui materiali allontanabili dagli impianti nucleari per verificare il rispetto dei livelli di allontanamento fissati da ISIN nelle prescrizioni tecniche allegate ai D.M. di autorizzazione alla disattivazione o nei Nulla Osta di Cat. A. Dopo l'esperienza intrapresa presso l'impianto di Bosco Marengo (AL) sono stati avviati i controlli presso la Centrale nucleare SO.G.I.N "E. Fermi" di Trino (VC), presso il sito della LivaNova Site Management di Saluggia (VC) e presso l'impianto EUREX-SO.G.I.N. di Saluggia (VC), secondo modalità che prevedono, come controllo finale, la determinazione dei radionuclidi gamma emettitori attraverso misure di spettrometria gamma in situ.*

*La verifica del rispetto dei livelli di allontanamento va però effettuata per tutti i radionuclidi potenzialmente presenti, compresi quelli non facilmente misurabili (DTM, ossia Difficult To Measure). Si rende pertanto necessario effettuare a monte, su un campione significativo, la determinazione di tali radionuclidi al fine di calcolare i fattori di correlazione FC, definiti attraverso la media logaritmica dei rapporti tra le concentrazioni dell'i-esimo radionuclide DTM e del relativo radionuclide chiave.*

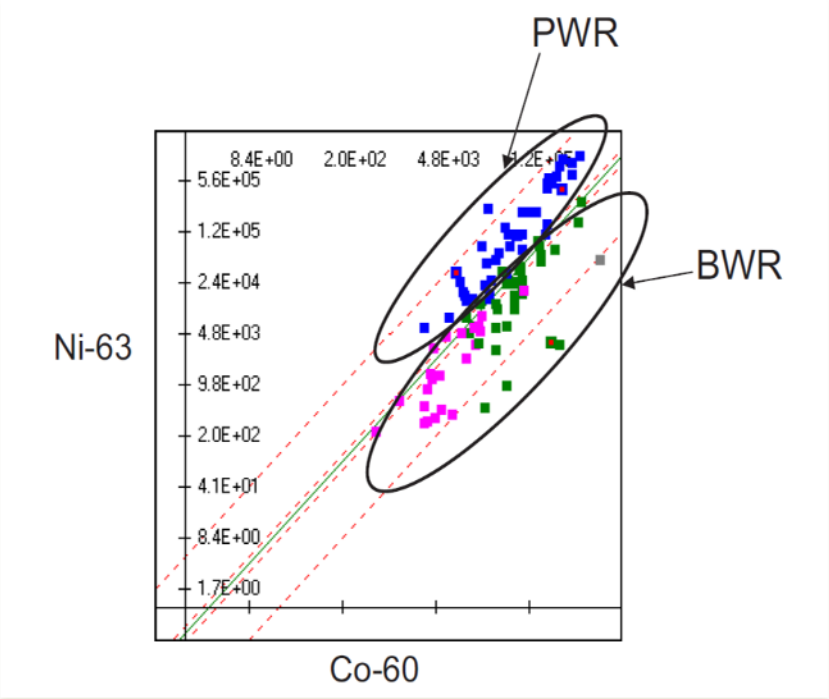
*Attraverso specifiche analisi radiochimiche vengono determinate le concentrazioni dei radionuclidi non facilmente misurabili (DTM) quali Fe-55, Ni-59, Ni-63, Sr-90, Pu-238, Pu-239/Pu-240. Come radionuclidi di riferimento sono stati scelti il Co-60 per i prodotti di attivazione (Fe-55, Ni-59, Ni-63) ed il Cs-137 per i prodotti di fissione (Sr-90) ed il plutonio (Pu-238, Pu-239/Pu-240, Pu-241).*

*La presenza di concentrazioni molto basse di radioattività, spesso al di sotto dei limiti di rivelabilità, può rendere difficoltosa la determinazione dei relativi fattori di correlazione. In questo lavoro sono presentati i risultati ottenuti ed i criteri di accettabilità per le misure, definiti con ISIN, che consentono di confermare o di escludere la presenza di un radionuclide ai fini della verifica del rispetto dei livelli di allontanamento. Sono altresì esposte valutazioni in merito alla rappresentatività dei campioni scelti per la valutazione dei fattori di correlazione.*

## PANORAMA INTERNAZIONALE

Fino ai primi anni del 2000 era stato notato che esistevano, entro certe condizioni, dei rapporti relativamente costanti tra le concentrazioni di alcuni radionuclidi per ogni specifica corrente di rifiuto. Ad esempio era stato comprovato il rapporto "costante" tra le concentrazioni del Ce-144 e degli isotopi del plutonio nelle correnti di rifiuti generate da un LWR (Light Water Reactor). L'implicazione di questa situazione era immediata; era infatti possibile, una volta definito il suddetto rapporto, potere arrivare alla valutazione delle concentrazioni degli isotopi del plutonio, che ponevano evidenti difficoltà in termini di misure radiometriche, attraverso la più "comoda" determinazione del cerio. A tale proposito, risulta essere disponibile un'ampia letteratura, di fonte essenzialmente americana che, limitatamente ai reattori ad acqua leggera, fornisce una estesa serie di fattori di correlazione per le diverse correnti di rifiuto e per i diversi radionuclidi di interesse. L'utilizzo dei valori di letteratura ha comunque un limite dovuto al fatto che esiste un'ampia variabilità dei fattori di correlazione, oltre che da corrente a corrente di rifiuto, anche da impianto ad impianto e dalle modalità di funzionamento dello stesso impianto. Da ciò ne conseguiva che i valori dei fattori di correlazione reperibili in letteratura potevano trovare applicazioni di massima da cui potevano essere ricavabili indicazioni di carattere generale. Restava indiscussa la necessità di effettuare delle valutazioni mirate e specifiche dei fattori di correlazione, tramite indagini sperimentali, quando era necessaria una informazione tecnica di maggiore precisione ai fini di un'accurata determinazione, ad esempio, dell'inventario di radioattività.
Attualmente, in ambito internazionale, viene utilizzato un valore medio per il calcolo dei fattori di correlazione, in alcuni casi una media aritmetica mentre in altri casi una media geometrica (logaritmica) come nel caso dell'Italia o degli Stati Uniti. Il concetto di fattore di correlazione si basa sul presupposto che la relazione tra un radionuclide chiave ed un radionuclide di difficile misurabilità sia lineare nell'intervallo di attività di interesse (fig. 1).

Figura 1 Esempi di correlazione Ni-63~Co-60 per differenti tipologie di reattori (IAEA, 2009).




La media aritmetica tenderà a produrre un valore conservativo, mentre la media geometrica tenderà a produrre un valore medio più rappresentativo quando i dati sono distribuiti su diversi ordini di grandezza. Sempre in ambito internazionale, alcuni paesi utilizzano la

regressione logaritmica per calcolare i fattori di correlazione; in questo caso gli stessi fattori di correlazione assumono una relazione non lineare tra il nuclide chiave e il nuclide DTM e possono essere utilizzati per modellare in modo più accurato le relazioni complesse e non lineari tra i radionuclidi.

## PANORAMA NAZIONALE

In ambito nazionale i fattori di correlazione, riferiti a specifici gruppi omogenei, sono determinati attraverso l'applicazione della metodica EPRI (1996, EPRI) che riconosce nel calcolo della media geometrica e della dispersione associata alla distribuzione dei rapporti misurati (fattori di correlazione sperimentali), il formalismo più efficace nell'analisi statistica dei dati sperimentali. Riferendosi a considerazioni basate sulla storia operativa dell'impianto, sui dati radiometrici disponibili e sulla suddivisione di sistemi, strutture e rifiuti radioattivi in gruppi tali per cui siano plausibili opportune condizioni radiologiche omogenee, sono prelevati un numero minimo di campioni rappresentativi dei materiali o dei rifiuti in esame (tipicamente N=20) per ciascuno dei gruppi omogenei ipotizzati in modo tale da computare l'i-esimo fattore di correlazione sperimentale FC per ciascuno degli N campioni sottoposti alle analisi radiometriche

$$FC = \frac{C_{DTM}}{C_{ETM}}$$

dove $C_{DTM}$ è la concentrazione del radionuclide DTM e $C_{ETM}$ del radionuclide facilmente misurabile (ETM, ossia *Easy To Measure*) di riferimento (tab. 1).

Tabella 1 Individuazione dei radionuclidi di riferimento.

| Radionuclide DTM | Radionuclide ETM |
|---|---|
| Fe-55, Ni-59, Ni-63 | Co-60 |
| Sr-90, Pu-238, Pu239/240, Pu-241 | Cs-137 |
| U-totale | U-238 |

Successivamente, viene calcolata la media geometrica $A_{FC}$

$$A_{FC} = e^{\frac{\sum_{i=1}^{N} \ln FC_i}{N}}$$

ed il fattore di dispersione $D_{FC}$ degli N fattori di correlazione sperimentali

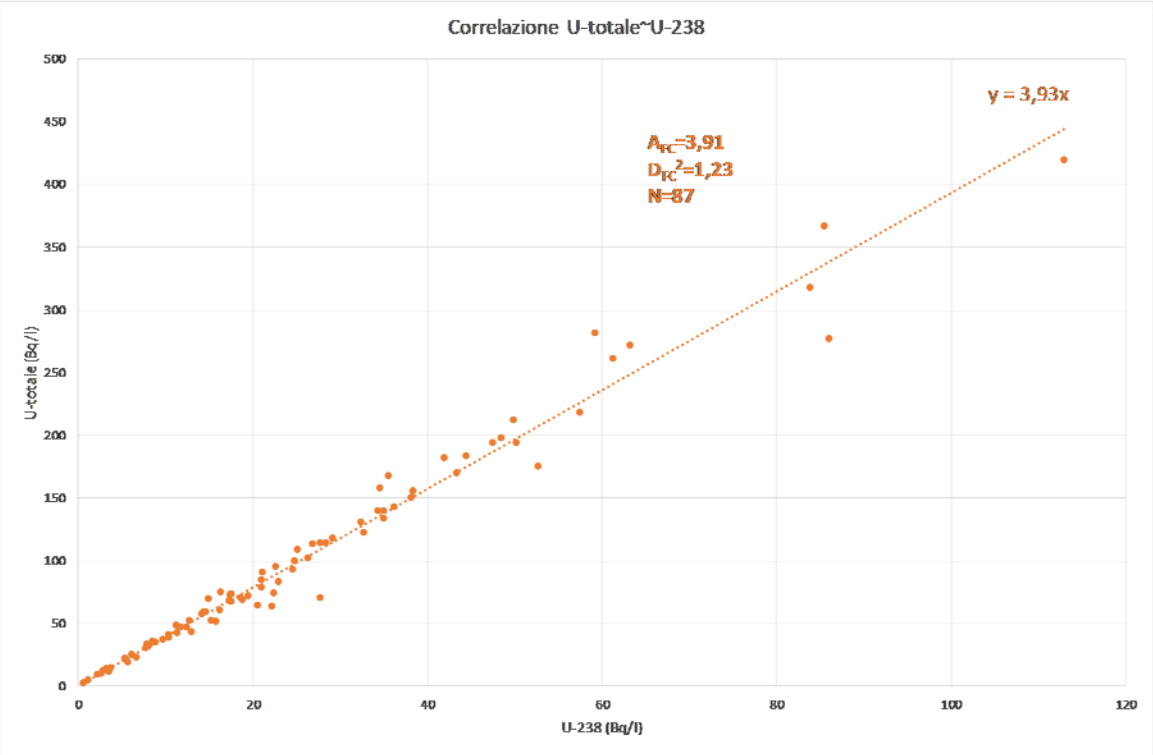
$$D_{FC} = e^{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\ln FC_i - \ln A_{FC})^2}{N-1}}}$$

L'accettabilità del fattore di correlazione ottenuto come media geometrica degli N fattori di correlazione sperimentali è quindi stabilita coerentemente a criteri conservativi, indicati dall'EPRI, relativamente alla dispersione a 2σ ($D_{FC}^2$) della distribuzione dei fattori di correlazione sperimentali.
L'ISIN, l'autorità di regolamentazione competente in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione, anche sulla base delle indicazioni presenti nelle pubblicazioni internazionali, ha adottato, ai fini della caratterizzazione radiologica dei materiali ed in particolare per i materiali potenzialmente rilasciabili, il criterio $D_{FC}^2 \leq 6$ mentre, limitatamente alla caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi, è utilizzato come criterio $D_{FC}^2 \leq 8$.
Nel caso in cui la dispersione 2σ ($D_{FC}^2$) della distribuzione delle misure soddisfi i precedenti requisiti, sia nel caso dei materiali potenzialmente allontanabili sia dei rifiuti radioattivi, si avrebbe la dimostrazione della consistenza statistica del numero di campioni sottoposti ad esame e, di conseguenza, che la media geometrica costituisca una stima attendibile del fattore di correlazione per il generico nuclide rappresentativo dell'insieme di materiali o rifiuti, costituente il gruppo omogeneo in esame. Contrariamente, se i suddetti requisiti non fossero rispettati si dovrebbe rinunciare alla definizione di un fattore di correlazione valido e dovrebbe essere utilizzato un qualsiasi altro criterio ritenuto appropriatamente conservativo.

## ESPERIENZE PRESSO L'IMPIANO NUCLEARE DI BOSCO MARENGO

L'impianto nucleare di Bosco Marengo (AL) ha svolto la sua attività nel settore del ciclo del combustibile nucleare dal 1972 al 1990 in qualità di unico fabbricante nazionale del combustibile nucleare per le centrali elettronucleari dell'ENEL. Attualmente, in seguito all'emanazione del DM 27/11/2008 di autorizzazione alla disattivazione, l'impianto sta ultimando le operazioni di decommissioning, attività che ha comportato la produzione, oltre che di rifiuti radioattivi, anche di notevoli quantità di materiali metallici, materiali cementizi e altri materiali destinati all'allontanamento.
Il combustibile nucleare prodotto durante l'esercizio dell'impianto era costituito da Uranio naturale e debolmente arricchito, pertanto i radionuclidi potenzialmente presenti sono: U-238; U-235 in percentuali in massa pari ai valori di arricchimento lavorati (da un minimo dello 0,2% ad un massimo del 5%) e U-234 in proporzioni variabili in funzione dell'arricchimento.
Viste le caratteristiche dell'impianto e del ciclo produttivo, gli effluenti liquidi sono stati considerati come caratterizzanti della contaminazione media di tutte le componenti impianto.
Sono pertanto stati aggiornati i fattori di correlazione (Albertone L., Marga M., Porzio L., 2014) tra i radionuclidi presenti attraverso un'analisi statistica della composizione isotopica – ottenuta tramite spettrometria alfa dopo separazione radiochimica – degli effluenti liquidi prelevati nel periodo 2006-2018. In particolare si è potuto osservare un arricchimento medio di circa 2% con una distribuzione approssimativamente normale. In questo caso quindi si ha una correlazione statisticamente significativa (fig. 2) tra la concentrazione di U-238 e la concentrazione di U-totale. Si è quindi scelto di assumere come radionuclide di riferimento U-238.

Figura 2 Correlazione U-totale~U-238 negli effluenti liquidi (2006-2018) dell'impianto FN-SO.G.I.N. di Bosco Marengo (AL).




Nel periodo 2013-2017 sono stati sottoposti a controllo da parte di Arpa 12 dei 22 lotti di materiale metallico allontanato dall'impianto, per cui valgono i livelli di allontanamento

contenuti nelle Prescrizioni per la Disattivazione allegate al DM 27/11/2008 di autorizzazione alla disattivazione dell'impianto (tab. 2, 3).
Complessivamente sono state allontanate 376 tonnellate di ferro e acciaio e tutte le misure di spettrometria gamma *in situ* effettuate hanno confermato il rispetto dei livelli di allontanamento (fig. 3).

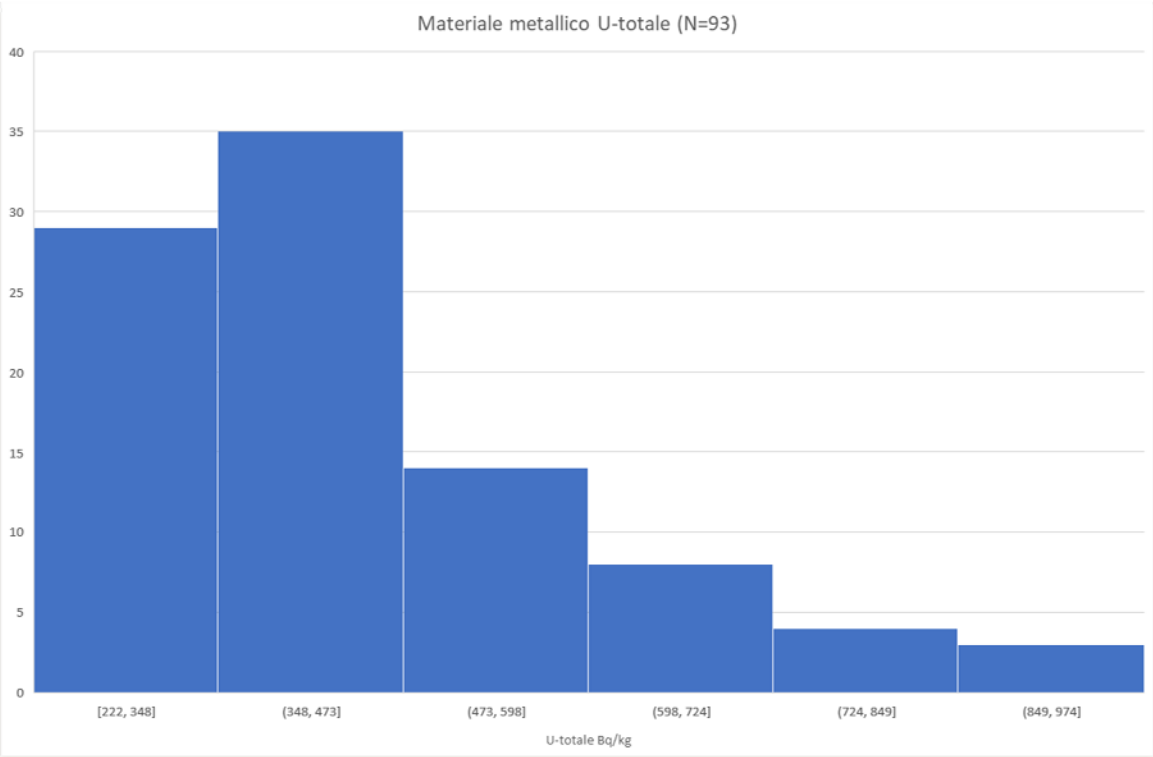
Tabella 2 Allontanamento incondizionato di materiali metallici.

| **Radionuclide** | **Materiali metallici** | | |
|---|---|---|---|
| | Riutilizzo diretto | Riciclo | **Riutilizzo/Riciclo** |
| Alfa emettitori | 0,1 Bq/cm$^2$ | 0,1 Bq/cm$^2$ | **1 Bq/g** |

Tabella 3 Allontanamento incondizionato di detriti costituiti da materiali cementizi e altri materiali.

| **Radionuclide** | **Materiali cementizi** | | | **Altri materiali** |
|---|---|---|---|---|
| | Riutilizzo di edifici | Demolizione di edifici | | **Concentrazione di massa** |
| | | Superficie | **Detriti** | |
| Alfa emettitori | 0,1 Bq/cm$^2$ | 1 Bq/cm$^2$ | **0,1 Bq/g** | **0,1 Bq/g** |
| Altri prodotti di decadimento dell'U-238 e dell'U-235 diversi da Tabella I-2 Allegato I D.L.vo n.230/1995 | 0,1 Bq/cm$^2$ | 0,1 Bq/cm$^2$ | **0,1 Bq/g** | **0,01 Bq/g** |

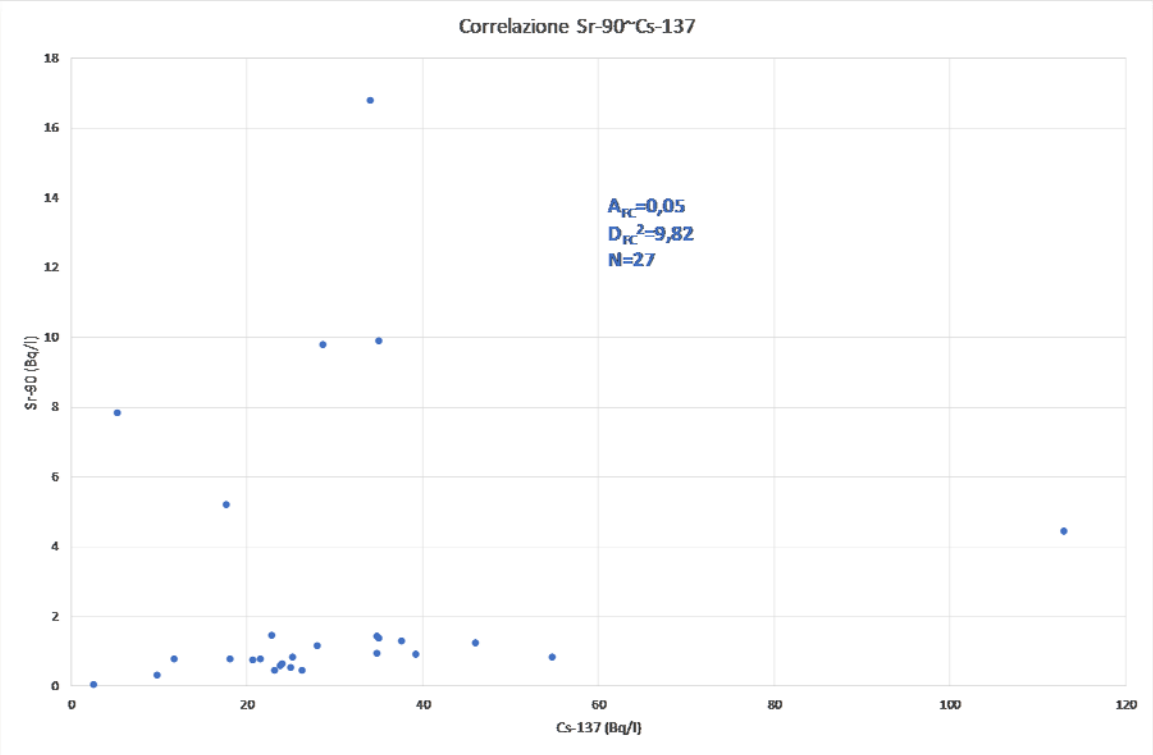
Figura 3 Misure effettuate su materiale metallico destinato all'allontamento dall'impianto FN-SO.G.I.N. di Bosco Marengo (AL).



## ESPERIENZE PRESSO LA CENTRALE NUCLEARE DI TRINO

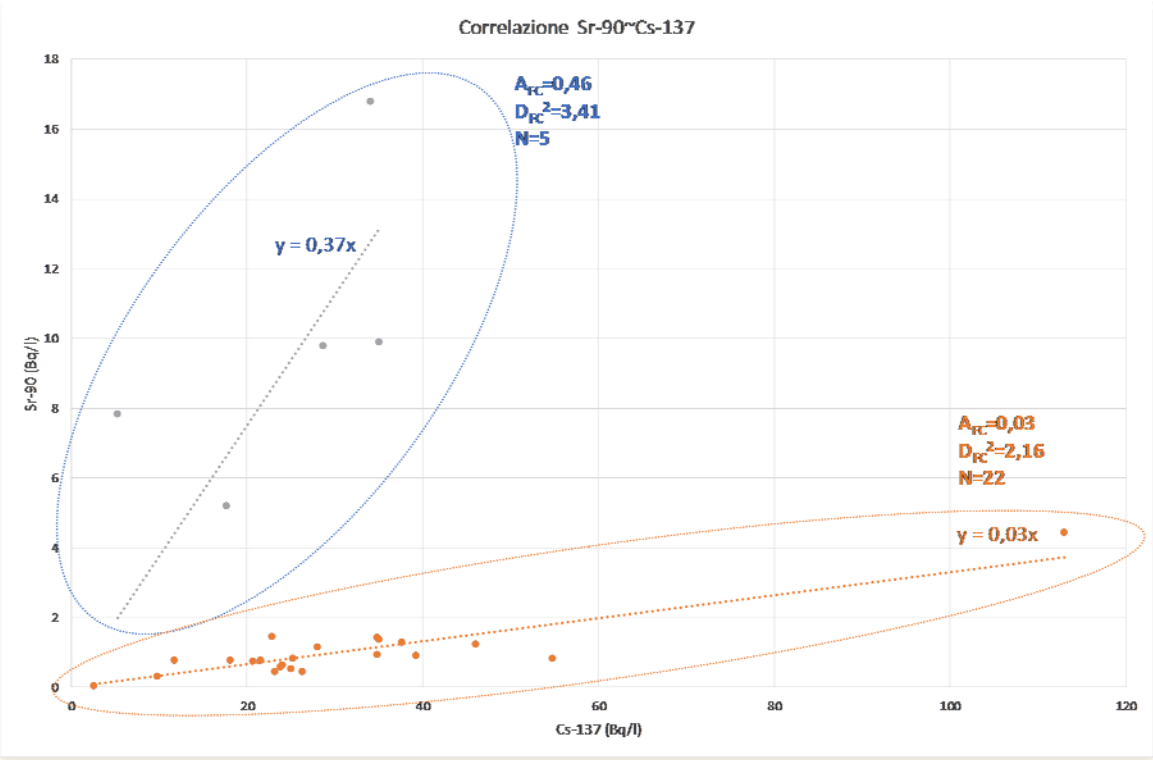
Nel caso della Centrale nucleare "E. Fermi" di Trino l'analisi degli scarichi (fig. 4) non ha consentito di individuare dei fattori di correlazione, in quanto la dispersione osservata non rispetta i criteri EPRI. Tale circostanza non stupisce, dal momento che gli effluenti costituiscono di fatto una miscelazione di tutte le correnti di rifiuto provenienti dai diversi sistemi dell'impianto difficilmente riconducibili ad un unico gruppo omogeneo.

Figura 4 Correlazione Sr-90~Cs-137 negli effluenti liquidi della Centrale nucleare "E. Fermi" di Trino.




Un'analisi più approfondita ha però consentito di individuare due raggruppamenti statisticamente significativi (fig. 5), entrambi con $D_{FC}^2 \leq 6$, ad indicare la presenza di almeno due differenti correnti di rifiuto.

Figura 5 Correlazione Sr-90~Cs-137 negli effluenti liquidi della Centrale nucleare “E. Fermi” di Trino – sono evidenziati i raggruppamenti individuati.




Nel corso del 2018, la Centrale nucleare di Trino ha dato inizio ad un’attività di trattamento di parte dei rifiuti radioattivi pregressi potenzialmente allontanabili, suddivisi in tre lotti.
Tali rifiuti sono costituiti da materiale proveniente da lavorazioni condotte in zona controllata pur non appartenendo ad alcun sistema di impianto, classificato come rifiuto radioattivo nel momento della produzione e divenuto potenzialmente allontanabile nel corso del tempo.
Arpa Piemonte ha assistito al pretrattamento di alcuni dei campioni prelevati dall’esercente (10%) ed ha successivamente analizzato gli estratti acquosi ottenuti al fine di effettuare valutazioni sui fattori di correlazione.
Già una prima analisi della natura di tali campioni (sabbia, cemento, terra, materiale metallico, indumenti) poteva far sospettare l’assenza di omogeneità nella composizione della contaminazione dei rifiuti stessi.
Le analisi di laboratorio, effettuate sia sui radionuclidi ETM sia sui radionuclidi DTM, hanno confermato l’assenza di omogeneneità:

- nei rifiuti a più bassa contaminazione (lotto 1) si è osservata la presenza di Cs-137, Co-60 e Ni-63 solo nella metà dei campioni, Sr-90 in un solo campione; non è stata osservata la presenza di alfa emettitori;
- nei rifiuti a più alta contaminazione (lotto 3) si osservata la presenza di Cs-137 oltre i limiti di rilascio (tab. 4), Co-60 e Ni-63, Sr-90 solo nella metà dei campioni, alfa emettitori solo in due campioni.

In particolare, oltre all’impossibilità di stimare i fattori di correlazione dei radionuclidi DTM in molti campioni, non risultano mai rispettati i criteri EPRI (fig. 6).
Si può però evidenziare l’appartenza di alcuni campioni ad una delle due correnti di rifiuto presenti negli scarichi (fig. 7), a conferma del fatto che tali materiali non costituiscono un lotto omogeneo, condizione indispensabile per poter stimare i fattori di correlazione.

Tabella 4 Allontanamento incondizionato di materiali metallici e altri materiali. Prescrizioni per la Disattivazione allegate al DM 02/08/2012 di autorizzazione alla disattivazione dell'impianto.

| | **Materiali metallici** | | | **Altri materiali** |
|---|---|---|---|---|
| **Radionuclide** | Riuso | Riciclo | **Riuso/Riciclo** | **Riuso/Riciclo** |
| | Superficie (Bq/cm$^2$) | Superficie (Bq/cm$^2$) | **Massa (Bq/g)** | **Massa (Bq/g)** |
| H-3 | 10000 | 100000 | **1** | **1** |
| C-14 | 1000 | 1000 | **1** | **1** |
| Mn-54 | 10 | 10 | **1** | **0,1** |
| Fe-55 | 1000 | 10000 | **1** | **1** |
| Co-60 | 1 | 10 | **1** | **0,1** |
| Ni-59 | 10000 | 10000 | **1** | **1** |
| Ni-63 | 1000 | 10000 | **1** | **1** |
| Sr-90 | 10 | 10 | **1** | **1** |
| Sb-125 | 10 | 100 | **1** | **1** |
| Cs-134 | 1 | 10 | **0,1** | **0,1** |
| Cs-137 | 10 | 100 | **1** | **1** |
| Eu-152 | 1 | 10 | **1** | **0,1** |
| Eu-154 | 1 | 10 | **1** | **0,1** |
| Alfa emettitori | 0,1 | 0,1 | **0,1** | **0,01** |
| Pu-241 | 10 | 10 | **1** | **1** |

Figura 6 Correlazione Ni-63~Co-60 nei campioni di materiali potenzialmente rilasciabili.

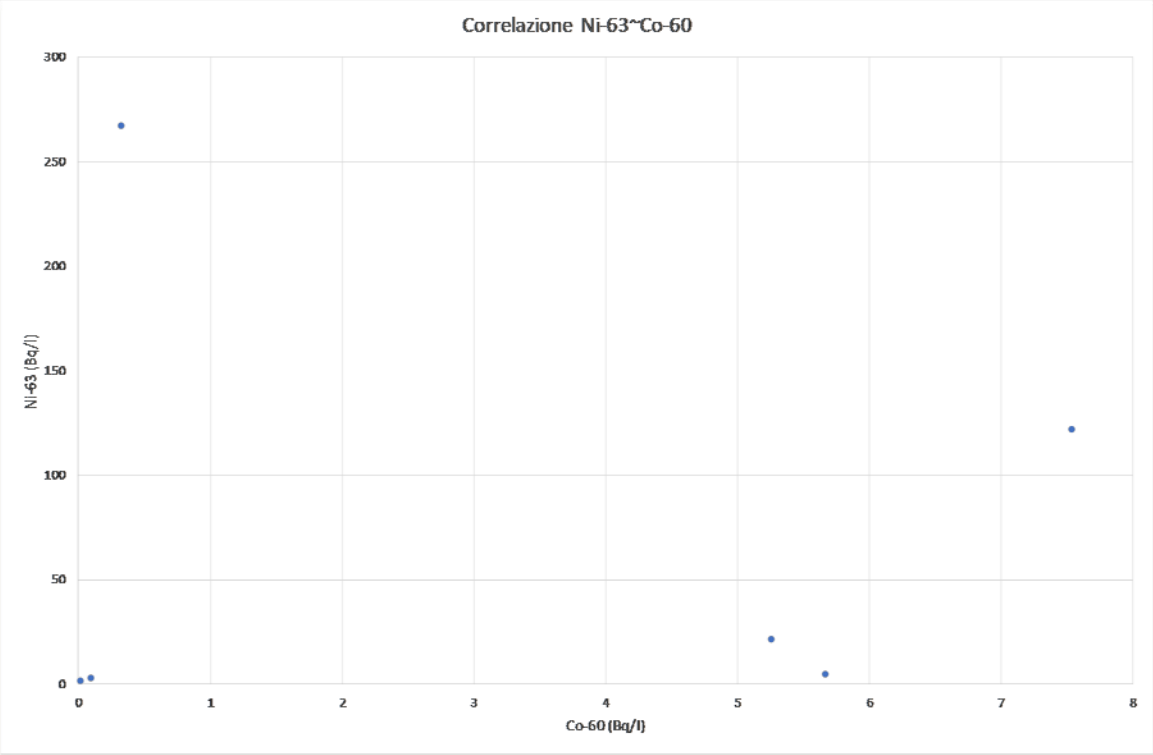
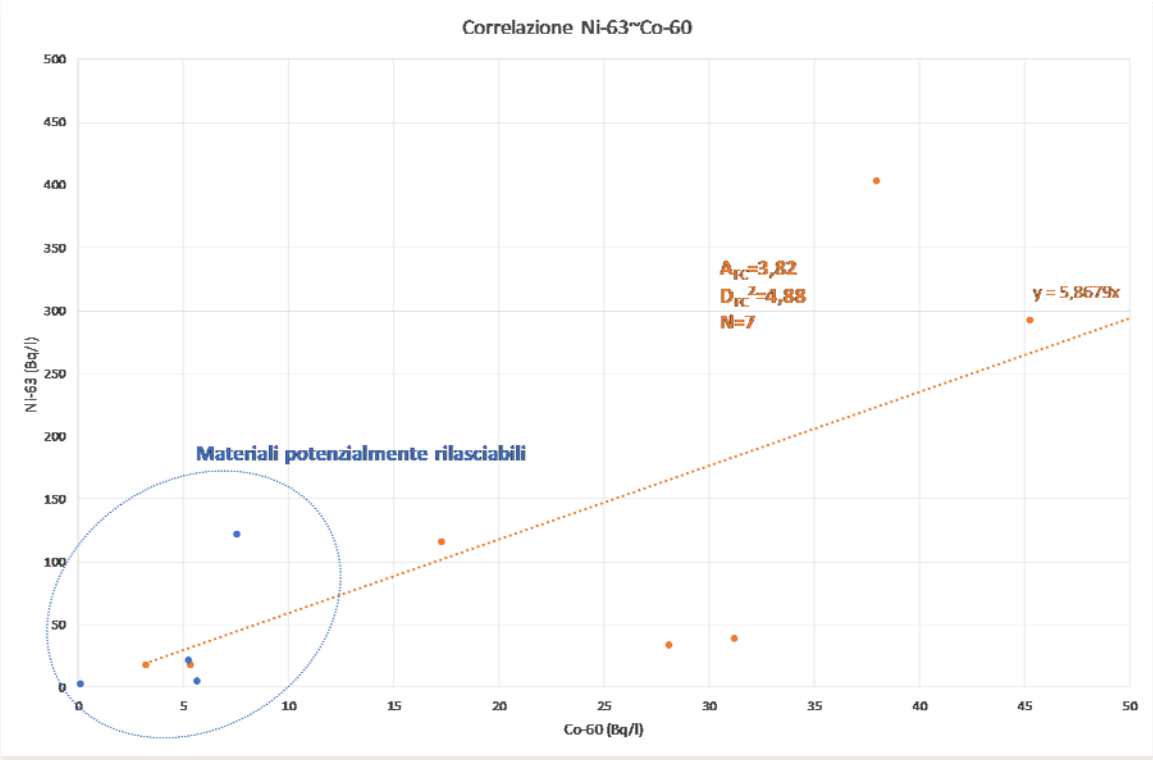


Figura 7 Correlazione Ni-63~Co-60 negli effluenti liquidi della Centrale nucleare "E. Fermi" di Trino ed in alcuni campioni di materiali potenzialmente rilasciabili.



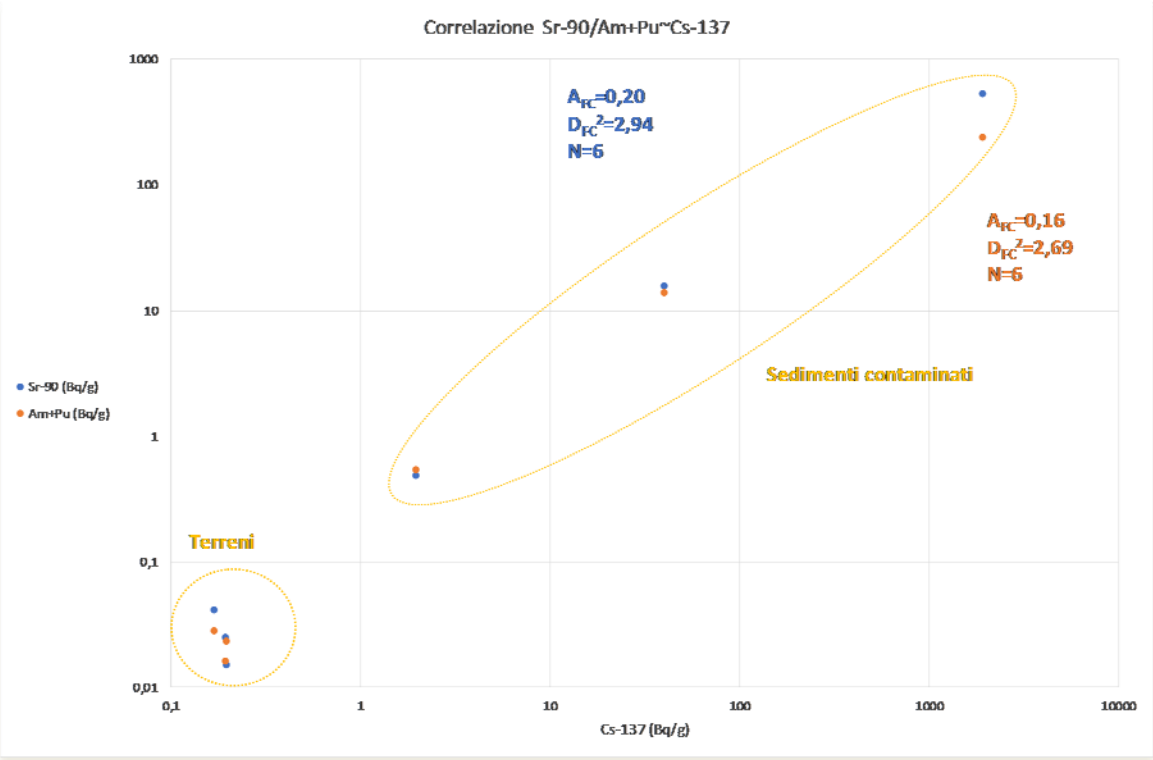

## ESPERIENZE PRESSO L'INSTALLAZIONE LIVANOVA DI SALUGGIA

Presso l'istallazione LivaNova di Saluggia (VC) – Nulla Osta di Cat. A – si era da tempo evidenziata la contaminazione da idrocarburi di porzioni di terreno all'interno della zona controllata adibita a deposito di rifiuti radioattivi. In tale area erano in passato collocate le cisterne di gasolio per l'alimentazione di un impianto di incenerimento, ormai smantellato.
Ai fini delle operazioni di bonifica convenzionale, ISIN ha comunque richiesto la caratterizzazione radiometrica dei terreni per definirne correttamente la gestione. In particolare, si possono avere:

- terreni contaminati da radionuclidi (indipendentemente dall'eventuale contaminazione da idrocarburi) da gestire come materiali eventualmente allontanabili o, se non rispettati i pertinenti livelli di allontanamento, come rifiuti radioattivi;
- terreni esenti da vincoli di natura radiologica ma contaminati da idrocarburi da gestire come rifiuti speciali;
- terreni non contaminati né da radionuclidi né da idrocarburi.

Gli esiti della caratterizzazione hanno mostrato la presenza – con notevole disomogeneità – di Cs-137, Sr-90, Am-241 e plutonio. Tali contaminanti erano già stati individuati nel 2012 nei sedimenti contaminati dell'impianto di gestione degli effluenti radioattivi (ora decontaminato), negli stessi rapporti. In questo caso quindi, integrando le due serie di dati, è stato possibile stimare preliminarmente un set completo di fattori di correlazione caratteristici di un'unica sorgente di contaminazione (fig. 8).

Figura 8 Correlazione Sr-90/Am+Pu~Cs-137 nei terreni e sedimenti contaminati nell'installazione LivaNova di Saluggia (VC) (Dati LivaNova).




## ESPERIENZE PRESSO L'IMPIANTO EUREX-SO.GI.N. DI SALUGGIA

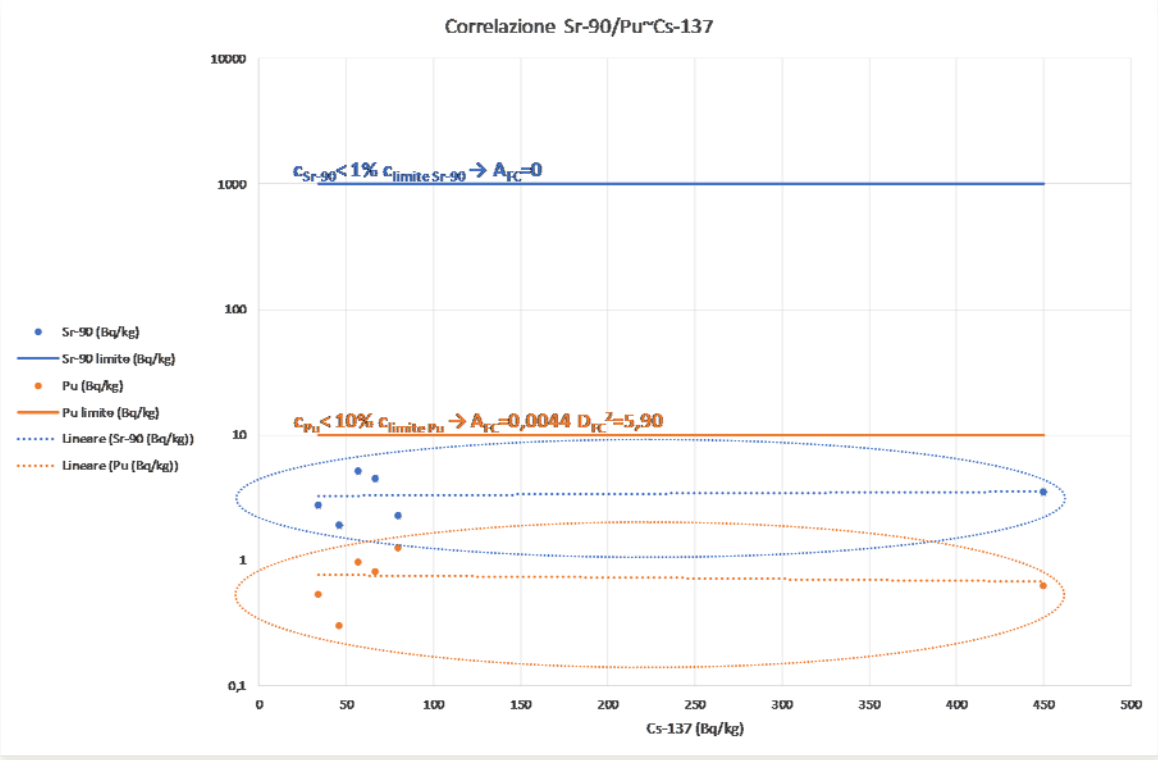
Presso l'impianto EUREX-SO.G.I.N. di Saluggia (VC) – impianto riprocessamento di combustibile nucleare – nel 2017 si è evidenziata la contaminazione del terreno circostante una porzione dell'impianto di gestione degli effluenti radioattivi liquidi (fig. 9).
Anche in questo caso per una corretta gestione dei terreni di scavo è risultata necessaria la completa caratterizzazione radiometrica, che ha evidenziato la presenza soltanto di Cs-137. Nello specifico però, mentre per Sr-90 i limiti di rivelabilità risultavano molto minori del pertinente livello di allontanamento (tab. 6) – in particolare minori dell'1% – i limiti di rivelabilità per gli isotopi del plutonio risultavano solo di un ordine di grandezza minori del livello di allontanamento (fig. 10).
Se per Sr-90 risulta accettabile porre a zero il fattore di correlazione, per gli isotopi del plutonio è più cautelativo – viste anche le caratteristiche dell'impianto – stimare comunque un fattore di correlazione non nullo assumendo una distribuzione rettangolare tra zero ed i limiti di rivelabilità.

Figura 9 Area interessata dalla contaminazione.

Tabella 5 Materiali cementizi e altri materiali.
DM 12/08/2009 di modifica delle Prescrizioni Tecniche gestionali.

| **Radionuclide** | **Demolizione edifici** | | **Altri materiali** |
|---|---|---|---|
| | Superficie (Bq/cm$^2$) | **Massa (Bq/g)** | **Massa (Bq/g)** |
| H-3 | 10000 | **1** | **1** |
| Ni-59 | 100000 | **1** | **1** |
| Ni-63 | 100000 | **1** | **1** |
| Co-60 | 1 | **0,1** | **0,1** |
| Sr-90 | 100 | **1** | **1** |
| Tc-99 | 100 | **1** | **1** |
| Sb-125 | 10 | **1** | **1** |
| Cs-134 | 10 | **0,1** | **0,1** |
| Cs-137 | 10 | **1** | **1** |
| Pm-147 | 10000 | **1** | **1** |
| Sm-151 | 10000 | **1** | **1** |
| Eu-152 | 10 | **1** | **0,1** |
| Eu-154 | 10 | **1** | **0,1** |
| Eu-155 | 100 | **1** | **1** |
| Alfa emettitori | 1 | **0,1** | **0,01** |
| Prodotti di decadimento di U-238 e U-235 diversi da quelli elencati nella Tabella I dell'Allegato I del D.Lgs. 230/1995 | 0,1 | **0,1** | **0,01** |
| Pu-241 | 100 | **1** | **1** |

Figura 10 Correlazione Sr-90/Pu~Cs-137 nei terreni dell'impianto EUREX-SO.G.I.N. di Saluggia (VC).




## REQUISITI PRESTAZIONALI DEI METODI ED ACCETTABILITÀ DELLE MISURE

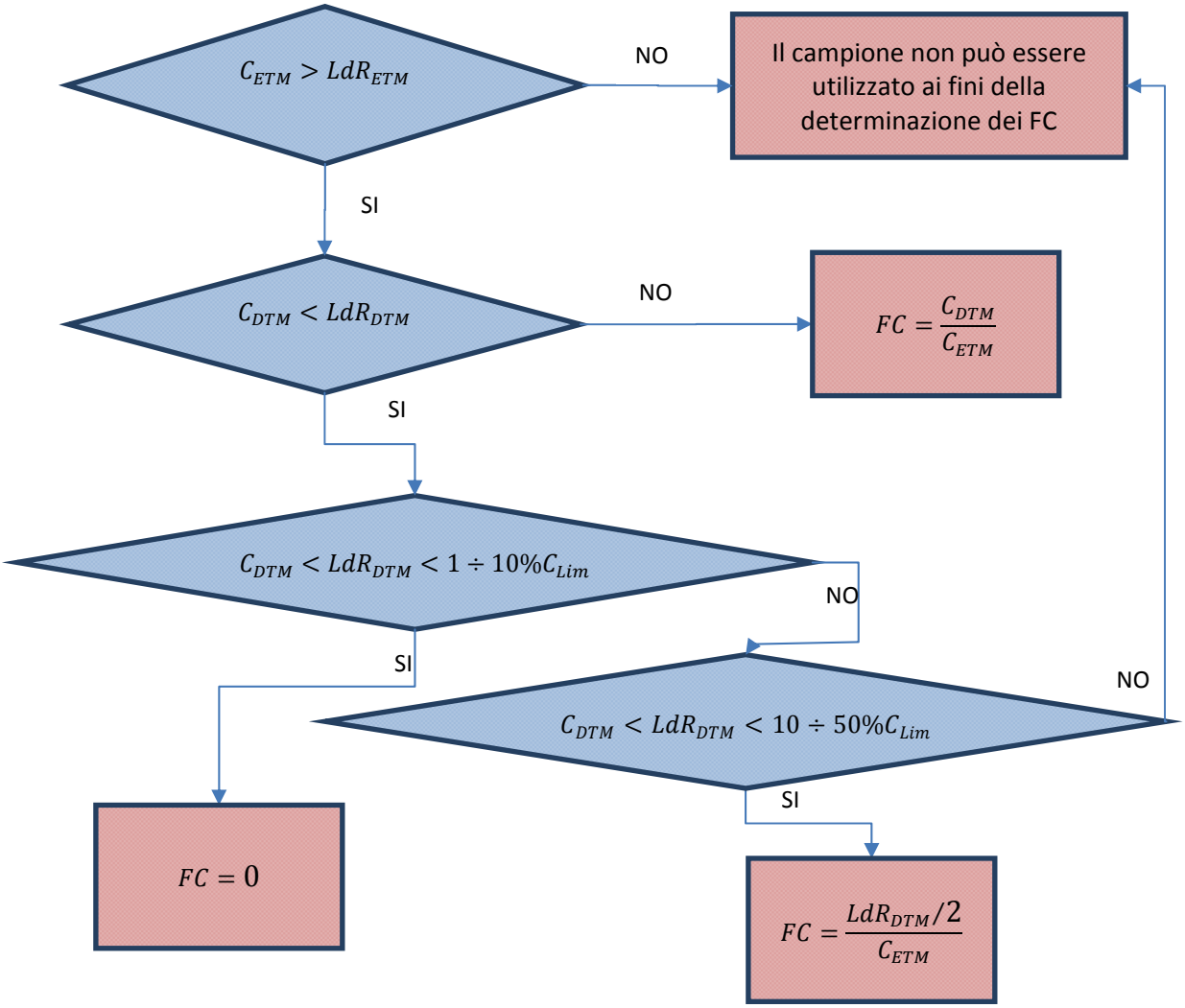
L'insieme delle esperienze sinora svolte consente di formulare le seguenti osservazioni:

- l'omogeneità di un lotto di materiale potenzialmente rilasciabili deve sempre essere verificata con misure sperimentali;
- tutte le informazioni disponibili possono essere utili ai fini della stima dei fattori di correlazione;
- nei campioni utilizzati per la stima dei fattori di correlazione deve essere rivelabile almeno un radionuclide ETM;
- è opportuno definire un livello di esclusione (ad esempio un limite di rivelabilità[1] nell'intervallo 1%÷10% del pertinente livello di allontanamento) al fine di poter escludere la presenza del radionuclide DTM nel campione;
- è opportuno definire un livello di accettabilità (ad esempio un limite di rivelabilità nell'intervallo 10%÷50% del pertinente livello di allontanamento) al fine di stabilire se il campione può essere utilizzato per la stima dei fattori di correlazione.

In particolare, qualora i risultati delle misure eseguite forniscano per il radionuclide DTM un valore di concentrazione $C_{DTM}$ minore del corrispondente limite di rivelabilità $LdR_{DTM}$ potrà essere adottato cautelativamente il valore $LdR_{DTM}$ ai fini della stima del fattore di correlazione, oppure essere assunta una distribuzione rettangolare tra 0 e $LdR_{DTM}$, adottando quindi $LdR_{DTM}/2$ ai fini della stima del fattore di correlazione.
I criteri sopra esposti, dovuti a considerazioni ancora preliminari, dovranno essere comunque valutati caso per caso, in funzione dell'impianto, del contesto specifico e dello specifico radionuclide.
In sintesi, potrà essere adottato lo schema decisionale di fig. 11.

[1] Per la definizione di limite di rivelabilità, e più in generale per le definizioni dei limiti caratteristici si veda ISO 11929.

Figura 11 Schema decisionale per la stima dei fattori di correlazione.




**Bibliografia**

Albertone L., Marga M., Porzio L., *Esperienze di controllo dei materiali allontanabili dagli impianti nucleari tramite misure di spettrometria gamma in situ*, Atti del XXXVII Convegno AIRP "Le radiazioni: valori, conoscenza scientifica e aspetti operativi" – Aosta 15-17/10/2014 – ISBN 978-88-88648-40-8, 2014 AIRP.

Electric Power Research Institute (EPRI), *Low Level Waste Characterization Guidelines* (EPRI TR-107201), 1996 EPRI.

International Atomic Energy Agency (IAEA), *Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants* (IAEA NW-T-1.18), 2009 IAEA.

International Standard Organitation (ISO), *ISO 11929 Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application*, Geneva.