

Criteri generali di progetto di una
installazione in cui vengono
impiegate sostanze radioattive in
forma non sigillata a scopo
medico

Finalità



**Fornire i principali riferimenti
tecnici di interesse**



**Fornire gli elementi
per dimensionare
adeguatamente i dispositivi
di radioprotezione**



**Fornire indicazioni generali
sulle caratteristiche dei dispositivi
di radioprotezione**



**Fornire indicazioni generali
sul layout dei reparti**

Riferimenti tecnici di interesse

- ICRP Publication 57, radiological protection of the worker in medicine and dentistry, 1989
- Norma UNI 10491 “Criteri per la costruzione di installazioni adibite alla manipolazione di sorgenti radioattive non sigillate” (1995)
- Manuale Tecnico AIRP “La radioprotezione nell’impiego medico “in vivo” di sostanze radioattive non sigillate” (1995)
- Manuale Tecnico AIRP “La radioprotezione nell’impiego “in vitro” di sostanze radioattive non sigillate nelle attività sanitarie e di ricerca medica” (1991)
- D. Delacroix et al, Radionuclide and radiation protection data handbook 2002, Radiation Protection and dosimetry, Vol.98 N.1, 2002

Procedure diagnostiche: generalità

- Caratterizzate dall'impiego di radionuclidi a breve $T_{1/2}$, soprattutto ^{99m}Tc e gamma emettitori nel range 140-200 keV
- L'impiego di attività fino a circa 1000 MBq, comporta l'assorbimento di un valore relativamente modesto di dose efficace da parte del paziente
- Impiego di radiofarmaci in forma di soluzione non volatile o di sospensione colloidale quindi di solito modesto rischio di contaminazione interna se vengono seguite le norme di buona pratica
- **Sostanziale rischio di irradiazione esterna**

Procedure terapeutiche: generalità

- L'impiego di ^{131}I può comportare un significativo rischio di contaminazione interna, sia durante l'eventuale preparazione sia a seguito dell'esperto del paziente
- L'irradiazione esterna costituisce comunque la fonte di rischio più rilevante

Quantificazione dei rischi: generalità

- La radioprotezione nell'impiego di sostanze radioattive non sigillate comporta la necessità del controllo della contaminazione e dell'irradiazione esterna
- alla base del controllo della contaminazione stanno:
 - un progetto ottimizzato
 - il contenimento del materiale radioattivo il più vicino possibile al punto del suo utilizzo
 - il mantenimento della pulizia dell'ambiente di lavoro
 - corrette modalità di lavoro

Caratteristiche di un progetto ottimizzato



Definizione della classe di rischio dell'installazione



Scelta dei dispositivi tecnici di protezione in funzione della classe di rischio



Layout del reparto



Calcolo delle barriere

Progetto ottimizzato: definizione della classe di rischio

- Il livello di protezione richiesto al fine di ottemperare al principio di ottimizzazione può essere definito sulla base della quantità di materiale radioattivo impiegato, del tipo di impiego, e del tipo di manipolazioni effettuate sul materiale radioattivo
- può essere utile allo scopo il concetto di “**attività pesata**”

Attività pesata

Attività pesata: massima attività **A** che può essere normalmente presente in un'area di lavoro, moltiplicata per un primo fattore, **f₁**, che dipende dal tipo di radioisotopo in uso e per un secondo fattore, **f₂**, determinato dal tipo di operazione

$$\text{attività pesata} = A \times f_1 \times f_2$$

Come calcolare l'attività pesata

- 1 Determinare la massima attività di ciascun preparato che può trovarsi ad ogni istante in ogni ambiente di lavoro
- 2 Moltiplicare il valore determinato per un fattore di peso dipendente dal tipo di sostanza radioattiva impiegata
- 3 Moltiplicare il valore determinato per un secondo fattore di peso che descrive la “*pericolosità*” della manipolazione effettuata sul preparato radioattivo

Attività pesata: coefficiente f_1

Classe	Radionuclide	Peso
A	^{75}Se , ^{89}Sr , ^{125}I , ^{131}I	100
B	^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{51}Cr , ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , $^{113\text{m}}\text{In}$, ^{123}I , ^{201}Tl	1.0
C	^3H , ^{14}C , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{127}Xe , ^{153}Xe	0.01

Attività pesata: coefficiente f_2

Tipo di manipolazione	Peso
Immagazzinamento	0.01
Manipolazione rifiuti, esami scintigrafici, attesa pazienti	0.1
Somministrazione, camera calda, degenza	1.0
Preparazioni complesse di radiofarmaci	10

Categoria di rischio

Attività Pesata (MBq)	Categoria di rischio
< 50	Basso
> 50 < 50000	Medio
> 50000	Alto

Norme UNI 10491 (11/95)

- Vengono definite 4 zone:
 - **Zona A**: nelle normali condizioni di lavoro dosi $< 3/10$ limiti di dose
 - **Zona B**: appropriato contenimento della contaminazione verso la zona A: dosi $> 3/10$ ma $<$ Limiti di dose
 - **Zona C**: appropriato contenimento della contaminazione verso la zona A e B: dosi anche maggiori dei limiti di dose in caso lavoro continuativo (lavoro soggetto a limitazioni temporali e/o obbligo di indossare indumenti protettivi)
 - **Zona D**: elevati campi di radiazione e/o contaminazione: accesso interdetto nelle normali condizioni di lavoro e appropriato contenimento della contaminazione verso la zona A, B e C

Classificazione UNI 10491

- In un servizio di diagnostica in vivo si verificano le condizioni tipiche della zona A, B, C (camera calda)
- In un servizio di diagnostica in vivo o radioterapia metabolica si verificano le condizioni tipiche della zona A, B, C (Stanze di degenza)

Classificazioni tipiche delle installazioni

- i **reparti di radioterapia metabolica** rientrano di norma nella categoria ad “**alto rischio**”
- i **servizi di medicina nucleare diagnostica** rientrano di norma nella categoria a “**medio rischio**”
- i **laboratori** per l’impiego “in vitro” di sostanze radioattive non sigillate a scopo sanitario rientrano di norma nella categoria a “**basso rischio**” (un discorso a parte va fatto per le operazioni di marcatura con sostanze radioattive ad alta attività specifica)

La definizione della categoria di rischio
dell'installazione consente di
dimensionare opportunamente e
motivatamente i dispositivi di
radioprotezione

Caratteristiche di un progetto ottimizzato



Definizione della classe di rischio dell'installazione



Scelta dei dispositivi tecnici di protezione in funzione della classe di rischio



Layout del reparto



Calcolo delle barriere

Dispositivi di radioprotezione in funzione della categoria di rischio dell'installazione

Categoria di rischio	Pavimenti	Superfici	Cappa	Ventilazione	Primo intervento
Basso	Lavabili	Lavabili	No	Normale	Lavello
Medio	Impermeabili e facilmente lavabili	Lavabili	Si	Buona	Lavello e doccia
Alto	Continui e risalenti a sguscio	Lavabili	Si	Estrazione dell'aria	Lavello e doccia

Principi generali di progettazione

- Disponibilità di spazi adeguati per lavoratori, pazienti e attrezzature (per sfruttare l'elemento distanza)
- Scelta dei materiali in relazione alla loro resistenza ad agenti chimici, al colore e al fuoco e alla loro decontaminabilità
- le superfici di lavoro, ivi comprese le cappe, devono essere progettate al fine di sopportare i pesi del materiale schermante
- I circuiti per decontaminazione devono essere progettati in maniera idonea: i lavelli devono essere a contatto ottico o azionabili a gomito o pedale

Principi generali di progettazione

- Scarichi caldi collegati a un sistema di vasche di contenimento progettate secondo le norme di buona tecnica
- Lo scarico della cappa deve essere posto ad almeno 10 metri da ogni presa d'aria di impianti di condizionamento
- I servizi igienici dei pazienti devono essere diversi da quelli dei lavoratori

Principi generali di progettazione

- La cella calda deve essere facilmente decontaminabile ed idoneamente schermata (almeno 10 spessori decivalenti) (compartimentazione?)
- E' preferibile l'impiego di vetro piombifero all'uso di occhiali anti-X: pertanto l'area di lavoro dovrà essere adeguatamente schermata anche con un vetro anti X
- Va valutata da caso a caso la necessità di schermature aggiuntive nei diversi ambienti di lavoro

Caratteristiche di una cella calda per medicina nucleare

- Tipici spessori (mm di Pb)
 - parete frontale e piano di lavoro: 30
 - parete posteriore laterale e soffitto: 20
 - vetro anti-X: 10
 - zona eluitori: 30
 - zona calibratore: 10
 - zona rifiuti: 10
- Contenitore per colonne
- Contenitore per rifiuti
- **Attenzione alle aperture per le mani**



Principi generali di progettazione

- Gli ambienti destinati allo stoccaggio dei rifiuti radioattivi devono essere adeguati per un immagazzinamento a breve e medio periodo
- Devono essere adeguatamente ventilati e ad accesso regolamentato
- Nel caso di rifiuti contenenti residui biologici, può essere necessaria la refrigerazione

Ventilazione: generalità

- La ventilazione della camera calda deve essere tale da mantenere in depressione (1 mm di Hg o 10 cm di H₂O) rispetto agli ambienti circostanti
- L'aria in uscita dalla camera calda deve essere filtrata (filtro assoluto e a carbone attivo)
- Il condotto di esalazione deve essere separato rispetto al normale condotto di esalazione dell'edificio
- Il motore del ventilatore deve essere posizionato all'esterno del condotto al fine di evitare ogni possibile contaminazione e facilitarne la manutenzione
- La cappa aspirante è obbligatoria per operazioni con isotopi radioattivi volatili; la cappa dovrebbe produrre una regolare corrente d'aria senza produrre vortici

Norme UNI 10491: ventilazione

- L'aria deve essere condizionata
- il flusso dell'aria di ventilazione deve essere diretto dalle zone di minore contaminazione potenziale verso le zone di maggiore contaminazione potenziale, mantenendo queste ultime in depressione rispetto alle prime
- L'aria scaricata all'esterno deve essere filtrata
- L'aria immessa all'interno deve essere filtrata per ridurre il carico di polvere e limitare così la risospensione
- La presa esterna deve essere ubicata in modo da evitare la ricircolazione dell'aria di scarico
- Il sistema di ventilazione non deve prevedere il ricircolo

NORME UNI: depressione

Tra la zona A e la Zona Libera	Alcune decine di pascal
Tra la zona B e la zona A	Da 30 Pa a 60 Pa
Tra la zona C e la zona B	Da 50 Pa a 100 Pa
Tra la zona D e la zona C	Da 150 a 450 Pa

NORME UNI: ricambi aria

Zona A e B	da 2 a 5 volumi/h
Zona C	Da 5 a 10 volumi/h
Zona D	Oltre 10 volumi/h

Caratteristiche di un progetto ottimizzato



Definizione della classe di rischio dell'installazione



Scelta dei dispositivi tecnici di protezione in funzione della classe di rischio



Layout del reparto



Calcolo delle barriere

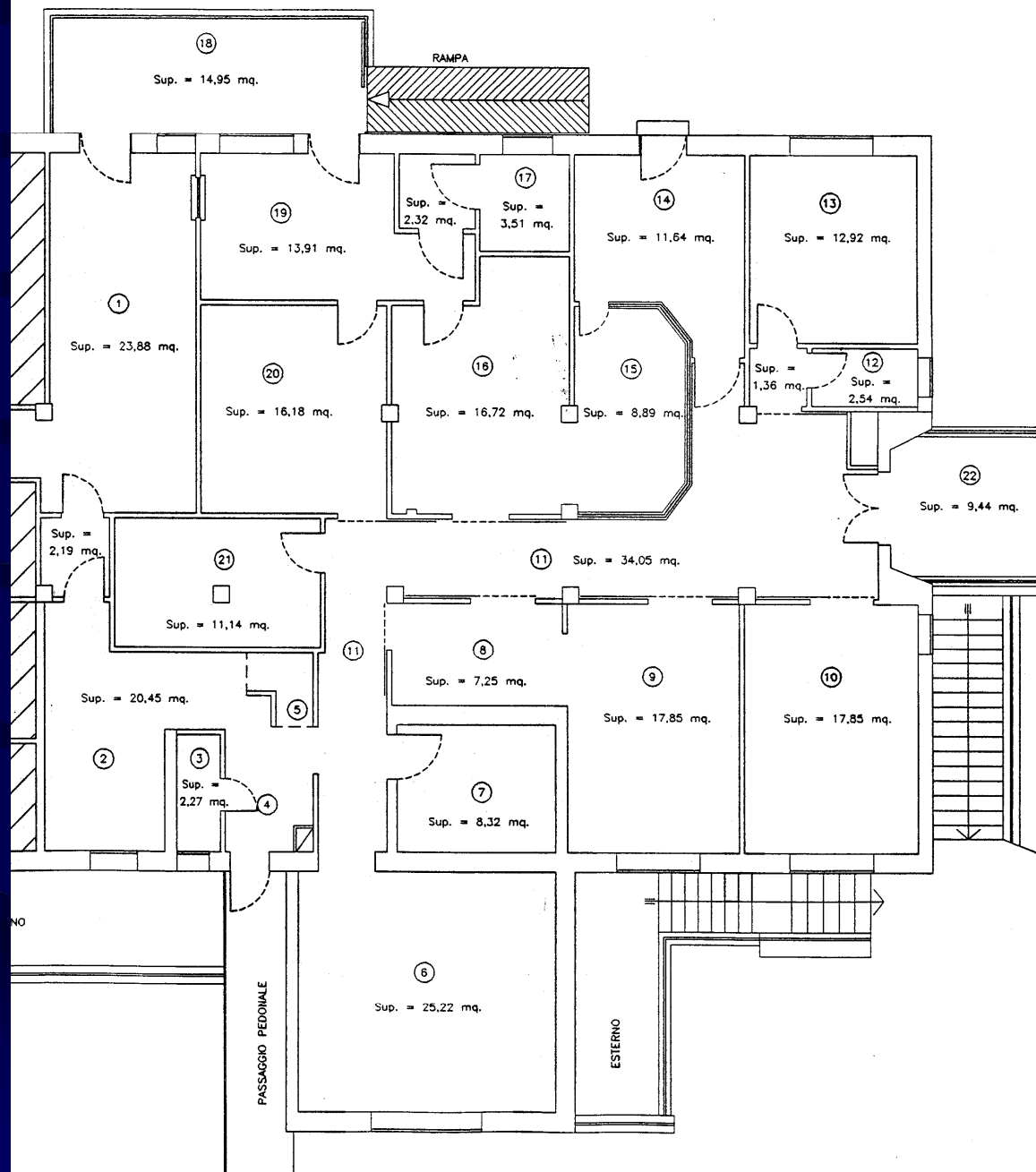
Layout dell'installazione: diagnostica in vivo

- Percorsi differenziati in ingresso e in uscita per il personale
- Percorsi differenziati per personale e paziente
- Servizi igienici separati per personale e pazienti
- Spogliatoi del personale in “zona fredda”
- Attesa “Calda” separata dalla zona fredda
- Circuito di decontaminazione
- Minimizzare i percorsi e il trasporto di sostanze radioattive
- Presenza di una camera calda, locale di somministrazione, diagnostiche

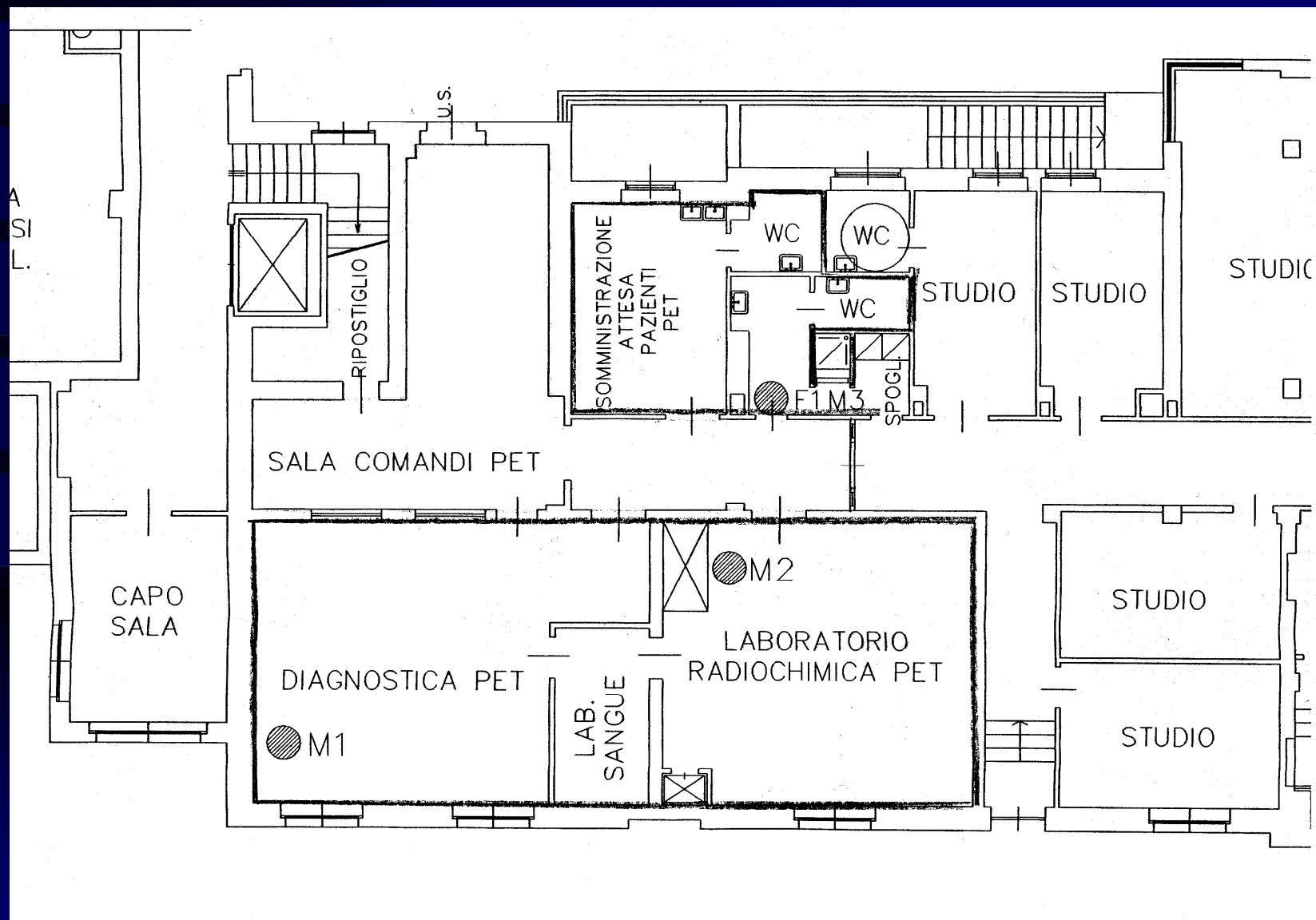
Layout dell'installazione: diagnostica in vivo

- Gli itinerari e i passaggi tra le diverse zone devono essere disposti in modo che, in entrata, il personale passi sempre da una zona a contaminazione o irradiazione minore ad una zona a contaminazione o irradiazione più elevata
- I radiofarmaci devono di norma essere somministrati in una sala diversa da quella in cui viene effettuato l'esame scintigrafico ad eccezione degli studi che richiedono che il paziente sia già posizionato al momento della somministrazione (es studi cardiologici)

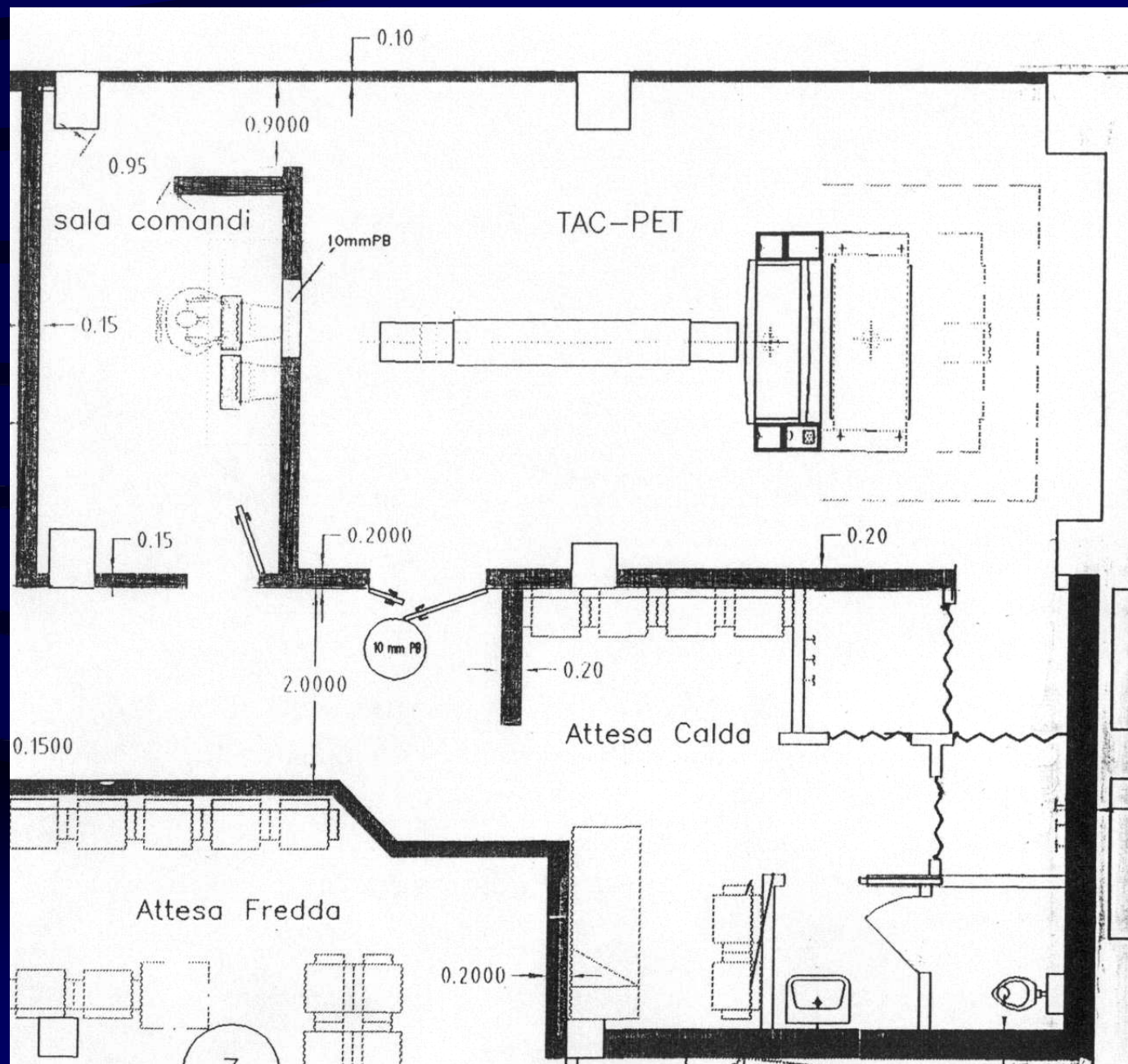
Medicina Nucleare

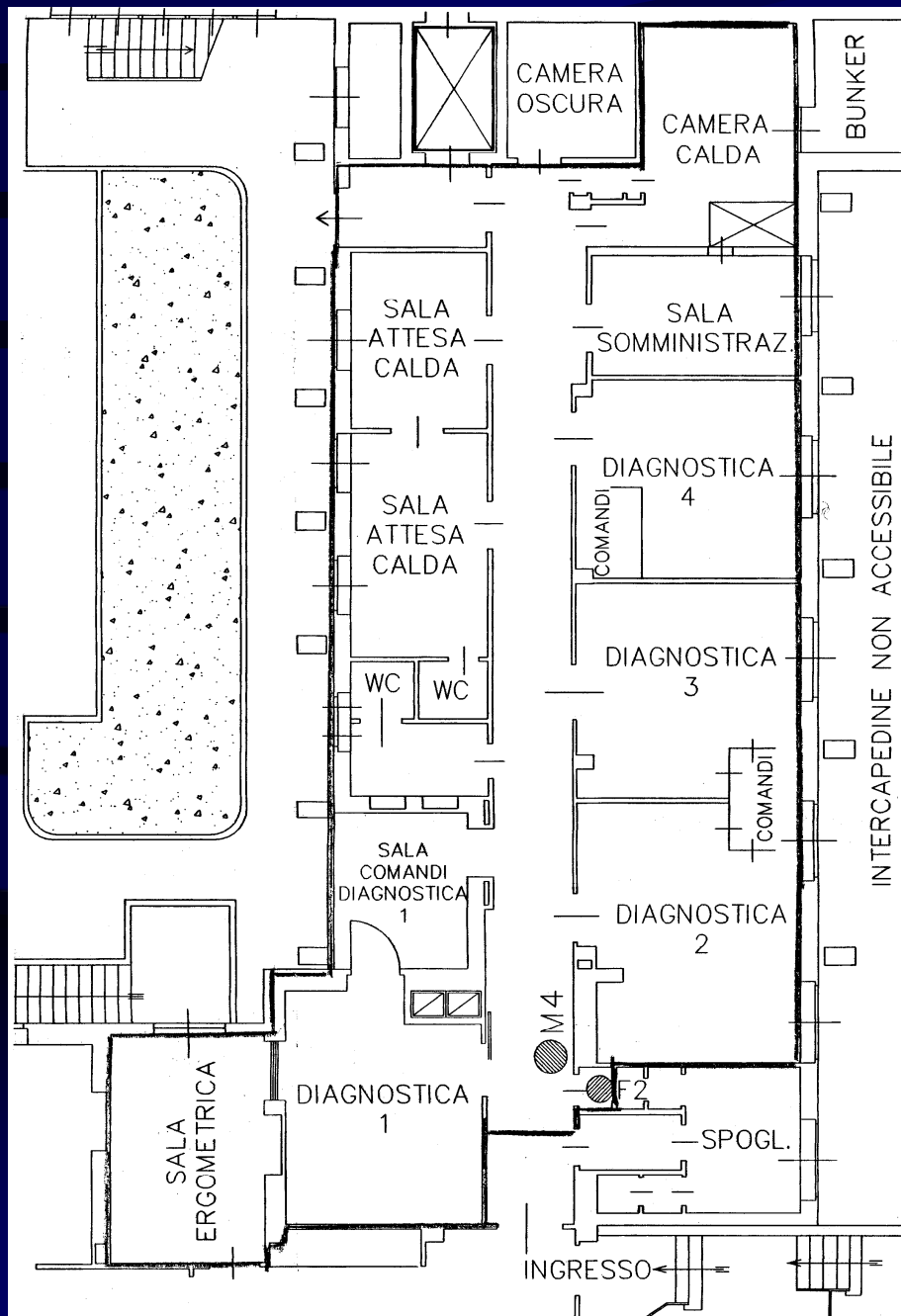


PET



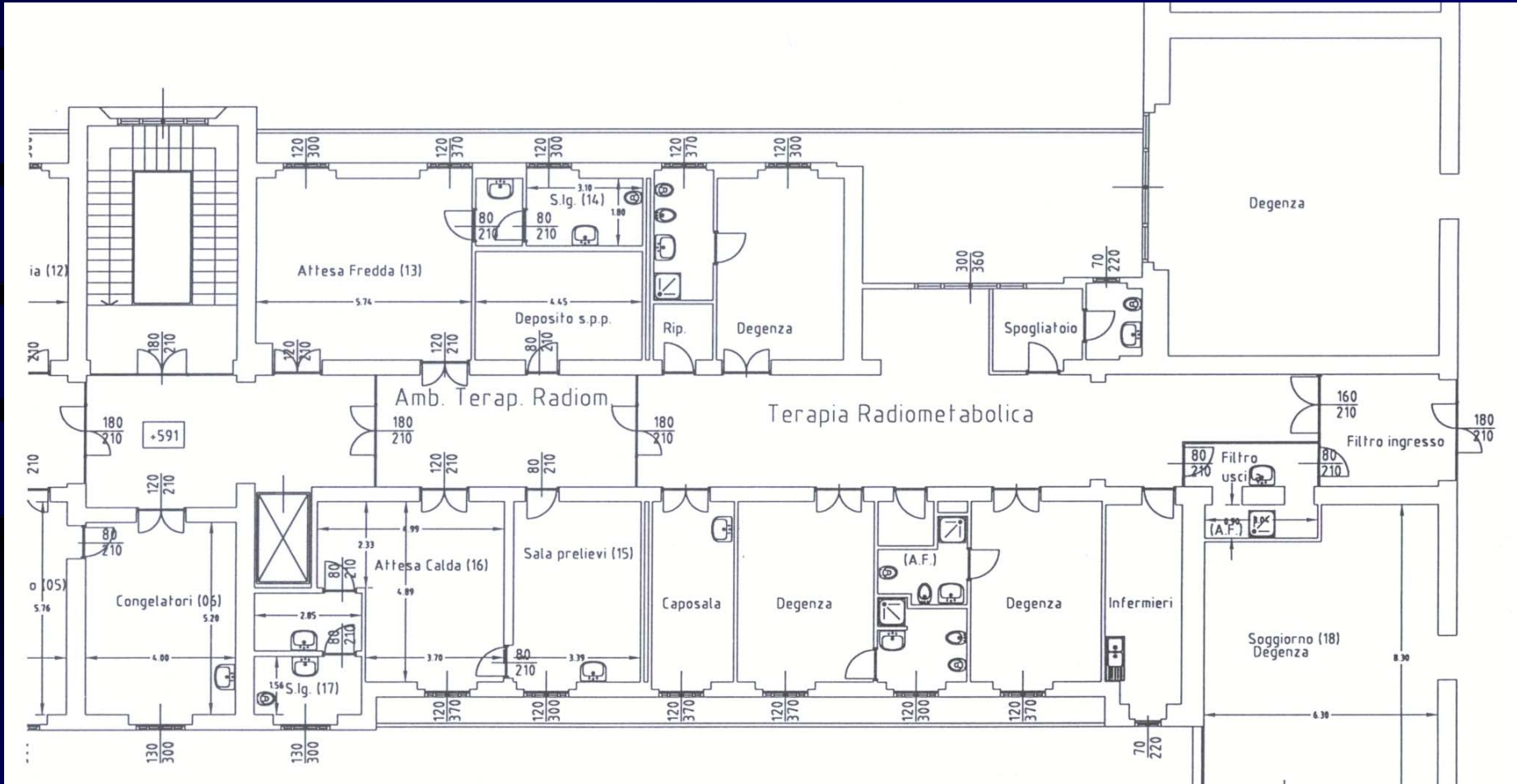
PET





Medicina Nucleare

Terapia Radiometabolica con degenza protetta



Layout dell'installazione: terapia radiometabolica con gamma emettitori

- Percorsi differenziati in ingresso e in uscita per il personale
- Percorsi differenziati in ingresso e in uscita per il paziente
- Percorsi differenziati per personale e paziente
- Spogliatoi del personale in “zona fredda”
- Circuito di decontaminazione
- Camere a uno o max 2 letti dotate ciascuna di un proprio servizio igienico
- Se viene impiegato ^{131}I in forma liquida, camera calda
- **Attenzione alle procedure di gestione del paziente**

Layout dell'installazione: terapia radiometabolica con gamma emettitori

- Gli itinerari e i passaggi tra le diverse zone devono essere disposti in modo che, in entrata, il personale passi sempre da una zona a contaminazione o irradiazione minore ad una zona a contaminazione o irradiazione più elevata
- Se possibile la somministrazione delle capsule di ^{131}I deve avvenire all'interno della stanza di degenza

Layout dell'installazione Laboratori R.I.A.

- Area di lavoro sufficientemente ampia (non inferiore a 12 m²/operatore)
- Area di lavoro separata dagli altri ambienti di lavoro
- La zona in cui vengono effettuate le misure di radioattività deve essere separata da altre zone di lavoro
- In prossimità dell'uscita dall'area di lavoro devono essere installati lavelli per la pulizia delle mani azionabili senza fare uso delle mani
- Presenza della doccia all'uscita dell'area di lavoro se vengono impiegate attività giornaliere dell'ordine di qualche decina di MBq (Non è necessaria una doccia passante)
- Cappa aspirante obbligatoria per operazioni di marcatura con isotopi radioattivi volatili: deve essere dotata di filtro assoluto e/o a carbone attivo

Apparecchiature mobili

- La strumentazione mobile può essere utilizzata in ambienti non protetti al letto del paziente solo in casi eccezionali
- Nei reparti (es. Unità Coronarica) in cui può essere previsto più di un esame/mese deve essere disponibile:
 - un deposito schermato temporaneo per piccoli quantitativi di radioattività ($< 1\text{GBq}$)
 - Lavabo a scarico controllato
 - punto di controllo della contaminazione individuale
- Il trasporto delle sorgenti radioattive deve essere effettuato impiegando contenitori schermati

Caratteristiche di un progetto ottimizzato



Definizione della classe di rischio dell'installazione



Scelta dei dispositivi tecnici di protezione in funzione della classe di rischio



Layout del reparto



Calcolo delle barriere

Calcolo delle barriere generalità

Obiettivo fondamentale nel calcolo delle barriere è fare in modo che i campi di radiazione dovuti alla somma dei j termini sorgente nel punto di interesse siano ridotti al di sotto dei limiti di dose e dell'obiettivo di progetto adottato

$$\dot{H} \leq \dot{H}_p \text{ con } \dot{H} = \sum_j \frac{\dot{D}_j \times B_j \times T}{d_j^2}$$

$\dot{D}_j$ = dose rate alla distanza di 1 m ($\text{Gy m}^2\text{h}^{-1}$) dovuto al j-esimo termine

B_j = coefficiente di trasmissione relativo alla j-esima sorgente

T = fattore di occupazione dell'area di interesse

d_j = distanza dalla j-esima sorgente dal punto di interesse

Calcolo delle barriere generalità

La relazione precedente consente di calcolare il coefficiente di trasmissione richiesto per soddisfare l'obiettivo di progetto

$$\frac{\dot{D} \times B \times T}{d^2} \leq \dot{H}_P \Rightarrow B \leq \frac{\dot{H}_P \times d^2}{\dot{D} \times T}$$

$$B = 1/10^n$$



$$n = -\log_{10} B$$

con n = numero di spessori decivalenti

Parametri che intervengono nel calcolo delle barriere



**obiettivo di progetto
adottato**



carico di lavoro e distanza



fattori di occupazione



energia dei fotoni emessi



materiale impiegato

Calcolo delle barriere

- Vincoli dosimetrici inferiori al pertinente limite di dose
- Rigorosamente dovrebbero essere oggetto dell'applicazione del principio di ottimizzazione
- Tipici obiettivi di progetto adottabili
 - Box comandi: 1 mSv/anno
 - Zone di libero accesso alla popolazione: 0.25 mSv/anno
 - Studi medici: 1 mSv/anno
 - Zone occupate da lavoratori non esposti: 0.50 mSv/anno

Calcolo delle barriere:diagnostica

- Può essere espresso come prodotto di:
 - la massima quantità di sostanza radioattiva impiegata per operazione
 - la durata annua dell'esposizione
 - la costante Γ specifica di interesse
- **Esempio:** sala diagnostica, 12 pazienti al giorno, 200 giorni/anno attività somministrata 740 MBq/paziente, durata dell'esame 30 minuti)

Calcolo del carico di lavoro

$$(740 \times 12 \times 200 \times 30/60) = 888 \text{ GBq} \times \text{h} \times \text{anno}^{-1} \times \Gamma \text{ (mSv GBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^2\text{)}$$



[mSv anno⁻¹ m²]

Calcolo delle barriere

Carico di lavoro: radioterapia metabolica con ^{131}I

- Può essere espresso come prodotto di:
 - l'attività media presente nella stanza di degenza nei t giorni di degenza previsti [MBq]
 - la durata dell'esposizione (ore settimana)
 - il numero di settimane per anno
 - la costante Γ specifica di interesse [mSv/MBq h^{-1} a 1 m o a 0.3 m]

Calcolo delle barriere

Radioterapia metabolica con ^{131}I

- La scelta del $T_{1/2}$, nel caso del ^{131}I , dipende dalla patologia trattata
- Usare il $T_{1/2}$ fisico può risultare eccessivo nel caso di terapia delle metastasi
- Mediamente può essere utilizzato un $T_{1/2}$ effettivo di circa 18 ore (ma con cautela nel caso di somministrazione di Lipiodol)

Attività media

$$\frac{\int_0^t A_0 \times e^{-\lambda \times t} dt}{t} = \frac{-A_0 \times [e^{-\lambda \times t} - 1]}{\lambda \times t}$$

Calcolo delle barriere

Carico di lavoro: radioterapia metabolica con ^{131}I

- **Esempio:** 2 pazienti, attività somministrata 3700 MBq/paziente, durata della degenza 2.5 g

$$\frac{-2 \times 3700 \times [e^{-0.92 \times 2.5} - 1]}{0.92 \times 2.5} \cong 2900 \text{ MBq}$$

Calcolo del carico di lavoro

$$(2900 \times 24 \times 5 \times 52) \approx 18000 \text{ GBq} \times \text{h} \times \text{anno}^{-1} \times \Gamma \text{ (mSv GBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^2\text{)}$$



$$[\text{mSv anno}^{-1} \text{ m}^2]$$

Calcolo delle barriere gamma specifica

Sostanza radioattiva	Emissione Principale (keV)	Gamma Specifica [mSvh ⁻¹ MBq ⁻¹] a 30 cm
⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	141	5.43e-4*
^{99m} Tc	141	2.61e-4
¹³¹ I	365	7.29e-4*
¹⁸ F	511	1.81e-3*

* Solo radiazione elettromagnetica

Calcolo delle barriere campi di radiazione generati dal paziente

Esame/Terapia	Radiofarmaco	Attività (MBq)	Rateo di dose equivalente ($\text{nSv h}^{-1} \text{MBq}^{-1}$)					
			Subito dopo la somministrazione			Due ore dopo la somministrazione		
			A contatto	0.3 m	1 m	A contatto	0.3 m	1 m
Scintigrafia ossea	$^{99\text{m}}\text{Tc MDP}$	150 – 600	27	13	4	13	7	2
Scintigrafia epatica	$^{99\text{m}}\text{Tc Colloide}$	10 – 250	27	13	4	20	10	3
Determinazione del volume plasmatico	$^{99\text{m}}\text{Tc RBC}$	550 – 740	27	13	4	20	10	3
Scintigrafia Miocardica	^{201}Tl	50 - 110	36	18	6	36	18	6
Localizzazione metastasi	^{18}F	250 - 500	/	/	70 - 150			
Terapia ablativa	^{131}I	3000	/	/	30 - 50			
Terapia delle metastasi	^{131}I	5550	/	/	30 – 50			
Ipertiroidismo	^{131}I	185	/	/	50 – 80			

Calcolo delle barriere

- Vanno dimensionati sulla base di una stima conservativa della permanenza di **lavoratori** nell'area di interesse
- Tipici fattori di occupazione (Diagnostica)
 - Box comandi: 1
 - Corridoi, porte: 1/4
 - Studi medici: 1
 - Reparti soprastanti o sottostanti: 1
- Tipici fattori di occupazione (Terapia)
 - Corridoi, porte: $\leq 1/3$
 - Studi medici: 1
 - Reparti soprastanti o sottostanti: $\leq 1/3$

Calcolo delle barriere Attenuazione dei materiali

Radionuclide	Piombo (mm)		Calcestruzzo (cm)	
	SeV	TVL	SeV	TVL
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	1	19	/	/
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	<1	1	3.3	10.0
^{18}F	6	17	6.4	22.0
^{131}I	3 (7)	11 (24)	(4.6)	(15.3)

I-131: valori tra parentesi relativi a fasci fortemente attenuati (ICRP 15 e 21)

I valori relativi al calcestruzzo da “F. Wachsmann G Drexler, Graph and tables for use in radiology, 1976

Calcolo delle barriere Attenuazione dei materiali

	SeV Pb	SeV Cemento	SeV Mattone pieno
^{18}F	4,05 mm (Kearfoot et al., 1992) 6 mm (Delacroix et al., 2002) 4,3 mm (Guasti)	3,5 cm (Kearfoot et al., 1992) 3,51 cm (Guasti)	
^{18}F Paziente	2,9 - 3 mm (Saitta, Zito)	/	6 cm (Zito)

Esempio di calcolo delle barriere

Diagnostica scintigrafica

Radionuclide	Attività di riferimento [MBq]	Attività di riferimento [mCi]	Campo di radiazione di riferimento [nSv/h a 1 m per MBq]	TVL [mm di Pb]	Ore/giorno di riferimento	Giorni/anno di riferimento
99m-Tc	740	20	4	1.0	6	200

		888000 MBq anno ⁻¹ h
		4 nSv MBq ⁻¹ h ⁻¹ m ²
Carico di lavoro		3.6 mSv anno⁻¹ m²
Distanza sorgente/punto di interesse	:	2 m
Obiettivo di progetto	:	0.25 mSv/anno
Fattore di occupazione	:	1
Trasmissione necessaria (B)	:	2.78E-01
Numero di spessori decivalenti	:	0.6
TVL in Pb	:	1 mm
Schermatura necessaria (mm di Pb)	:	0.6

Schermature normalmente realizzate (PET)

- 5 - 10 mm piombo
- 18 - 24 cm mattone pieno
- 12 - 20 cm calcestruzzo