

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di FISICA

Scuola di Dottorato

Scienza e Tecnica "Bernardino Telesio"

Indirizzo

Ponte P. Bucci - Cubo 31C - Arcavacata di Rende (Cs)

CICLO: XXVII

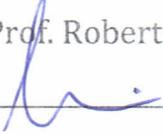
TITOLO TESI

*Sorveglianza fisica della protezione contro le radiazioni ionizzanti relativa
alla costruzione e all'esercizio della sorgente STAR nell'ambito del progetto*

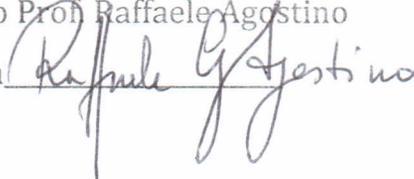
MATERIA.

Settore Scientifico Disciplinare FIS/01 FISICA SPERIMENTALE

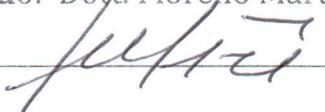
Direttore: Ch.mo Prof. Roberto Bartolino

Firma  _____

Supervisore: Ch.mo Prof. Raffaele Agostino

Firma  _____

Dottorando: Dott. Fiorello Martire

Firma  _____

Premessa

Il progetto MATERIA è un'iniziativa congiunta tra l'Università della Calabria (UNICAL) ed il Consorzio Nazionale Interuniversitario Scienze della Materia (CNISM) che ha la finalità di creare un centro di servizio, con visibilità a livello internazionale, per lo studio di materiali per tecnologie avanzate, all'interno di un sistema integrato che raccorda la ricerca di base, prodotta in ambito universitario, con la costruzione prototipale di dimostratori che ne validano le potenzialità applicative individuate tramite un approfondito studio di specifiche proprietà di interesse applicativo.

Tale progetto è basato sulla realizzazione di una infrastruttura di ricerca utilizzando una sorgente di raggi X innovativa ed evolutiva denominata **STAR** (*Southern Europe TBS for Applied Research*) basata sulla retrodiffusione Thomson di radiazione laser da fasci di elettroni veloci (*Thomson Back Scattering – TBS*).

In seguito all'impiego di tale sorgente, negli ambienti in cui essa verrà installata ed in quelli ad essi limitrofi esisterà il potenziale rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti per tutte le persone che, a vario titolo, potrebbero interagire con i campi di radiazione da essa prodotti.

Scopo del presente lavoro è dunque quello di valutare e determinare le misure di sicurezza attive e passive necessarie ad assicurare, all'interno ed all'esterno dei suddetti locali condizioni di lavoro e di permanenza nel rispetto della normativa vigente, con particolare riguardo ai limiti di dose per il personale esposto e per la popolazione .



Indice

1. Il sito di installazione
 2. Obiettivi del progetto e descrizione della sorgente STAR
 - 2.1 Caratteristiche della sorgente
 - 2.2 Sorgente di elettroni e acceleratore lineare
 3. Caratteristiche di funzionamento
 4. Perdite di corrente
 5. Schermature
 - 5.1 Obiettivi di progetto
 - 5.2 Termini sorgente
 - 5.3 Labirinti di accesso
 - 5.4 Penetrazioni tecniche
 - 5.5 Skyshine
 6. Processi di attivazione
 - 6.1 Produzione di gas radioattivi
 - 6.2 Produzione di gas tossici
 - 6.3 Attivazione delle acque di raffreddamento dei circuiti
 7. Valutazione del rischio radiologico per i lavoratori e la popolazione dovuto all'impianto
 - 7.1 Condizioni normali
 - 7.2 Condizioni di incidente
 8. Apparati radiogeni ausiliari (klystron) e sorgenti radioattive di taratura per la strumentazione di radioprotezione e degli apparati sperimentali
 9. Sala sperimentale
 10. Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza STAR
 - 10.1 Collaudo del Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza
 - 10.2 Collaudo delle schermature
 - 10.3 Impianto di ventilazione e di raffrescamento
 - 10.4 Sistema antincendio
 11. Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza Sala Sperimentale
 12. Classificazione delle aree
 13. Classificazione del personale
 14. Organizzazione funzionale dell'impianto
 15. Valutazioni ex art. 115-ter
 16. Smantellamento impianto
- Bibliografia

1. Il sito di installazione

La macchina radiogena **STAR** (*Southern Europe TBS source for Applied Research*) [1] che verrà installata presso l'Università della Calabria, Arcavacata di Rende (Cs) sarà allocata in un bunker realizzato con strutture in calcestruzzo di adeguato spessore, il quale sarà a sua volta collocato in un hangar che ospiterà anche tutte le altre "facilities" a supporto della sorgente e del progetto di ricerca.

La visione satellitare dell'area universitaria destinata all'installazione dell'impianto STAR e dei suoi locali di supporto e' riportata nella mappa di cui all'allegato 1.

Il sito dell'area di installazione, con l'indicazione dell'ubicazione degli impianti e delle infrastrutture e' descritto nell'allegato n.2

I particolari dell'area d'installazione dell'acceleratore e delle apparecchiature di supporto sono descritte nell'allegato n.3

La planimetria del bunker completa del posizionamento della sorgente STAR. è riportata nell'allegato 4.

2. Obiettivi del progetto e descrizione della sorgente STAR.

Tale progetto è basato sulla realizzazione di una infrastruttura di ricerca utilizzando una sorgente di raggi X innovativa ed evolutiva denominata **STAR** (*Southern Europe TBS for Applied Research*) basata sulla retrodiffusione Thomson di radiazione laser da fasci di elettroni veloci (*Thomson Back Scattering – TBS*).

Detta sorgente di raggi X è basata sull'impiego di un acceleratore lineare (Linac) dotato di un foto-iniettore RF ad alta brillantezza e da una sorgente laser di classe J, di alta potenza media e sincronizzata con la sorgente di elettroni. I fotoni X sono prodotti nell'urto frontale tra i pacchetti di elettroni prodotti dal Linac RF e gli impulsi prodotti dal laser ottico.

2.1 Caratteristiche della sorgente

Le principali caratteristiche dei raggi X prodotti dalla sorgente STAR sono:

Intervallo energetico: da 8 keV a 5 MeV

Flusso max $5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

Larghezza di banda 1% – 10%

Divergenza 0.1 mrad a 5 MeV – 20 mrad a 8 keV

Dimensione trasversa 10 micron alla sorgente (interaction point)

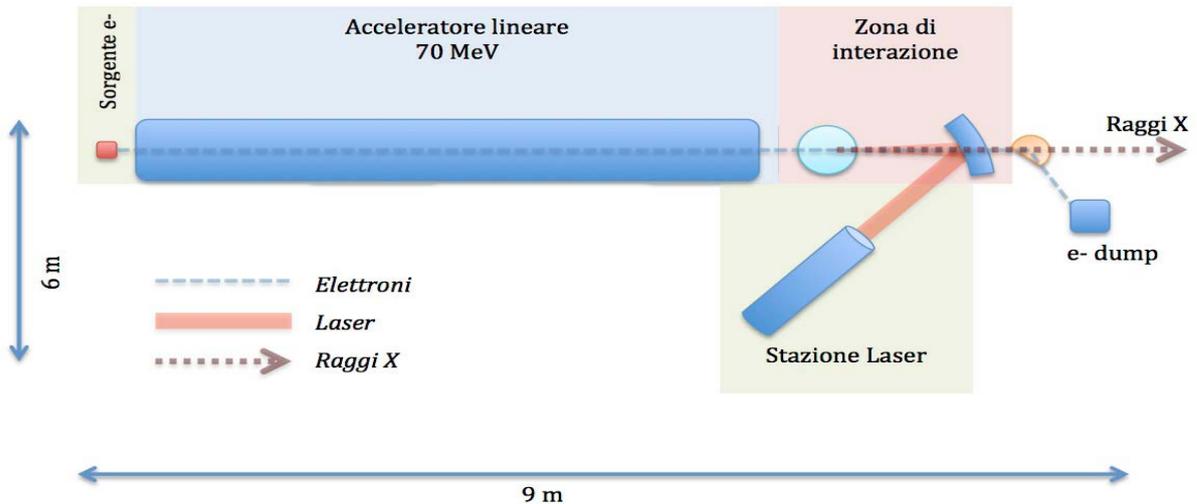


Figura 1 . Distribuzione schematica degli apparati costituenti la sorgente STAR

I fotoni X sono prodotti nell'urto frontale tra i pacchetti di elettroni emergenti dal Linac e gli impulsi prodotti dal laser ottico. Il campo e.m. associato alla radiazione laser è visto dal fascio di elettroni come un onduttore ottico viaggiante alla velocità della luce. Questo porta gli elettroni a generare radiazione di sincrotrone nella loro direzione di propagazione. La radiazione prodotta ha caratteristiche uniche: è sintonizzabile variando l'energia del fascio di elettroni, è collimata, ha dimensioni della sorgente (circolare) nell'intervallo 1-10 micron, mantiene la stessa struttura temporale del fascio di elettroni costituita da impulsi di radiazione isolati lunghi 1 ps, con larghezza di banda regolabile fra 0.1% fino al 10%, e flussi da 10^8 fino a 10^{12} fotoni/s.

2.2 Sorgente di elettroni e acceleratore lineare

Il fascio di elettroni, dalle dimensioni di $1 \times 1 \text{ mm}^2$, è prodotto da un foto-iniettore (*Photoinjector*) ad un'energia massima di 5,5 MeV. La carica per impulso è di 1 nC in modalità single-bunch (30x1 nC in modalità multi-bunch). Il fascio così prodotto, successivamente accelerato in una sezione lineare (*High Gradient Linac*) che gli fornisce l'energia desiderata, viene focalizzato nel punto di collisione in una regione di dimensione $0.01 \times 0.01 \text{ mm}^2$ da parte di sistemi magnetici a quadrupoli compatti anche a magneti permanenti (*focusing magnets* e *final focus*). In figura 2 e 2 bis è riportato il disegno CAD dell'intero acceleratore da cui è possibile evincere i dettagli del canale a bassa energia e di quello ad alta energia.

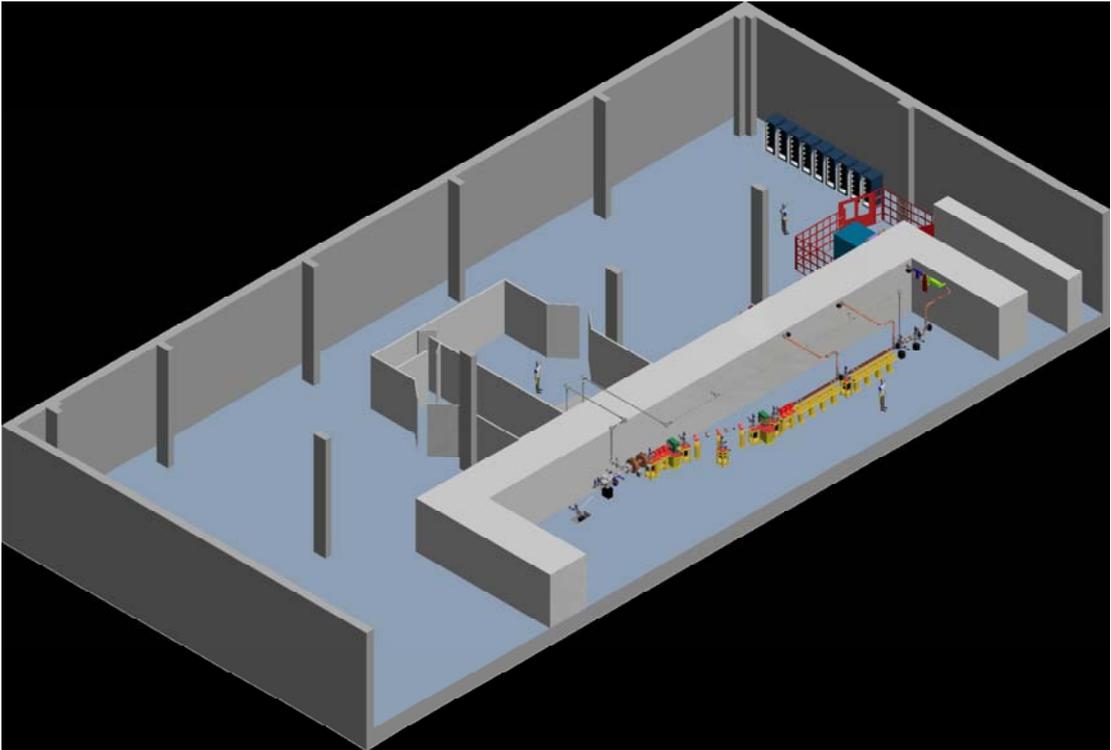


Figura 2 Star – Disegno Cad in 3D

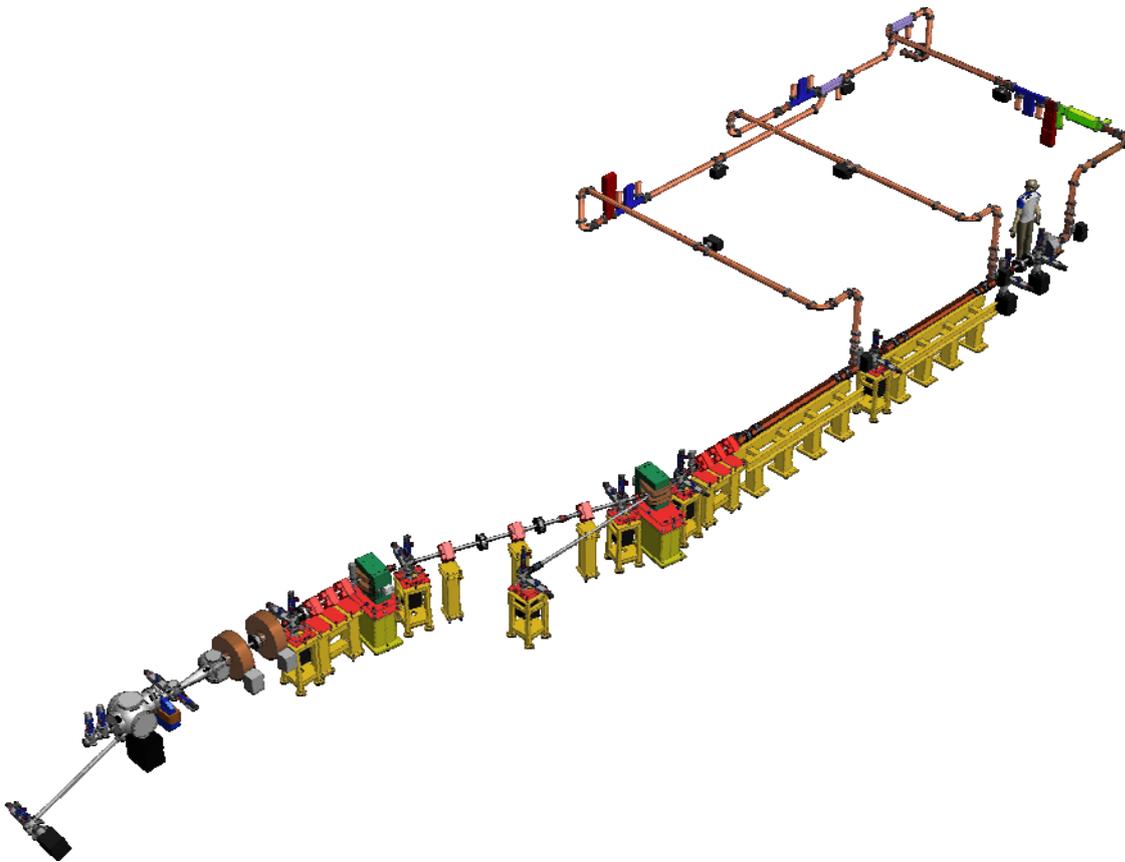


Fig.2 bis STAR - Dettaglio della linea a bassa energia e di parte di quello ad alta energia

3. Caratteristiche di funzionamento

Il progetto prevede la realizzazione dell'intero complesso in tre fasi successive. Da un punto di vista delle valutazioni di radioprotezione, le caratteristiche di funzionamento fondamentali per le tre fasi sono di seguito riportate:

Fase 1

Elettroni

Energia massima all'uscita della regione di accelerazione: 60 MeV

Corrente media 150 nA, corrente di buio inclusa

Perdita di fascio lungo la linea da vuoto: 50 nA prima della prima sezione acceleratrice
40 nA prima dell'inizio della dogleg

Raggi X

Intervallo energetico: 1 – 120 keV

Flusso: $5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$

Fase 2

Elettroni

Energia massima all'uscita della regione di accelerazione: 85 MeV

Corrente media 150 nA, corrente di buio inclusa (100nA)

Perdita di fascio lungo la linea da vuoto: 50 nA prima della prima sezione acceleratrice
40 nA prima dell'inizio della dogleg

Raggi X

Intervallo energetico: 7 – 240 keV

Flusso: $5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$

Fase 3

Elettroni

Energia massima all'uscita della regione di accelerazione: 350 MeV

Corrente media: 3,1 μA , corrente di buio inclusa

Perdita di fascio lungo la linea da vuoto: 50 nA prima della prima sezione acceleratrice
40 nA prima dell'inizio della dogleg

Raggi X

Energia massima: 5 MeV

Flusso: $5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$

4. Perdite di corrente

In condizioni di funzionamento ottimale il fascio viaggia indisturbato fino al punto di interazione, salvo eventuali default degli elementi magnetici.

Per i calcoli relativi al dimensionamento delle schermature vengono prese in considerazione tutte le eventuali perdite di fascio, ivi compresa la corrente di buio emessa dal cannone durante l'impulso RF.

La corrente di buio prodotta durante l'impulso RF è pari a 100nA in tutte le fasi. Le perdite di tale corrente sono ripartite nel seguente modo:

Fase 1 e 2

50 nA lungo la linea da vuoto prima della prima sezione acceleratrice

40 nA prima dell'inizio della dogleg della linea a bassa energia

10 nA vengono accelerati fino al punto di interazione

La corrente utilizzabile nel punto di interazione risulta pertanto essere in entrambi le fasi pari a 60 nA (50 nA corrente di bunch +10 nA corrente di buio)

Fase 3

50 nA lungo la linea da vuoto prima della prima sezione acceleratrice

40 nA prima dell'inizio della dogleg della linea ad alta energia

10 nA vengono accelerati fino al punto di interazione.

La corrente media utilizzabile nel punto di interazione risulta pertanto essere pari a 3100nA

5. Schermature

La sorgente STAR verrà installata in un bunker in calcestruzzo ordinario , a sua volta ospitato all'interno di un hangar (vedi figura 3). Il bunker ha due pareti completamente interrato mentre le altre due ed il tetto completamente fuori terra.

Il fascio di raggi X prodotto dalla sorgente STAR verrà utilizzato all'interno di un'area sperimentale contigua alla parete terminale del bunker che ospiterà la sorgente stessa. Detta area sarà delimitata da pareti e tetto schermante

Pertanto, noto il carattere del rischio, fissate le procedure operative d'impiego della sorgente (E,I,t,f), fissata la posizione di questa nel bunker (d), valutata la destinazione d'uso dei locali circostanti (T), nota l'orientazione preferenziale del fascio primario (U), si possono calcolare gli spessori ed i materiali da impiegare per la realizzazione delle barriere necessarie ad assicurare gli obiettivi di progetto.

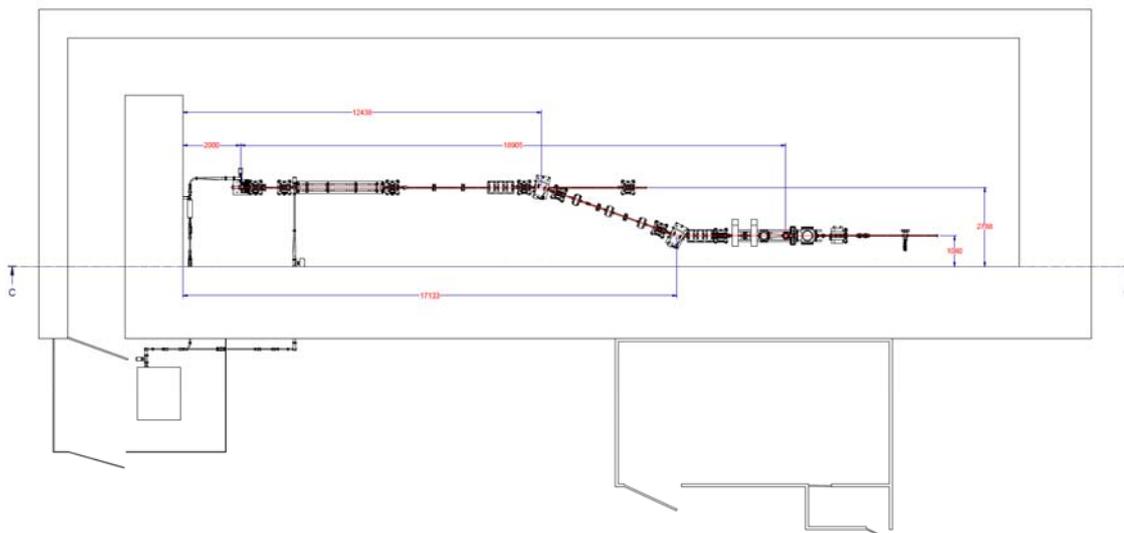


Figura 3 STAR – Planimetria del bunker di calcestruzzo completo dell'acceleratore

5.1 Obiettivi di progetto

Gli obiettivi di progetto prevedono, nelle normali condizioni di lavoro, che le dosi nelle aree esterne del bunker, cioè nell'hangar, dove si può trovare il personale operatore, siano mantenute entro 0,3 – 0,5 mSv/anno. Eventuali eccedenze oltre questi limiti comporteranno la classificazione delle aree come “zone sorvegliate/controllate” con conseguente limitazione dei tempi di permanenza. Per quanto sopra, nelle normali condizioni di lavoro, il rateo di equivalente di dosi nelle aree dell'hangar abitualmente frequentate dai lavoratori, non dovrà superare 0,25 μ Sv/h e, solo in particolari ed eccezionali situazioni, per un breve periodo di tempo, potrebbe raggiungere qualche μ Sv/h. Resta inteso che eventuali valori superiori verranno controllati e automaticamente bloccati dal sistema di controllo radiometrico. Il contributo di dosi ai membri della pubblico dovuto al funzionamento di STAR non dovrà eccedere 50-100 μ Sv/anno.

Il progetto STAR prevede tre fasi operative.

La prima fase prevede il funzionamento degli impianti fino ad una energia massima degli elettroni pari a 60 MeV. La successiva fase a 85 MeV, fino al raggiungimento dell'energia massima (fase 3) di 350 MeV.

In considerazione dello sviluppo finale della sorgente STAR, nei calcoli per il dimensionamento delle schermature, verranno considerate le condizioni operative più conservative, atte a garantire gli obiettivi di progetto nelle tre diverse fasi.

I calcoli verranno effettuati per la fase 2 e per la fase 3, essendo la fase 1 non molto diversa dalla fase 2 e comunque più conservativa della fase 1.

5.2 Termini sorgente

Ai fini della valutazione delle schermature, in riferimento alle energie del fascio di elettroni, nelle condizioni più conservative, verranno considerati i contributi dei ratei di dose dovuti a bremsstrahlung, a fotoproduzione di neutroni (risonanza gigante) ed ai neutroni di alta energia, calcolati mediante l'uso di formule empiriche e codici di calcolo. Allo scopo però di ottimizzare le dimensioni degli schermi si è tenuto conto dei risultati ottenuti con codice Montecarlo FLUKA, in quanto ritenuto più realistico, se pur sempre conservativo, delle formule empiriche. I risultati delle formule empiriche sono state usate solo per verifiche di consistenza dei calcoli effettuati con codice montecarlo con quelli effettuati con formule analitiche .

Metodi empirici mediante l'utilizzo di formule analitiche[2,3].

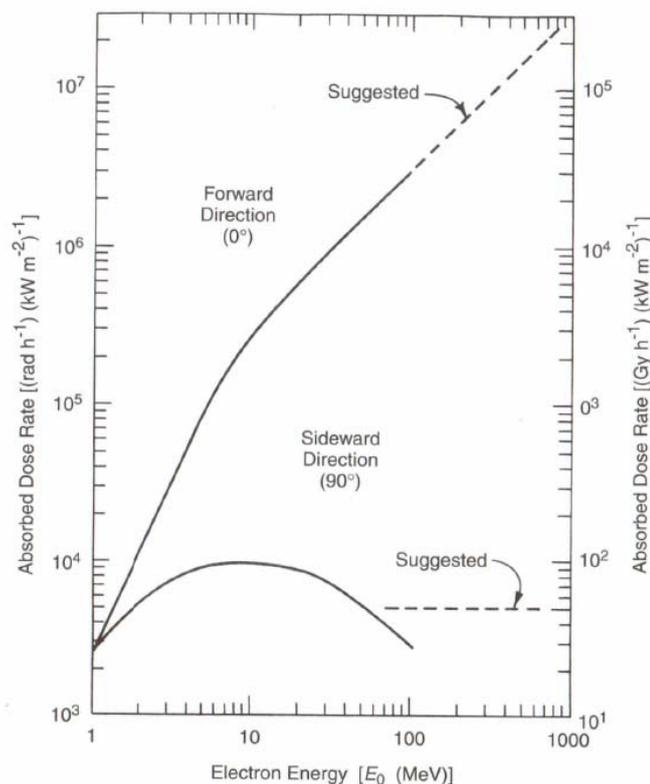
a)Bremsstrahlung

Si considera il caso di bersagli spessi ad alto Z per i quali si ottengono i valori dei ratei di dose più conservativi. Per questi vengono assunte rispettivamente le seguenti espressioni a 0° e 90° (Rule of Thumb) :

$$D_{0^\circ} \text{ (Gy h}^{-1}\text{) (kW m}^{-2}\text{)}^{-1} = 300 E_0 \quad \text{per } E > 20 \text{ MeV}$$

$$D_{90^\circ} \text{ (Gy h}^{-1}\text{) (kW m}^{-2}\text{)}^{-1} = 100 \quad \text{per } E > 100 \text{ MeV (valore suggerito 50)}$$

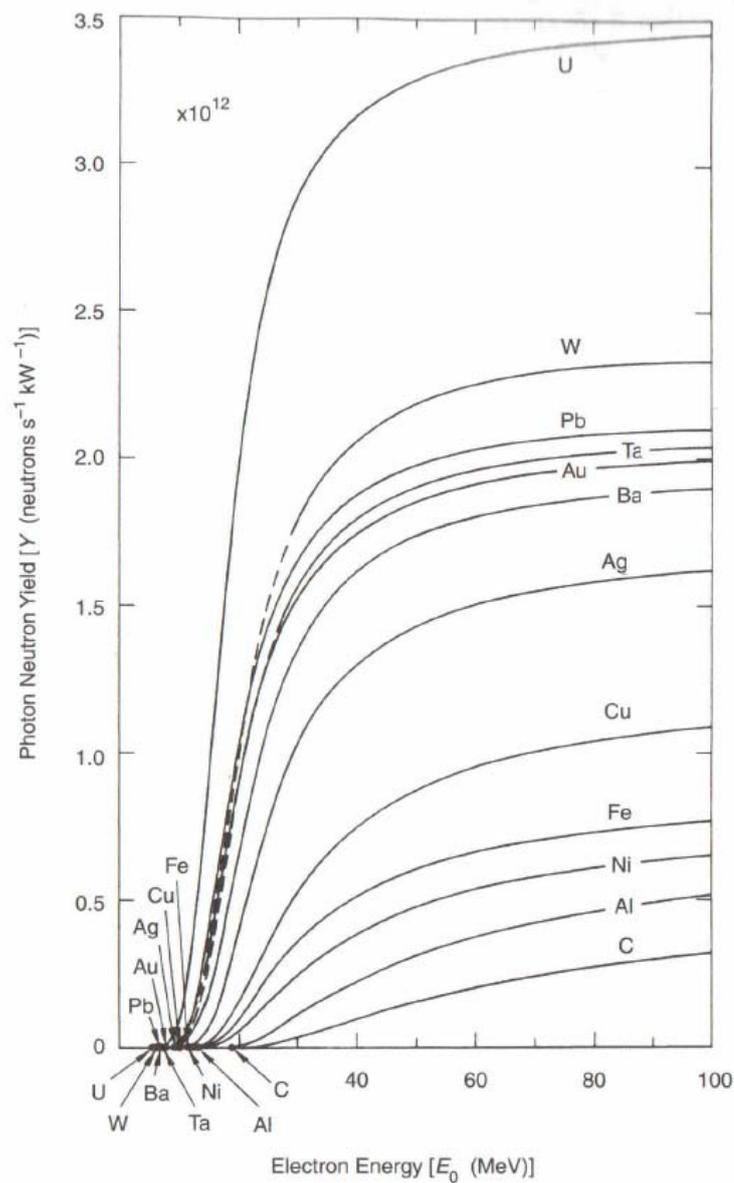
dove E_0 rappresenta l'energia del fascio di elettroni incidente espresso in MeV. Per angoli intermedi (10° e 90°) si può assumere una dipendenza dall'angolo $\theta^{3/2}$.



b) Risonanza gigante

La produzione di neutroni della risonanza gigante nel caso di bersagli spessi ad alto Z, può essere espressa, trascurando l'auto-assorbimento, da:

$$Y = 2 \times 10^{12} \text{ n s}^{-1} \text{ kW}^{-1}$$



La distribuzione angolare di questi neutroni è isotropa e l'energia media è di qualche MeV.

c) Neutroni di alta energia

fra 0° e 30° 2.5x10⁻⁴ n/sr e⁻

fra 30° e 60° 2.1x10⁻⁴ n/sr e⁻

fra 60° e 120° 1.2x10⁻⁴ n/sr e⁻

Coefficienti di attenuazione utilizzati

I coefficienti di attenuazione sono stati scelti in maniera tale che l'approssimazione fosse del tutto conservativa [4,5]

a) Bremsstrahlung

Materiale	Densità (g/cm ³)	Angolo (gradi)	λ (cm)
Calcestruzzo ordinario	2.3	0°	20.4
Calcestruzzo ordinario	2.3	90°	18.7
Calcestruzzo caricato	3.4	0°	13.8
Calcestruzzo caricato	3.4	90°	12.6
Polietilene	1.01		69.3
Piombo	11.35		2.2
Terra	1.6		43.8

b) Risonanza Gigante

Materiale	Densità (g/cm ³)	λ (cm)
Calcestruzzo ordinario	2.3	17.4
Calcestruzzo caricato	3.4	48.9
Polietilene	1.01	6.36
Terra	1.6	52.8
Piombo	11.35	1830

c) Neutroni di alta energia

Materiale	Densità (g/cm ³)	λ (cm)
Calcestruzzo ordinario	2.3	48.9
Calcestruzzo caricato	3.4	33
Polietilene	1.01	61.4
Terra	1.6	56.3
Piombo	11.35	16.8

Coefficienti conversione fluenza-equivalente di dose (neutroni)

Per i neutroni della risonanza gigante si farà uso di un coefficiente di conversione medio [6,7], calcolato in corrispondenza dell'energia di 2 MeV pari a

$$f_{NRG} = 2.87 \mu\text{Sv/h}/\text{ncm}^2\text{s}^{-1}$$

Per i neutroni alta energia si assume un valore pari a

$$f_{NHE} = 1.8 \mu\text{Sv/h}/\text{ncm}^2\text{s}^{-1}$$

Calcolo delle Schermature

La formula generale che verrà utilizzata per l'attenuazione delle varie componenti è di seguito riportata:

$$\sum \dot{H}_i = \sum_i \frac{S_i}{r^2} e^{-d/\lambda_i}$$

dove:

d e' lo spessore interposto

λ_i e' il coefficiente di attenuazione

S_i e' il termine sorgente

r e' la distanza di interesse

Nel caso si utilizzasse uno schermo eterogeneo (calcestruzzo + calcestruzzo caricato + piombo) la formula diventa:

$$\dot{H} = \sum_i \frac{S_i}{r} e^{-d_0/\lambda_0} e^{-d_1/\lambda_1} e^{-d_2/\lambda_2}$$

Per il dimensionamento degli schermi si è tenuto conto che il percorso degli elettroni verrà sempre terminato in un pozzo di spegnimento in modo tale che il fascio primario non possa colpire mai direttamente le schermature. Il pozzo di spegnimento verrà interrato rispetto al piano dell'acceleratore. Il percorso in aria degli elettroni prima di essere assorbiti dal pozzo di spegnimento sarà il più breve possibile, allo scopo di ridurre la formazione di gas radioattivi e di gas tossici.

Allo scopo di dimensionare gli schermi sono state considerate 6000 ore di funzionamento annuo dell'acceleratore e 2000 ore annue di lavoro degli addetti. Sulla base di quanto finora indicato vengono riportati di seguito i calcoli delle schermature nelle condizioni di funzionamento della fase 2 e della fase 3.

Fase 2-Perdita del fascio

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando la perdita dell'intero fascio di 60 nA a 85 MeV nel punto di interazione (fascio elettroni-fascio laser) (fig.4) posto alla distanza di 8.5 m dal punto più vicino dell'area dell'hangar a 0° con la direzione del fascio, a 3.58 m dal punto più vicino dell'hangar a 90° con la direzione del fascio, a 2.5 metri di distanza dal punto più vicino del tetto a 90° con la direzione del fascio. Non sono stati considerati i punti dal lato del terrapieno in quanto non c'è fattore di occupazione e la struttura di cemento armato (100 cm della parete del bunker + 50 cm del muro di contenimento) unita al terrapieno contiguo non inferiore a 20 m sono più che sufficienti a garantire gli obiettivi di progetto. Vengono infine considerate solo le due componenti di bremsstrahlung e di neutroni della risonanza gigante.

Neutroni con energia al di sopra di 25 MeV non sono prodotti in maniera apprezzabile.

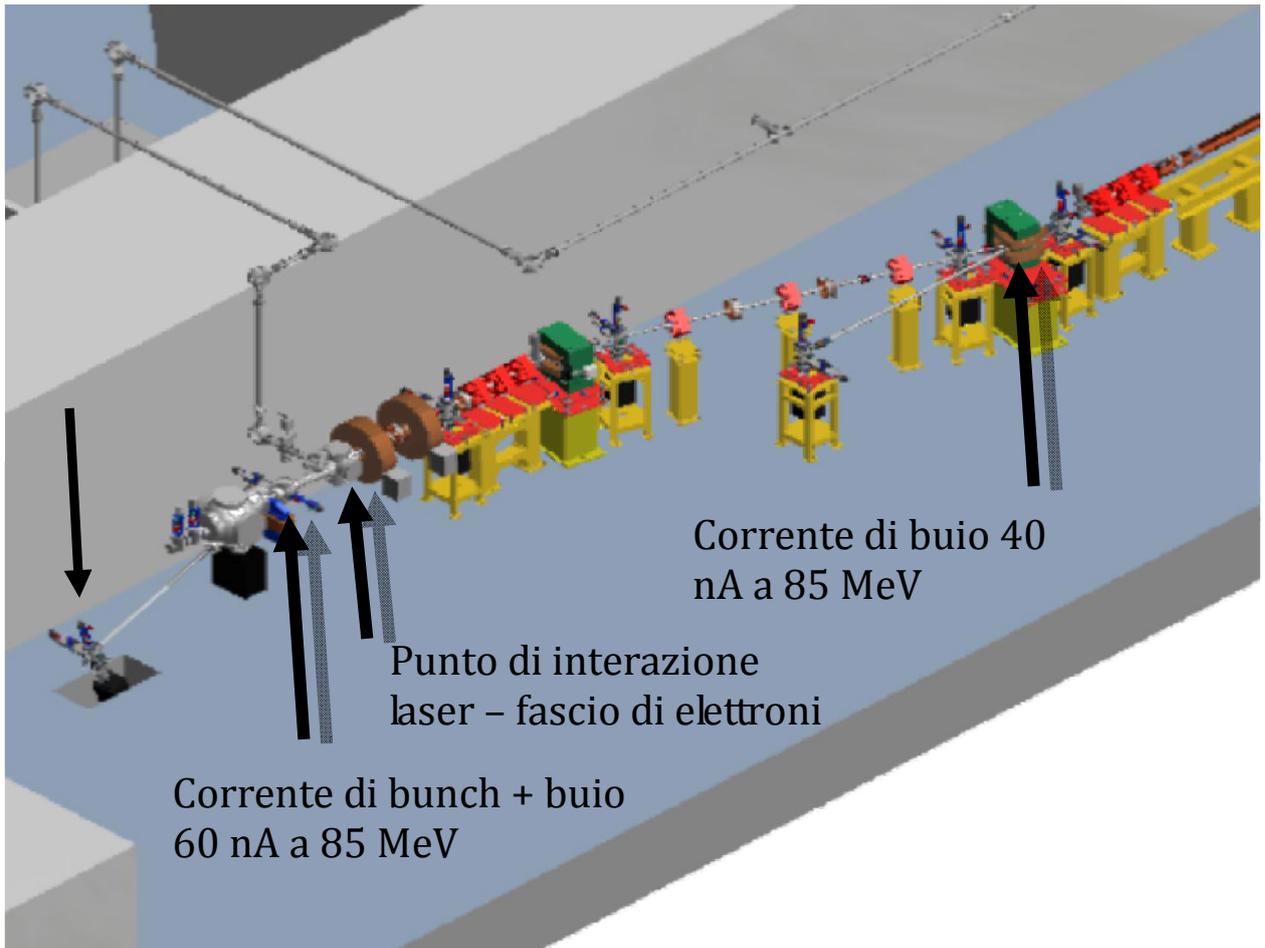


Fig.4 Star-punti sorgente

Il fascio di elettroni dopo l'interazione con il laser verra' assorbito nel beam dump di cui alla fig.5. installato nel pavimento del bunker cosi' come indicato in figura 4.

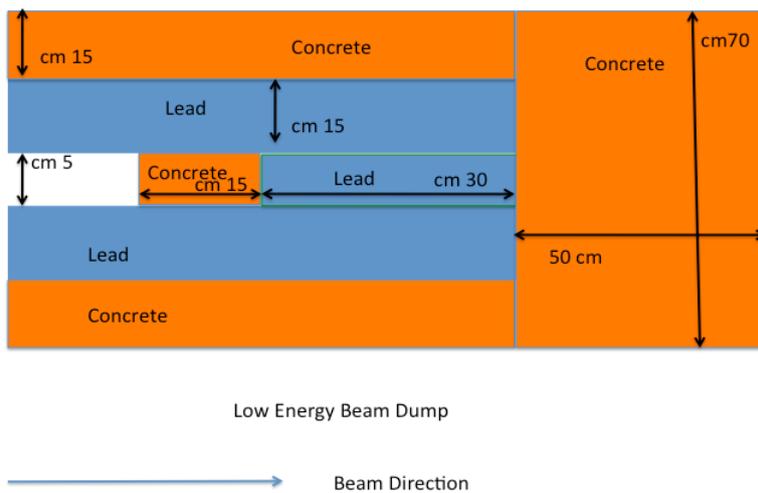


Fig.5 Star-beam dump della linea a bassa energia.

Utilizzando la formula generale per il calcolo dell'attenuazione totale si ottengono in tabella 1 i valori del rateo di equivalente di dose ambientale a 0° dopo l'interazione con il beam dump orizzontale. Mentre in tabella 2 sono riportati i valori del rateo di equivalente di dose ambientale dopo l'interazione con il beam dump orizzontale a 90° a 3.58 m nell'hangar e in tabella 3 a 2.5 m sul tetto

Tabella 1 Rateo di H*(10) a 0° in funzione dello spessore di calcestruzzo interposto. Il punto di misura è nell'hangar a circa 8.5 m di distanza dal punto sorgente nella direzione a 0°.

Calcestruzzo ordinario	Bremsstrahlung 8.5 m 0°	Neutroni RG 8.5 m	Totale attenuazione 0°
	65 cm ordinario+30 cm Pb	65 cm ordinario+30 cm Pb	
cm	μSv/h	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	2.88E-02	6.22E-05	2.89E-02
5.00E+01	2.48E-03	3.51E-06	2.49E-03
6.00E+01	1.52E-03	1.98E-06	1.52E-03
7.00E+01	9.32E-04	1.11E-06	9.33E-04
8.00E+01	5.71E-04	6.26E-07	5.72E-04
9.00E+01	3.50E-04	3.52E-07	3.50E-04
1.00E+02	2.14E-04	1.98E-07	2.14E-04
1.10E+02	1.31E-04	1.12E-07	1.31E-04
1.20E+02	8.04E-05	6.29E-08	8.04E-05
1.30E+02	4.92E-05	3.54E-08	4.93E-05
1.40E+02	3.01E-05	1.99E-08	3.02E-05
1.50E+02	1.85E-05	1.12E-08	1.85E-05
2.00E+02	1.59E-06	6.33E-10	1.59E-06
2.50E+02	1.37E-07	3.58E-11	1.37E-07
3.00E+02	1.18E-08	2.02E-12	1.18E-08
3.50E+02	1.02E-09	1.14E-13	1.02E-09

Tabella 2 Rateo di H*(10) a 90° in funzione dello spessore di calcestruzzo interposto. Il punto di misura è nell'hangar a circa 3.58 m di distanza dal punto sorgente nella direzione a 90°.

Calcestruzzo ordinario	Bremsstrahlung 90°	Neutroni RG 90°	Attenuazione Totale 90°
	15 cm ordinario +15 cm Pb	15 cm ordinario +15 cm Pb	15 cm ordinario +15 cm Pb
cm	μSv/h	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	2.62E-01	1.15E+02	1.15E+02
5.00E+01	2.26E-02	6.51E+00	6.53E+00
6.00E+01	4.92E-03	3.66E+00	3.67E+00
7.00E+01	3.01E-03	2.06E+00	2.06E+00
8.00E+01	1.85E-03	1.16E+00	1.16E+00
9.00E+01	1.13E-03	6.53E-01	6.54E-01
1.00E+02	6.93E-04	3.68E-01	3.68E-01
1.10E+02	4.24E-04	2.07E-01	2.07E-01
1.20E+02	2.60E-04	1.16E-01	1.17E-01
1.30E+02	1.59E-04	6.55E-02	6.57E-02
1.40E+02	9.75E-05	3.69E-02	3.70E-02
1.50E+02	5.97E-05	2.08E-02	2.08E-02
2.00E+02	5.15E-06	1.17E-03	1.18E-03
2.50E+02	4.44E-07	6.63E-05	6.67E-05
3.00E+02	3.83E-08	3.74E-06	3.78E-06
3.50E+02	3.30E-09	2.12E-07	2.15E-07

Tabella 3 Rateo di $H^*(10)$ a 90° in funzione dello spessore di calcestruzzo interposto Il punto di misura è nell'hangar a circa 2.5 m di distanza dal punto sorgente nella direzione a 90° sul tetto del bunker di calcestruzzo.

Spessore calcestruzzo	Bremsstrahlung 90°	Neutroni RG 90°	Attenuazione totale 90°
Ordinario	15 cm ordinario+15 cm Pb	15 cm ordinario+15 cm Pb	15 cm ordinario+15 cm Pb
cm	$\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$
0	5.37E-01	2.36E+02	2.37E+02
50	4.63E-02	1.33E+01	1.34E+01
60	2.83E-02	7.51E+00	7.54E+00
70	1.74E-02	4.23E+00	4.24E+00
80	1.06E-02	2.38E+00	2.39E+00
90	6.51E-03	1.34E+00	1.35E+00
100	3.99E-03	7.54E-01	7.58E-01
110	2.44E-03	4.24E-01	4.27E-01
120	1.50E-03	2.39E-01	2.40E-01
130	9.17E-04	1.34E-01	1.35E-01
140	5.61E-04	7.57E-02	7.62E-02
150	3.44E-04	4.26E-02	4.29E-02
200	2.96E-05	2.41E-03	2.44E-03
250	2.56E-06	1.36E-04	1.38E-04
300	2.20E-07	7.68E-06	7.90E-06
350	1.90E-08	4.34E-07	4.53E-07

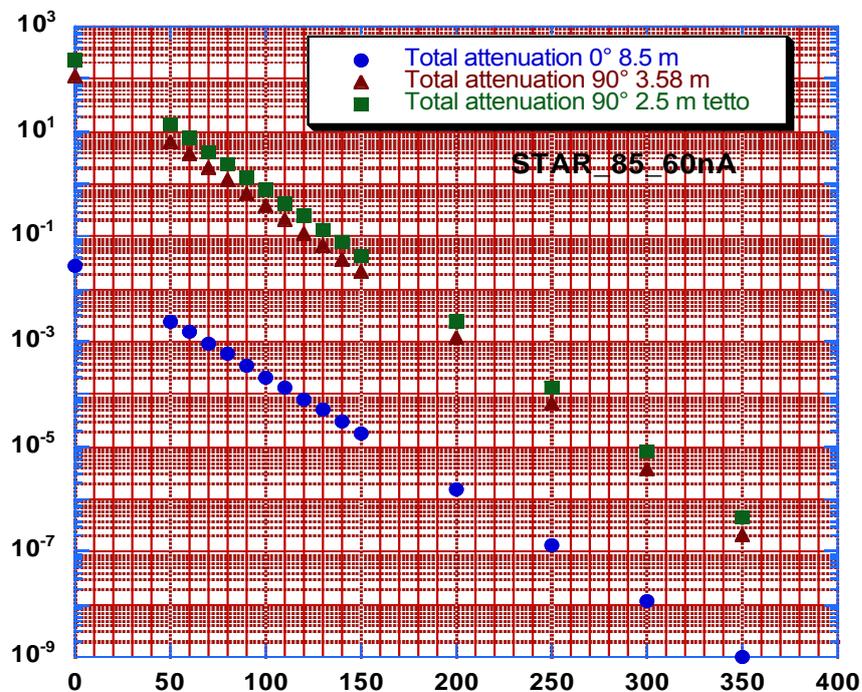


Fig.6 Star-andamento dell'attenuazione totale del fascio dopo l'interazione con il beam dump a varie distanze dal punto sorgente

Risulta evidente che i risultati ottenuti siano incompatibili con gli obiettivi di progetto, ne consegue la necessità di utilizzare un beam dump nel pavimento della sala, come indicato nelle fig. 7 e 8 .

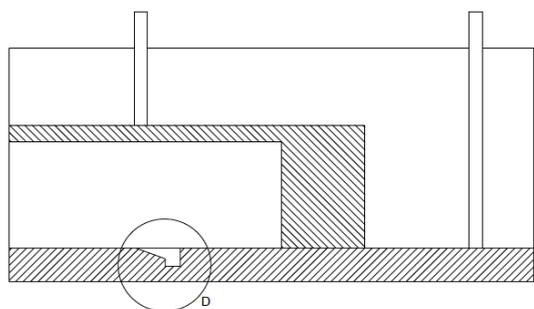


Fig 7

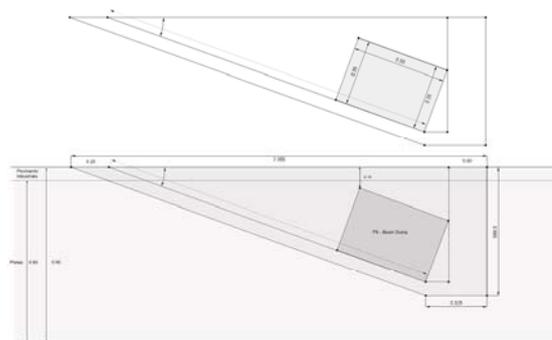


Fig 8

Nella tabella 4 viene riportato l'andamento dell'attenuazione a 90°. L'effetto schermante è determinato dallo spessore della platea di fondazione del bunker.

Tabella 4.

Spessore calcestruzzo	Equivalente di dose bremsstrahlung 3.58m 90°	Equivalente di dose neutroni 3.58 m 90°
	15 cm calcestruzzo ordinario+ 15 cm Pb	15 cm calcestruzzo ordinario+ 15 cm Pb
cm	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	5.46E-01	6.25E-03
5.00E+01	4.71E-02	3.53E-04
1.00E+02	4.06E-03	2.00E-05
2.00E+02	3.02E-05	6.37E-08
3.00E+02	2.24E-07	2.03E-10
4.00E+02	1.67E-09	7.25E-12
5.00E+02	1.24E-11	2.07E-15

Nella tabella 5 viene riportato l'andamento dell'attenuazione a 90° a una distanza di circa 400 cm. La componente da attenuare è quella a 110 ° con la direzione del fascio che entra nel dump

Tabella 5.

Spessore calcestruzzo	Equivalente dose neutroni	Equivalente dose neutroni
	calcestruzzo ordinario	ordinario+20cm ordinario+15cmPb
cm	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	1.35E+03	4.25E+02
5.00E+01	7.64E+01	2.40E+01
1.50E+02	2.44E-01	7.67E-02
2.00E+02	1.38E-02	4.33E-03

Dai risultati si evince che gli obiettivi di progetto possono essere ottenuti solo con l'attenuazione prodotta da uno schermo complessivo, tetto e pavimento compreso, di 200 cm di calcestruzzo ordinario.

Fase 2-Perdita della corrente di buio.

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando la perdita di 40 nA di corrente di buio a 85 MeV sul magnete (fig.3) subito prima della dogleg a bassa energia. Il punto sorgente si trova a una distanza di 18 metri dal punto più vicino dell'area dell'hangar a 0° con la direzione del fascio, a 5.28 m dal punto più vicino dell'hangar a 90° con la direzione del fascio, a 2.5 metri di distanza dal punto più vicino del tetto a 90° con la direzione del fascio.

Vengono considerate solo le due componenti di bremsstrahlung e di neutroni della risonanza gigante.

Neutroni con energia al di sopra di 25 MeV non sono prodotti in maniera apprezzabile.

Si riportano i soli risultati del rateo di H*(10) a 90° in funzione dello spessore di calcestruzzo interposto. Il punto di misura è nell'hangar a circa 2.5 m di distanza dal punto sorgente nella direzione a 90° sul tetto del bunker di calcestruzzo.

Nell'ipotesi che la corrente di buio possa considerarsi come un fascio collimato assorbito da un dump orizzontale, i valori di H*(10), riportati in tabella 6, evidenziano un valore di 8.9 μSv/h, dopo lo spessore del tetto di 50 cm, incompatibile con gli obiettivi di progetto.

Tabella 6 Rateo di $H^*(10)$ a 90° in funzione dello spessore di calcestruzzo interposto
Il punto di misura è a circa 2.5 m di distanza dal punto sorgente nella direzione a 90° sul tetto del bunker di calcestruzzo.

Nel caso specifico della corrente di buio, della quale non è possibile prevedere la

Spessore calcestruzzo cm	Bremsstrahlung 2.5 m 90°	Neutroni RG 2.5 m 90°	Total attenuation 90°
	15 cm calcestruzzo ordinario+15 cm Pb $\mu\text{Sv/h}$	15cm calcestruzzo ordinario+ 15cm Pb $\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$
0.00E+00	3.58E-01	1.57E+02	1.58E+02
5.00E+01	3.09E-02	8.89E+00	8.92E+00
6.00E+01	1.89E-02	5.01E+00	5.02E+00
7.00E+01	1.16E-02	2.82E+00	2.83E+00
8.00E+01	7.09E-03	1.59E+00	1.59E+00
9.00E+01	4.34E-03	8.93E-01	8.97E-01
1.00E+02	2.66E-03	5.02E-01	5.05E-01
1.10E+02	1.63E-03	2.83E-01	2.84E-01
1.20E+02	9.98E-04	1.59E-01	1.60E-01
1.30E+02	6.11E-04	8.96E-02	9.02E-02
1.40E+02	3.74E-04	5.04E-02	5.08E-02
1.50E+02	2.29E-04	2.84E-02	2.86E-02
2.00E+02	1.98E-05	1.60E-03	1.62E-03
2.50E+02	1.70E-06	9.06E-05	9.23E-05
3.00E+02	1.47E-07	5.12E-06	5.27E-06
3.50E+02	1.27E-08	2.89E-07	3.02E-07

distribuzione angolare nello spazio, si dovrà provvedere ad installare intorno al punto sorgente una schermatura idonea ad attenuare il campo di radiazione. In particolare, si dovrà rinforzare adeguatamente la parte superiore della schermatura. Nella tabella 7 sono riportati i risultati ottenuti con il rafforzamento della schermatura verso l'alto con l'aggiunta di 50 cm di calcestruzzo più 40 cm di polietilene.

Tabella 7 Rateo di $H^*(10)$ a 90° . Stesse condizione che in tab 5 con l'aggiunta di 50 cm di calcestruzzo, 40 cm di polietilene e 15 cm di Pb

Spessore calcestruzzo cm	Equivalenti di dose bremsstrahlung 2.5 m 90°	Equivalenti di dose neutroni RG 2.5 m 90°
	50 cm calcestruzzo +15 cm Pb + 40 cm poly $\mu\text{Sv/h}$	50 cm ordinario+ 15cm Pb+ 40 cm poly $\mu\text{Sv/h}$
0.00E+00	3.61E-02	3.91E-02
5.00E+01	3.12E-03	2.21E-03
6.00E+01	1.91E-03	1.24E-03
7.00E+01	1.17E-03	7.00E-04
8.00E+01	7.16E-04	3.94E-04
9.00E+01	4.38E-04	2.22E-04
1.00E+02	2.69E-04	1.25E-04
1.10E+02	1.64E-04	7.02E-05
1.20E+02	1.01E-04	3.95E-05
1.30E+02	6.17E-05	2.22E-05
1.40E+02	3.78E-05	1.25E-05
1.50E+02	2.32E-05	7.05E-06
2.00E+02	2.00E-06	3.98E-07
2.50E+02	1.72E-07	2.25E-08
3.00E+02	1.48E-08	1.27E-09
3.50E+02	1.28E-09	7.18E-11
4.00E+02	1.10E-10	4.06E-12
5.00E+02	8.19E-13	1.30E-14

Risulta evidente che per 6000 ore di funzionamento annuo, sul tetto del bunker si avrebbero ratei di equivalente di dose ambiente non superiore a 30 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Fase 3 - Perdita del fascio

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando la perdita dell'intero fascio di 3100 nA a 350 MeV nel punto, ancora non del tutto definito di interazione posto alla distanza di circa 6m (ipotesi conservativa) dal punto piu' vicino dell'area dell'hangar, nella direzione a 0° con la direzione del fascio, a 7 m dal punto piu' vicino dell'hangar a 90° con la direzione del fascio, a 2.5 metri di distanza dal punto piu' vicino del tetto a 90° con la direzione del fascio. Non sono stati considerati i punti dal lato del terrapieno in quanto non c'è fattore di occupazione e la struttura di cemento armato (100 cm della parete del bunker + 50 cm del muro di contenimento) unita al terrapieno contiguo non inferiore a 20 m sono più che sufficienti a garantire gli obiettivi di progetto.

In tabella 8 vengono riportati i dati relativi alle dosi nell'hangar in presenza del dump di assorbimento orizzontale identico a quello di figura 4 nella direzione a 0°

Tabella 8.

Spessore calcestruzzo	Bremsstrahlung 6 m 0° 65 cm ordinario+30 cm Pb	Neutroni RG 6 m 0° 65 cm ordinario+30 cm Pb	Neutroni HE 6 m 0° 65 cm ordinario+30 cm Pb	Totale attenuazione
cm	$\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\mu\text{Sv}/\text{h}$
0.00E+00	1.40E+01	2.51E+03	9.15E+01	2.62E+03
5.00E+01	1.20E+00	1.42E+02	3.29E+01	1.76E+02
6.00E+01	7.37E-01	7.98E+01	2.68E+01	1.07E+02
7.00E+01	4.51E-01	4.49E+01	2.19E+01	6.73E+01
8.00E+01	2.77E-01	2.53E+01	1.78E+01	4.34E+01
9.00E+01	1.69E-01	1.42E+01	1.45E+01	2.89E+01
1.00E+02	1.04E-01	8.01E+00	1.18E+01	2.00E+01
1.10E+02	6.35E-02	4.51E+00	9.65E+00	1.42E+01
1.20E+02	3.89E-02	2.54E+00	7.87E+00	1.04E+01
1.30E+02	2.38E-02	1.43E+00	6.41E+00	7.87E+00
1.40E+02	1.46E-02	8.04E-01	5.23E+00	6.05E+00
1.50E+02	8.94E-03	4.53E-01	4.26E+00	4.72E+00
2.00E+02	7.71E-04	2.56E-02	1.53E+00	1.56E+00
2.50E+02	6.65E-05	1.44E-03	5.51E-01	5.53E-01
3.00E+02	5.73E-06	8.16E-05	1.98E-01	1.98E-01
3.50E+02	4.94E-07	4.61E-06	7.13E-02	7.13E-02
4.00E+02	4.26E-08	2.61E-07	2.56E-02	2.56E-02
5.00E+02	3.16E-10	8.32E-10	3.32E-03	3.32E-03

In tabella 9 vengono riportati i dati relativi alle dosi nell'hangar in presenza del dump di assorbimento orizzontale identico a quello di figura 4 nella direzione a 90°

Tabella 9.

Spessore calcestruzzo cm	Bremsstrahlung 7 m 90°	Neutroni RG 7 m 90°	Neutroni HE 7 m 90°	Totale
	15 cm ordinario+15 cm Pb μSv/h	15 cm ordinario+15 cm Pb μSv/h	15 cm ordinario+15 cm Pb μSv/h	attenuazione μSv/h
0.00E+00	3.30E+01	2.52E+04	1.66E+02	2.54E+04
5.00E+01	2.84E+00	1.42E+03	5.97E+01	1.48E+03
6.00E+01	1.74E+00	8.00E+02	4.87E+01	8.51E+02
7.00E+01	1.07E+00	4.50E+02	3.97E+01	4.91E+02
8.00E+01	6.53E-01	2.53E+02	3.23E+01	2.86E+02
9.00E+01	4.00E-01	1.43E+02	2.64E+01	1.69E+02
1.00E+02	2.45E-01	8.03E+01	2.15E+01	1.02E+02
1.10E+02	1.50E-01	4.52E+01	1.75E+01	6.29E+01
1.20E+02	9.19E-02	2.54E+01	1.43E+01	3.98E+01
1.30E+02	5.63E-02	1.43E+01	1.16E+01	2.60E+01
1.40E+02	3.45E-02	8.06E+00	9.48E+00	1.76E+01
1.50E+02	2.11E-02	4.54E+00	7.73E+00	1.23E+01
2.00E+02	1.82E-03	2.56E-01	2.78E+00	3.04E+00
2.50E+02	1.57E-04	1.45E-02	1.00E+00	1.01E+00
3.00E+02	1.35E-05	8.18E-04	3.60E-01	3.60E-01
3.50E+02	1.17E-06	4.62E-05	1.29E-01	1.29E-01
4.00E+02	1.01E-07	2.61E-06	4.65E-02	4.65E-02
5.00E+02	7.47E-10	8.34E-09	6.02E-03	6.02E-03

I valori di cui alla tabella 9 mostrano risultati incompatibili con gli obiettivi di progetto, ne consegue la necessità di utilizzare un beam dump nel pavimento della sala, ad un angolo non inferiore a 20° con la direzione del fascio meglio 60 gradi.

Le dosi previste, in tal caso, a 0° e 90° nella direzione dell'hangar non vengono riportate essendo del tutto trascurabili e compatibili con gli obiettivi di progetto.

Vengono invece riportati in tabella 10 i valori a 90° sul tetto del bunker per un punto sorgente posto nel pavimento a una distanza di 400 cm. Si riportano i risultati relativi alla sola componente neutronica, componente che da sola determina le dimensioni dello schermo. Il Dump è considerato essere sotto il livello del pavimento a una profondità identica a quella del dump per il fascio da 85 MeV.

Tab 10 Equivalente di dose da neutroni veloci e di alta energia sul tetto del Bunker in corrispondenza del Dump del fascio da 350 MeV

Spessore calcestruzzo	Equivalente di dose neutroni ordinario+20cm ordinario+15cm Pb	Equivalente di dose neutroni ordinario+20cm ordinario+15cm Pb
cm	$\mu\text{Sv/h}$	$\mu\text{Sv/h}$
0.00E+00	9.64E+02	7.57E+00
5.00E+01	5.45E+01	2.72E+00
1.50E+02	1.74E-01	3.52E-01
2.00E+02	9.83E-03	1.27E-01

Uno schermo costituito dal tetto pari a 50 cm calcestruzzo ordinario più il dump interrato di 25 cm di Pb e 20 cm di calcestruzzo nella direzione verso l'alto e uno schermo locale aggiuntivo di 150 cm sempre di calcestruzzo ordinario garantiscono un valore annuo dell'ordine dei 400 μSv , valore del tutto compatibile con gli obiettivi di progetto.

Fase 3 -Perdita della corrente di buio.

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando la perdita di 40 nA di corrente di buio a 350 MeV sul magnete subito prima della dogleg ad alta energia. Il punto sorgente si trova a una distanza di 12.5 metri dal punto più vicino dell'area dell'hangar a 0° con la direzione del fascio, a 5.28 m dal punto più vicino dell'hangar a 90° con la direzione del fascio, a 2.5 metri di distanza dal punto più vicino del tetto a 90° con la direzione del fascio.

Nell'ipotesi che la corrente di buio possa considerarsi come un fascio collimato assorbito da un dump orizzontale, i valori di $H^*(10)$, riportati in tabella 10 e in tabella 11 evidenziano valori del tutto compatibili con gli obiettivi di progetto; mentre quelli riportati in tab.12, evidenziano un valore di 154 $\mu\text{Sv/h}$, dopo lo spessore del tetto di 50 cm, del tutto incompatibile con gli obiettivi di progetto.

Tab.11 Equivalente di dose ambientale nell'hangar subito dopo la parete schermante in presenza di dump orizzontale.

Spessore calcestruzzo	Bremsstrahlung 12.5 m 0°	Neutroni RG 12.5 m 0°	Neutroni HE 12.5 m 0°	Totale
cm	65 cm ordinario+30 cm Pb μSv/h	65 cm ordinario+30 cm Pb μSv/h	65 cm ordinario+30 cm Pb μSv/h	attenuazione μSv/h
0.00E+00	4.29E-02	7.71E+00	2.11E-01	7.97E+00
5.00E+01	3.70E-03	4.36E-01	7.59E-02	5.15E-01
6.00E+01	2.26E-03	2.45E-01	6.18E-02	3.09E-01
7.00E+01	1.39E-03	1.38E-01	5.04E-02	1.90E-01
8.00E+01	8.49E-04	7.77E-02	4.11E-02	1.20E-01
9.00E+01	5.20E-04	4.37E-02	3.35E-02	7.77E-02
1.00E+02	3.19E-04	2.46E-02	2.73E-02	5.22E-02
1.10E+02	1.95E-04	1.39E-02	2.22E-02	3.63E-02
1.20E+02	1.20E-04	7.80E-03	1.81E-02	2.60E-02
1.30E+02	7.32E-05	4.39E-03	1.48E-02	1.92E-02
1.40E+02	4.49E-05	2.47E-03	1.20E-02	1.46E-02
1.50E+02	2.75E-05	1.39E-03	9.81E-03	1.12E-02
2.00E+02	2.37E-06	7.86E-05	3.53E-03	3.61E-03
2.50E+02	2.04E-07	4.44E-06	1.27E-03	1.27E-03
3.00E+02	1.76E-08	2.51E-07	4.57E-04	4.57E-04
3.50E+02	1.52E-09	1.42E-08	1.64E-04	1.64E-04
4.00E+02	1.31E-10	8.00E-10	5.91E-05	5.91E-05
5.00E+02	9.72E-13	2.56E-12	7.65E-06	7.65E-06

Tab.12 Equivalente di dose ambientale nell'hangar subito dopo la parete schermante in presenza di dump orizzontale.

Spessore calcestruzzo	Bremsstrahlung 5.28 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Neutroni RG 5.28 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Neutroni HE 5.28 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Totale attenuazione
cm	μSv/h	μSv/h	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	7.75E-01	5.90E+02	2.92E+00	5.93E+02
5.00E+01	6.68E-02	3.33E+01	1.05E+00	3.44E+01
6.00E+01	4.09E-02	1.88E+01	8.56E-01	1.96E+01
7.00E+01	2.51E-02	1.06E+01	6.97E-01	1.13E+01
8.00E+01	1.54E-02	5.94E+00	5.68E-01	6.52E+00
9.00E+01	9.40E-03	3.34E+00	4.63E-01	3.82E+00
1.00E+02	5.76E-03	1.88E+00	3.78E-01	2.27E+00
1.10E+02	3.53E-03	1.06E+00	3.08E-01	1.37E+00
1.20E+02	2.16E-03	5.96E-01	2.51E-01	8.49E-01
1.30E+02	1.32E-03	3.36E-01	2.04E-01	5.41E-01
1.40E+02	8.11E-04	1.89E-01	1.67E-01	3.56E-01
1.50E+02	4.96E-04	1.06E-01	1.36E-01	2.43E-01
2.00E+02	4.28E-05	6.01E-03	4.88E-02	5.49E-02
2.50E+02	3.69E-06	3.39E-04	1.76E-02	1.79E-02
3.00E+02	3.18E-07	1.92E-05	6.32E-03	6.34E-03
3.50E+02	2.74E-08	1.08E-06	2.27E-03	2.27E-03
4.00E+02	2.36E-09	6.12E-08	8.18E-04	8.18E-04
5.00E+02	1.76E-11	1.95E-10	1.06E-04	1.06E-04

Tab.13

Spessore calcestruzzo	Bremsstrahlung 2.5 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Neutroni RG 2.5 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Neutroni HE 2.5 m 90° 15 cm ordinario+15 cm Pb	Totale attenuazione
cm	μSv/h	μSv/h	μSv/h	μSv/h
0.00E+00	3.46E+00	2.63E+03	1.30E+01	2.65E+03
5.00E+01	2.98E-01	1.49E+02	4.68E+00	1.54E+02
6.00E+01	1.83E-01	8.36E+01	3.82E+00	8.76E+01
7.00E+01	1.12E-01	4.71E+01	3.11E+00	5.03E+01
8.00E+01	6.85E-02	2.65E+01	2.54E+00	2.91E+01
9.00E+01	4.19E-02	1.49E+01	2.07E+00	1.70E+01
1.00E+02	2.57E-02	8.39E+00	1.68E+00	1.01E+01
1.10E+02	1.57E-02	4.73E+00	1.37E+00	6.11E+00
1.20E+02	9.64E-03	2.66E+00	1.12E+00	3.79E+00
1.30E+02	5.90E-03	1.50E+00	9.12E-01	2.41E+00
1.40E+02	3.62E-03	8.43E-01	7.43E-01	1.59E+00
1.50E+02	2.21E-03	4.74E-01	6.06E-01	1.08E+00
2.00E+02	1.91E-04	2.68E-02	2.18E-01	2.45E-01
2.50E+02	1.65E-05	1.51E-03	7.84E-02	7.99E-02
3.00E+02	1.42E-06	8.55E-05	2.82E-02	2.83E-02
3.50E+02	1.22E-07	4.83E-06	1.01E-02	1.01E-02
4.00E+02	1.05E-08	2.73E-07	3.65E-03	3.65E-03
5.00E+02	7.84E-11	8.71E-10	4.72E-04	4.72E-04

Tenuto poi conto che non è possibile prevedere la distribuzione angolare e nello spazio della corrente di buio, nell'ipotesi comunque che si perda tutta nel primo magnete della dogleg, si dovrà provvedere ad installare intorno al punto sorgente una schermatura idonea ad attenuare il campo di radiazione. In particolare, si dovrà rinforzare adeguatamente la parte superiore della schermatura. aumentando gli spessori di calcestruzzo e piombo nonché aggiungendo polietilene ad alta densità, allo scopo di ridurre principalmente la componente neutronica ivi compresa anche quella ad alta energia. Ed è quest'ultima componente che determina le dimensioni della schermatura. Sul tetto dell'hangar con una schermatura che abbia dimensioni verso l'alto pari 215 cm, seguiti da 20 cm di piombo + 50 cm di polietilene e i 50 cm di calcestruzzo del tetto, si ottiene un valore del rateo di equivalente di dose ambientale pari a $2.5 \cdot 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ che per 6000 ore di funzionamento fanno 150 $\mu\text{Sv/anno}$.

Spessore calcestruzzo	Equivalente di dose da neutroni HE 2.50 m 90°
cm	$\mu\text{Sv/h}$
0.00E+00	7.17E-02
5.00E+01	2.58E-02

Sulla base dei calcoli effettuati all'energia di 350 MeV, le dimensioni laterali del bunker, pari a 250 cm lato hangar e di 150 cm lato terrapieno, uniti al tetto di calcestruzzo di 50 cm, nonché ai pozzi di spegnimento, idoneamente schermati e interrati, per i fasci nelle varie fasi, e alle schermature locali per la corrente di buio, sono tali da garantire gli obiettivi di progetto.

Sarebbe comunque auspicabile prevedere, al fine di ottimizzare il progetto di radioprotezione dell'impianto e ridurre gli ingombri delle schermature locali, l'installazione di un tetto pari a 1 metro di calcestruzzo, a partire dalla posizione della seconda sezione acceleratrice, prima dell'avvio dell'operazione dell'impianto nella fase 3.

5.3 Labirinti di accesso

L'accesso principale al bunker è costituito da un labirinto avente una geometria tale da garantire gli obiettivi di progetto all'esterno del bunker. Non verrà effettuata alcuna valutazione della dose trasmessa per diffusione attraverso il labirinto, considerata la geometria del labirinto rispetto alla posizione dell'acceleratore. L'energia degli elettroni raggiunta nella parte di acceleratore prospiciente il primo ramo del labirinto è infatti non superiore a 10 MeV e pertanto non vengono prodotti neutroni, i principali responsabili della dose diffusa nei labirinti.

L'uscita di emergenza dal bunker, situata sulla parete verso il terrapieno (area con fattore di occupazione pari a zero) sarà protetta da un labirinto avente una geometria tale da garantire gli obiettivi di progetto all'esterno del bunker.

Nel caso fosse necessario procedere ad una valutazione delle dosi trasmesse lungo un labirinto esse andranno fatte ipotizzando la perdita accidentale dell'intera potenza del fascio nel punto della macchina più prossimo ad esso.

Per quanto riguarda lo studio della trasmissione dei neutroni si farà uso di curve universali ottenute sulla base di dati sperimentali. Per i calcoli verrebbe utilizzata la seguente formula (8):

$$\dot{H}_{uscita} = \frac{\dot{H}_0}{a^2} f_1(d_1) f_2(d_2) f_3(d_3)$$

dove a è la distanza fra la sorgente e l'ingresso del labirinto e $f_1(d_1)$, $f_2(d_2)$, $f_3(d_3)$ sono i fattori di attenuazione relativi a ciascuno dei segmenti.

Per la trasmissione dei fotoni verrà considerata una dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza per il primo tratto e dall'inverso della distanza alla 2.7 per il secondo e terzo tratto (9).

5.4 Penetrazioni tecniche

Le aperture necessarie per il passaggio di cavi e tubi dall'esterno all'interno del bunker e viceversa, saranno realizzate in modo da garantire tra la "zona controllata" (bunker) e gli ambienti circostanti, le stesse condizioni di sicurezza stabilite per il progetto delle pareti del bunker stesso.

Tali condizioni si realizzeranno mediante condotti a forma di labirinto. In questo modo, con un opportuno dimensionamento del labirinto, i campi di radiazione (fotonica e neutronica) che possono raggiungere, tramite diffusioni successive, l'esterno del bunker, potranno comunque garantire i valori di progetto. Lì dove non è possibile realizzare canali a forma di labirinto si troveranno soluzioni alternative altrettanto conservative, come per esempio canali in diagonale, con l'accortezza di sistemarli non in linea con i fasci e possibilmente sotto il pavimento.

Per il dimensionamento dei suddetti condotti si terrà conto che l'intensità dei campi di radiazione diminuiscono sensibilmente dopo ogni diffusione e che le dosi trasmesse lungo i condotti dipendono dal rapporto tra la lunghezza (r) e il diametro (d) di ciascun condotto.

Indicativamente, per valori di $r/d < 50$ si trova che la frazione T di dose trasmessa lungo il condotto può essere espressa da (9).

$$T = 0,8 e^{-1,5 r/d} + 2,8 \cdot 10^{-3} e^{-0,12 r/d}$$

Nel caso di STAR tale rapporto è uguale a 12,5.

Per un eventuale secondo tratto del condotto, l'espressione di cui sopra risulta ampiamente cautelativa. Ad ogni modo, eventuali livelli di radiazione superiori ai valori di progetto comporteranno l'aggiunta di schermi adeguatamente alloggiati e dimensionati.

5.5 Skyshine

Un importante effetto di diffusione della radiazione pronta prodotta è il cosiddetto effetto di skyshine. Esso è dovuto essenzialmente alle riflessioni della radiazione da parte dell'atmosfera e può evidenziarsi intorno a sorgenti prive di schermatura verso l'alto o poco schermate verso l'alto, nel caso specifico di un tetto schermante pari a 50 cm di calcestruzzo.

La radiazione di skyshine può causare livelli di dose del tutto indesiderabili anche a grande distanza dalla sorgente. Anche se esiste in linea di principio lo skyshine di fotoni il contributo principale è quello dei neutroni. La formula semiempirica utilizzata per i calcoli è quella di seguito riportata (3):

$$H = 3 * 10^{-15} e^{-(r/\lambda)} / r^2 (Sv/n)$$

che dopo adeguata trasformazione diventa

$$\dot{H} = 3 * 10^{-15} * 3600 e^{-(r/\lambda)} / (h+r)^2 \frac{Sv h^{-1}}{n * s^{-1}}$$

Dove

\dot{H} è l'equivalente di dose da neutroni;

r è la distanza del punto dove la dose è calcolata

λ è la lunghezza efficace di assorbimento dell'aria e vale a questa energia circa 400 m

h è un fattore empirico pari a 40 m

Fase 2-Skyshine

La dose di neutroni da skyshine nell'ipotesi che il fascio da 85 MeV venga assorbito in un dump la cui una schermatura verso l'alto abbia spessore di almeno 102 cm di calcestruzzo a cui si vadano ad aggiungere i 50 cm del tetto (ovvero di 52 cm piu' il tetto di 100 cm) darebbe a varie distanze gli equivalente di dose sotto riportati per 6000 ore anno di funzionamento (Tab. 14).

Tab. 14

Distanza	Equivalente di dose
m	$\mu Sv/ a$
10	2.76E+ 01
20	1.87E+ 01
30	1.34E+ 01
40	1.00E+ 01
50	7.72E+ 00
100	2.81E+ 00
200	7.46E-01
300	2.89E-01
400	1.35E-01
500	6.96E-02
1000	5.38E-03

Nell'ipotesi poi che una parte di tale fascio 1% possa perdersi lungo la linea da vuoto e nell'ipotesi peggiorativa che la perdita avvenga tutta in un punto per 6000 ore anno di funzionamento si ottengono i valori di cui alla tabella 15 e rappresentati graficamente in fig. 9.

Tab. 15

Distanza	Equivalente di dose (100cm)	Equivalente di dose (152 cm)
m	$\mu\text{Sv/ a}$	$\mu\text{Sv/ a}$
10	5.49E+ 00	2.76E-01
20	3.72E+ 00	1.87E-01
30	2.66E+ 00	1.34E-01
40	1.99E+ 00	1.00E-01
50	1.53E+ 00	7.72E-02
100	5.59E-01	2.81E-02
200	1.48E-01	7.46E-03
300	5.75E-02	2.89E-03
400	2.67E-02	1.35E-03
500	1.38E-02	6.96E-04
1000	1.07E-03	5.38E-05

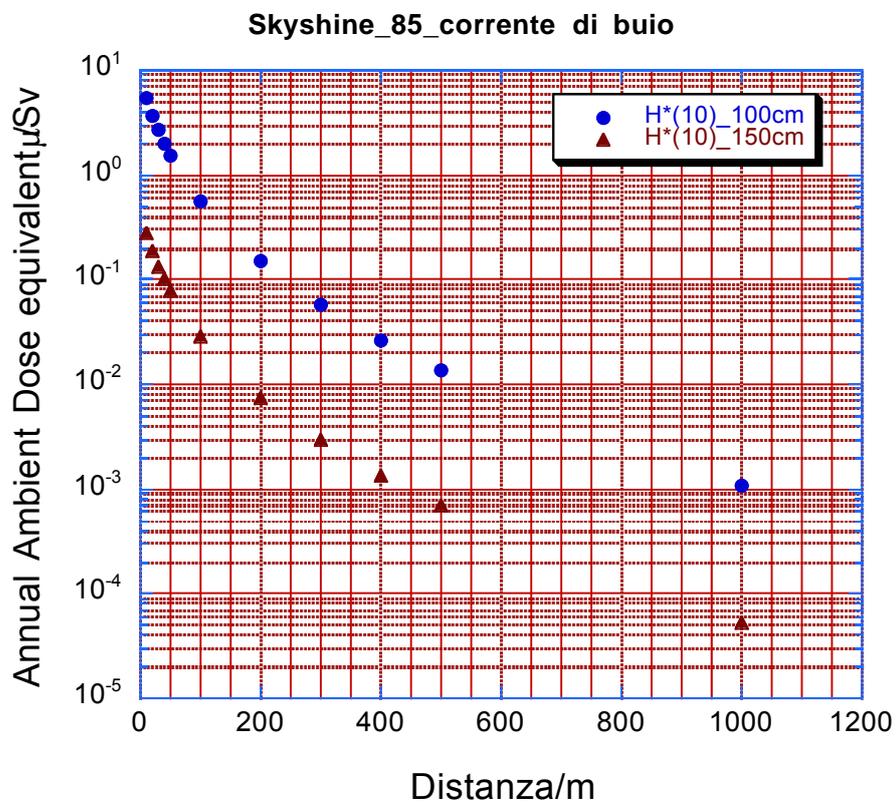


Fig. 9 Skyshine corrente 85 MeV corrente di buio

Fase 3-Skyshine

La dose di neutroni da skyshine, nell'ipotesi che il fascio da 350 venga assorbito in un dump la cui una schermatura verso l'alto abbia lo spessore di almeno 215 cm di calcestruzzo, a cui si vadano ad aggiungere i 50 cm del tetto (ovvero di 165 cm piu' il tetto di 100 cm) darebbe a varie distanze gli equivalente di dose sotto riportati per 6000 ore anno di funzionamento (Tab. 16).

Tab. 16

Distanza	Equivalente di dose
m	μSv/ a
10	1.16E+00
20	7.82E-01
30	5.61E-01
40	4.19E-01
50	3.23E-01
100	1.18E-01
200	3.12E-02
300	1.21E-02
400	5.63E-03
500	2.91E-03
1000	2.25E-04

Nell'ipotesi poi che una parte di tale fascio 1% possa perdersi lungo la linea da vuoto e nell'ipotesi peggiorativa che la perdita avvenga tutta in un punto per 6000 ore anno di funzionamento si ottengono i valori di cui alla tabella 17 e rappresentati graficamente in fig. 10

Tab 17.

Distanza	Equivalente di dose (50 cm)	Equivalente di dose(100cm)	Equivalente di dose(152 cm)	Equivalente di dose(265 cm)
m	μSv/a	μSv/a	μSv/a	μSv/a
10	2.69E+03	1.52E+02	7.64E+00	1.16E-02
20	1.82E+03	1.03E+02	5.17E+00	7.82E-03
30	1.30E+03	7.36E+01	3.71E+00	5.61E-03
40	9.73E+02	5.50E+01	2.77E+00	4.19E-03
50	7.50E+02	4.24E+01	2.13E+00	3.23E-03
100	2.73E+02	1.55E+01	7.78E-01	1.18E-03
200	7.25E+01	4.09E+00	2.06E-01	3.12E-04
300	2.81E+01	1.59E+00	8.00E-02	1.21E-04
400	1.31E+01	7.39E-01	3.72E-02	5.63E-05
500	6.76E+00	3.82E-01	1.92E-02	2.91E-05
1000	5.22E-01	2.95E-02	1.49E-03	2.25E-06

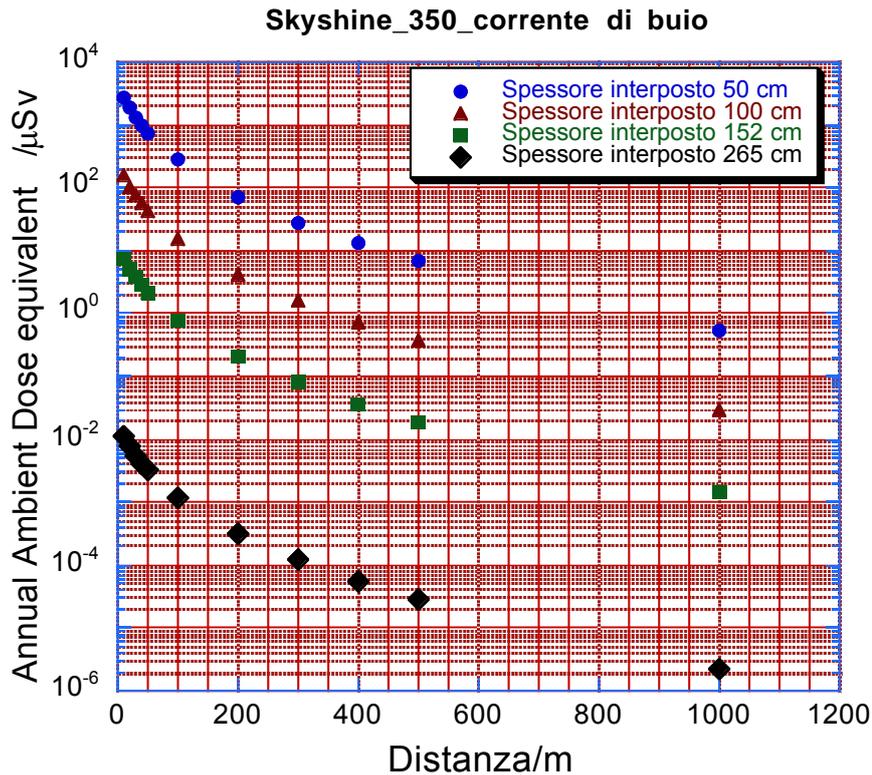


Fig. 10 Skyshine 350 MeV corrente di buio

Risulta del tutto evidente la necessità, prima dell'avvio delle operazioni dell'impianto nella fase 3, di installare un tetto di almeno 1 metro di calcestruzzo, a partire dalla posizione della seconda sezione acceleratrice, in modo tale che la componente di skyshine possa attraversare uno spessore trasversale dell'ordine di 150 cm nelle direzioni di interesse.

6. Processi di attivazione

La radioattività può essere indotta in componenti solide, in aria e in acqua, per una quantità che dipende dall'energia delle particelle incidenti e dalla potenza del fascio nonché dal tipo di materiale. L'equazione generale che regola i processi di attivazione è (10)

$$A_R(t) = \lambda_R N_R(t) = \sigma_{B,R} \varphi N_B (1 - e^{-\lambda_R t})$$

dove

A_R è l'attività presente al tempo t

φ è il rateo di fluena

σ_{BR} è la sezione d'urto di attivazione

N_B è il numero di atomi di tipo B presenti nel materiale targhetta

N_R è il numero di atomi radioattivi prodotti al tempo t

t è la durata dell'irraggiamento

Se il tempo t è sufficientemente lungo cioè lungo almeno 3 volte la vita media del radionuclide formato, allora l'equazione precedente si semplifica e diventa $A_{RS} = \tau_{B,R} \phi N_B$ detta attività a saturazione.

Introducendo poi il "tempo di raffreddamento" T_c l'equazione generale diventa

$$A_R(t, T_c) = A_{RS} (1 - e^{-\lambda_R t}) e^{-\lambda_R T_c}$$

Per una valutazione precisa e dettagliata dei livelli di attivazione delle strutture della macchina sarebbe necessario conoscere con precisione difficilmente acquisibile a priori un gran numero di parametri. Infatti oltre alla corrente e all'energia delle particelle si dovrebbero conoscere la natura dei materiali presenti nonché la loro geometria e purezza, le modalità di funzionamento, la distribuzione delle perdite etc. Si può comunque pensare di fare stime utili per la programmazione delle azioni di radioprotezione introducendo alcune ipotesi esemplificative:

- i materiali considerati sono solo rame, ferro, aria e acqua;
- la radioattività residua è indotta principalmente da neutroni di fotoproduzione e da reazioni di fotospallazione ;
- ciascuna reazione produce un atomo radioattivo.

Le reazioni di fotoproduzione più abbondanti sono le (γ, n) . L'attività a saturazione a reazioni di fotoproduzione diverse dalle (γ, n) e/o ad altri processi inclusi la fotospallazione può essere assunta pari al 5% del totale.

Ciò premesso risulta pertanto sufficiente conoscere il numero di fotoneutroni prodotti per conoscere l'attività, infatti per una targhetta spessa di dimensioni infinite la produzione di neutroni è data da

$$Y_R = 1.21 \times 10^{11} Z^{0.66} \text{ neutroni s}^{-1} \text{ kW}^{-1}$$

che si può scrivere

$$Y_R = 1.21 \times 10^{11} Z^{0.66} \text{ atomi radioattivi s}^{-1} \text{ kW}^{-1}$$

L'espressione è valida ovviamente nel caso sia presente un solo isotopo nella targhetta.

Considerando che le targhette reali ovvero i materiali impiegati sono fatte di vari isotopi e introducendo l'abbondanza isotopica F dell'elemento considerato e introducendo il fattore $R_{\sigma(\gamma, x)\sigma(\gamma, n)}$ che rappresenta il rapporto fra l'attività a saturazione per le reazioni (γ, n) considerate e l'attività a saturazione della reazione (γ, n) l'equazione finale di produzione di atomi radioattivi diventa

$$Y_R = 1.21 \times 10^{11} Z^{0.66} F R_{\sigma(\gamma, x)\sigma(\gamma, n)} \text{ atomi radioattivi s}^{-1} \text{ kW}^{-1}$$

Ma $Y_R = A_{RS} = \tau_{BR} \phi N_B$

e allora effettuando qualche sostituzione si avrà dall'equazione principale

$$A_R(t, T_c) = Y_R (1 - e^{-\lambda_R t}) e^{-\lambda_R T_c}$$

Detta formula fornisce una stima realistica seppur conservativa delle attivazioni a saturazione dei principali materiali di cui è costituito l'acceleratore.

6.1 Produzione di gas radioattivi

Nei calcoli sono stati considerati soltanto i fotoni poichè la produzione di gas radioattivi da fotoni è molto maggiore di quella diretta degli elettroni (differente sezione d'urto) [4, 10]. Schematicamente la produzione di nuclei radioattivi può essere rappresentata nel modo seguente:

nucleo bersaglio+particella ionizzante= nucleo radioattivo + altro.

Applicando le formule precedentemente indicate con qualche piccola variazione dovuta al fatto che la "targhetta" e' l'aria, prendendo un valore dello Z efficace pari a 7.26 e tenuto conto della frazione percentuale di ciascun componente F della miscela rispetto al totale, si avrà una produzione di isotopi radioattivi dell'ossigeno e dell'azoto pari rispettivamente a

$$Y_{O-15} = 1.21 \times 10^8 \times 0.21(7.26)^{0.66} \frac{\text{atomi}}{s W} = 9.4 \times 10^7 \frac{\text{atomi}}{s W}$$

$$Y_{N-13} = 3.4 \times 10^8 \frac{\text{atomi}}{s W}$$

La variazione degli atomi radioattivi presenti sarà

$$\frac{dN}{dt} = WYf(1 - e^{-x/\lambda}) - (\lambda_R + k \frac{F_R}{Y})N$$

W = potenza dissipata pari a 5 W

Y = produzione per unità di potenza

F= frazione percentuale dell'isotopo considerato

f = frazione di brems in aria pari a 1

x= percorso medio in aria pari a 2.94 m

λ = lunghezza di attenuazione in aria pari a 385 m

k= fattore che tiene conto dell'imperfetto mescolamento dell'aria pari a 1/3

λ_R = costante di decadimento di R

F_R = numero di ricambi aria per ora pari a 2

V= volume della sala pari a 750 m³

e per N=0 t=0 la soluzione è

$$N = \frac{WfY(1 - e^{-x/\lambda})(1 - e^{-(\lambda_R + k \frac{F_R}{V})t})}{\lambda_R + k \frac{F_R}{V}}$$

poiché

$$A_R = \lambda_R N \quad A_R \text{ in dis/s}$$

$$A_R = \frac{\lambda_R WfY(1 - e^{-x/\lambda})(1 - e^{-(\lambda_R + k \frac{F_R}{V})t})}{\lambda_R + k \frac{F_R}{V}}$$

I valori di concentrazione per unità di volume in tali condizioni di funzionamento, fase 2 e corrente di buio, risultano essere pari a

Radionuclide	Concentrazione
	Bq/m3
N-13	2.43E+03
O-15	1.86E+03
Cl-38	8.76E+00
Cl-39	5.97E+00

Nella legislazione italiana non viene trattato il caso dei gas radioattivi quali l'O-15 e l'N-13. Una utile indicazione si può comunque avere mediante il confronto con la legislazione svizzera per la quale un valore limite di concentrazione pari a 7×10^4 Bq/m³ viene indicato questo tipo di gas (N-13, O-15) di gran lunga i più importanti. Va tenuto altresì conto che il percorso in aria considerato è in condizioni di assenza schermatura.

Per quanto riguarda la fase 3 con una potenza pari a 14 watt (corrente di buio) si ottengono i valori sotto indicati sempre in assenza di schermature e nell'ipotesi che la bremmstrahlung si propaghi in aria per 2.94 m.

Radionuclide	Concentrazione
	Bq/m3
N-13	6.79E+03
O-15	5.21E+03
Cl-38	2.45E+01
Cl-39	1.67E+01

6.2 Produzione di gas tossici

Per quanto riguarda la produzione di Ozono (11) si possono utilizzare espressioni analoghe a quelle usate per la produzione di gas radioattivi. Per i calcoli si farà riferimento al valore di produzione trovato al CERN, in termini di litri/s kWm.

$$Y_{O_3} = 1.9 \times 10^{-5} \text{ l} * \text{s}^{-1} * \text{kW}^{-1} * \text{m}^{-1}$$

La concentrazione a saturazione di O₃ nella fase 1 e 2, con un percorso in aria di 2.94 m e con corrente di buio conservativa pari a 5 watt, sarà pari a C_{O₃}= 1.12E-03 ppm

Per quanto riguarda la fase 3 con una potenza pari a 14 watt (corrente di buio) si ottiene una concentrazione a saturazione di O₃ pari a C_{O₃}= 3.13E-03 ppm.

Detti valori sono nettamente inferiori al limite per i lavoratori di 0.1 ppm nel caso di lavoro continuo nell'ambiente per 8 ore al giorno e per 2000 ore anno.

E' appena il caso mettere in evidenza che trattasi di valori in assenza di ventilazione e di schermatura.

La concentrazione di gas tossici quali gli NOx non viene calcolata perche' certamente inferiore a quella dell'ozono.

6.3 Attivazione delle acque di raffreddamento dei circuiti

L'attivazione dell'acqua di raffreddamento può essere dedotta nello stesso modo che nel caso dei materiali metallici o l'aria con la sola differenza nel materiale targhetta. Il circuito di raffreddamento e' in genere costituito da un sistema a circuito chiuso in cui circola acqua demineralizzata. Poiché allo stadio attuale del progetto non sono stati definiti i passaggi delle tubazioni non e' stata fatta alcuna valutazione al riguardo. Si ritiene peraltro che trattasi di problema secondario rispetto a quelli finora esaminati, specialmente se si tiene nel dovuto conto che i passaggi delle tubazioni non interesseranno aree esterne.

7. Valutazione del rischio radiologico per i lavoratori e la popolazione dovuto all'impianto.

7.1 Condizioni normali

Sulla base degli obiettivi di progetto, i livelli di dose previsti nelle varie aree di lavoro così come nelle aree esterne all'impianto STAR, saranno estremamente modesti e comunque ampiamente entro i limiti stabiliti dalla normativa vigente, per i lavoratori e per la popolazione

7.2 Condizioni di incidente

L'unico tipo di incidente ipotizzabile consiste nell'irradiazione accidentale di una persona che si venisse a trovare all'interno della Sala STAR o dell'area sperimentale durante il funzionamento dell'acceleratore e/o l'erogazione del fascio dei raggi X. Tale evento potrebbe rivelarsi di estrema gravità per il singolo, ma deve ritenersi del tutto improbabile tenuto conto delle ridondanze che verranno introdotte nel sistema di sicurezze.

Se tuttavia dovesse verificarsi, la persona in oggetto verrebbe esposta alle radiazioni secondarie di raggi x e neutroni essendo il fascio di elettroni sempre in guide da vuoto.

Una valutazione a priori della dose assorbita è pressoché impossibile a farsi sia per la natura casuale delle perdite di fascio sia per l'impossibilità di stabilire la durata dell'eventuale esposizione e le sue modalità.

8. Apparati radiogeni ausiliari (klystrons) e sorgenti radioattive di taratura per la strumentazione di radioprotezione e degli apparati sperimentali

Sono inoltre sorgenti di radiazione i modulatori (klystrons) installati nella Sala Macchine, le cui caratteristiche di funzionamento saranno acquisite nella fase di definizione di funzionamento dell'intero complesso sperimentale. Su tali apparati radiogeni, già dotati di schermo proprio, verranno aggiunte eventuali ulteriori schermature locali in piombo a garanzia del rispetto dei livelli di dose stabiliti dall'esperto qualificato, in riferimento alla classificazione dell'area in questione.

E' inoltre prevista la detenzione e l'uso di piccole sorgenti sigillate di calibrazione per la strumentazione di radioprotezione e per gli apparati sperimentali di cui al seguente elenco.

Sorgente	C o - 6 0	C s - 1 3 7	N a - 2 2	Y - 8 8	A m - 2 4 1	Am-Be	S r - 9 0	E u - 1 5 4	B a - 1 3 3	M n - 5 4	C o - 5 7	Fe - 55	E u - 1 5 2
kBq	50	50	50	50	1		50	50	50	50	50	300	50
n/s						2.4 x10 ⁵							

L'utilizzo delle sorgenti radioattive di calibrazione verrà regolato da apposite norme interne.

10. Sala Sperimentale

La Sala Sperimentale è destinata ad utilizzare la radiazione X originata dall'interazione del fascio di elettroni con il fascio laser.

Ai fini della valutazione delle schermature della Sala Sperimentale è necessario prendere in considerazione, oltre al fascio monocromatico di raggi X prodotto di energia variabile nell'intervallo 8 keV a 5 MeV con un flusso max di $5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ con uno spot di $1.26 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$ alla sorgente, il fascio di bremsstrahlung prodotto dall'interazione del fascio di elettroni sul gas residuo dell'acceleratore nel tratto dritto che va dal secondo dipolo della dogleg al punto di interazione (circa 3.77 m nel caso della bassa energia).

Raggi X

La dose assorbita in un punto può essere calcolata a partire dalla seguente formula (9)

$$\dot{D} = \Psi \mu_{en} / \rho$$

dove Ψ è la densità di flusso di energia

Tenuto conto di tutti i fattori di normalizzazione, per un punto posto a 10 metri dalla sorgente con spot pari a 100 mm (78.50 cm^2) per il fascio si raggi x da 20 keV, a circa 70 cm^2 per il fascio di raggi x da 120keV e 300 keV, a 0.57 cm^2 per il fascio da 5 MeV e

una intensità massima di progetto pari a 5×10^{11} fotoni/s (20 e 120 keV) e 5×10^{12} fotoni/s (300 keV e 5 MeV).

È appena il caso di mettere in evidenza che i valori di rateo di kerma in aria in assenza di schermatura sarebbero rispettivamente 1.9 Gy/h, 11.9 Gy/h, 48 Gy/h e 4.4×10^5 Gy/h.

Il fascio da 20 keV viene totalmente assorbito da uno spessore di Pb pari a 0.1 cm, il fascio da 120 keV viene totalmente assorbito da uno spessore di Pb pari a 0.5 cm il fascio da 300 keV viene totalmente assorbito da uno spessore di Pb pari a 5 cm mentre per il fascio da 5 MeV sono necessari 50 cm di Pb per portare il valore di dose assorbita in aria a circa $13 \mu\text{Gy/h}$

L'accesso alla Sala Sperimentale con il Linac in operazione per la produzione di fotoni deve essere protetto da idonei assorbitori sulla linea del fascio e interbloccato con la posizione degli stessi. Detti assorbitori devono altresì essere in grado di assorbire del tutto la componente di gas bremsstrahlung.

Il calcolo di quest'ultima componente viene effettuato per mezzo della seguente espressione empirica [12,13]

$$\dot{D} = 2.5 * 10^{-27} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^{2.67} \frac{L}{d(L+d)} I \frac{p}{p_0}$$

dove

E è l'energia degli elettroni in MeV

L è la lunghezza della sezione dritta (3.77)

d è la distanza fra la fine della sezione dritta e il punto di misura

p è la pressione del tratto dritto

p_0 vale 1.33×10^{-7} Pa

I è la corrente di elettroni in e-/s

A 10 metri di distanza, con 60 nA a 85 MeV e 3000nA a 350 MeV e una pressione di 1.33×10^{-7} Pa si avrebbero rispettivamente $2.2 \times 10^{-5} \mu\text{Gy/h}$ e $4.8 \times 10^{-2} \mu\text{Gy/h}$.

Un eventuale vacuometro posto all'inizio del canale, prima dei beam stopper previsti, verrà usato allo scopo di dare il consenso all'apertura degli stessi in funzione del vuoto misurato.

È del tutto evidente che, allo scopo di soddisfare gli obiettivi di progetto per le aree esterne alla sala stessa, dovrà essere installato un pozzo di spegnimento di adeguato spessore in fondo alla Sala Sperimentale.

E' altresì evidente che tutti gli apparati sperimentali che per il loro funzionamento dovessero intercettare il fascio dovranno essere adeguatamente schermati in tutte le direzioni, ovvero si dovrà provvedere ad installare pareti schermanti della sala sperimentale nonché un tetto schermante di adeguato spessore.

10. Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza STAR

Il sistema di sicurezza radiologica che si prevede di attuare presso la sorgente STAR sarà costituito da componenti di tipo passivo e di tipo attivo. In tal senso il sistema di sicurezza radiologica può essere scomposto in tre parti:

- sistema di controllo accessi;
- sistema di segnalazione e di emergenza;
- sistema di controllo radiologico.

Sistema di controllo accessi

In tutte le aree in cui può essere presente il fascio sarà operante un sistema di controllo degli accessi per la radioprotezione. Scopo del sistema è quello di limitare e controllare l'accesso alla Sala dove è installata la sorgente STAR. Questo sistema di controllo dovrà provvedere a:

- predisporre la sala, tramite l'esecuzione di un giro ronda, all'invio del fascio;
- effettuare lo stop dell'acceleratore, del fascio o di altri dispositivi radiogeni, se le sicurezze nella sala non sono attuate o in caso di apertura accidentale di una porta o per una emergenza;
- controllare permanentemente tutti gli ingressi e consentire l'accesso solo al personale autorizzato, permettendo una ricostruzione storica di tutte le operazioni o transiti del personale nelle zone controllate;
- effettuare le segnalazioni acustiche e luminose.

L'ingresso viene gestito da apposito sistema di controllo composto da:

- unità di lettura tessere di tipo magnetico (una in ingresso e l'altra in uscita). Le unità di lettura controllano il transito in ingresso ed in uscita del solo personale dotato di apposita tessera magnetica;
- tornello girevole + porta. Ammette il passaggio di un'unica persona solo dopo aver ricevuto il consenso proveniente dalle unità di lettura tessere;
- interfaccia per il colloquio tornello-teste di lettura. Effettua le seguenti operazioni: invio consenso dalle unità di lettura al tornello, ricezione del segnale di avvenuto passaggio generato dalla rotazione del tornello nel senso predeterminato, invio all'unità di controllo dei dati relativi al passaggio avvenuto e conseguente abilitazione della unità di lettura ad una lettura successiva;
- interfaccia per il colloquio con l'unità centrale;
- computer che, attraverso un software apposito consente la creazione, la gestione e la memorizzazione di un archivio anagrafico, assegna e cancella i codici di matricola delle tessere, disabilita e/o abilita in modo diverso l'accesso del personale;
- interfaccia di output di tipo opto-elettronico per il comando di dispositivi ausiliari e avente capacità di colloquio con PLC per la gestione di un sinottico dell'acceleratore.

Sistema di sicurezza, segnalazione e di emergenza

Porte di accesso

L'accesso alla sala dell'acceleratore avviene attraverso una sola porta d'ingresso.

L'accesso alla sala dell'acceleratore potrà essere regolato da un temporizzatore nel rispetto dei tempi di attesa indicati dall'esperto qualificato.

L'apertura della porta di accesso impedisce il funzionamento dell'acceleratore.

Uscita di emergenza

La sala STAR è dotata di uscita di emergenza realizzata attraverso una porta dotata di maniglione antipánico, che conduce, attraverso un corridoio protetto da altre due porte interbloccate, tutte apribili solo dall'interno, in un luogo sicuro. L'uscita di emergenza può essere utilizzata come ingresso ausiliario solo ed esclusivamente in occasione di manutenzioni straordinarie.

Interlocks

Le porte di accesso alla sala Star, incluse quelle di emergenza, sono dotate di un sistema di microinterruttori montati su due linee completamente indipendenti ciascuna costituita da due microinterruttori in serie.

La loro apertura provocherà l'arresto dell'acceleratore, farà scattare una segnalazione acustica in Sala Controllo e richiederà l'effettuazione della ronda prima del riavvio della macchina.

I microinterruttori, devono essere sigillati, così come eventuali scatole di derivazione e/o morsettiere.

Ronda

Prima della accensione della macchina e dopo ogni accesso alla Sala STAR e ai corridoi dell'uscita di emergenza è necessario effettuare un giro di ronda per verificare l'assenza di persone. Le fasi della ronda sono le seguenti:

- l'operatore di macchina predisporre il sistema di controllo accessi nella posizione di esecuzione ronda;
- il sistema si pone nella fase di "ronda in corso", ed avvia una segnalazione acustica locale di evacuazione di 30 sec;
- dopo tale segnalazione acustica, l'operatore incaricato effettua il giro ronda ed ispeziona visivamente tutti i locali della sala interessata, percorrendo l'area e premendo i pulsanti nella giusta sequenza e nel tempo prestabilito. Durante tale controllo l'accesso alla sala STAR è consentito al solo personale abilitato a tale mansione.

Il completamento della ronda sarà seguito da un suono di campana della durata di ~ 30 secondi.

A ronda conclusa correttamente, il sistema inserisce lo stato richiesto e genera i segnali di consenso all'acceleratore o agli elementi di linea.

L'esecuzione delle ronde è affidata agli operatori di turno agli acceleratori.

Chi effettua la ronda è responsabile della sua regolare esecuzione sotto il profilo della sicurezza, pertanto l'esecuzione corretta di una ronda non è limitata alla giusta pressione dei pulsanti ma alla verifica dell'assenza di persone in ogni angolo o parte della sala. Il giro di ronda deve essere eseguito da un solo operatore. La ronda dovrà essere effettuata percorrendo una via prestabilita lungo la quale siano dislocati razionalmente pulsanti da azionare in sequenza. L'azionamento di ciascuno di essi abiliterà il successivo. Verrà inoltre installato un sistema di telecamere, ognuna delle quali in grado di coprire l'area compresa tra due pulsanti consecutivi, con trasmissione in sala Controllo.

Quadri luminosi

Vicino a ciascuno degli ingressi della sala dell'acceleratore, all'interno di essa e nella Sala Controllo, nella Sala Sperimentale e sulla sua porta di accesso, saranno installati dei quadri luminosi indicanti lo stato di funzionamento della macchina e recanti le seguenti diciture: "MACCHINA SPENTA", "TENSIONE AI CONTROLLI", "ALTA TENSIONE", "ELETTRONI ACCELERATI" "GAMMA BEAM-ON" e "GAMMA-BEAM OFF".

Su ciascun quadro deve essere aggiunta anche l'indicazione dell'obbligo dell'uso del dosimetro individuale, che deve illuminarsi automaticamente quando tale obbligo scatta nell'ambiente in cui il quadro è installato.

Lampade di segnalazione

Nella sala dell'acceleratore e nella Sala Sperimentale saranno installate delle lampade rosse.

Dette lampade lampeggeranno quando uno o più modulatori saranno pronti per l'accensione dell'alta tensione e le porte di accesso alla sala dell'acceleratore saranno chiuse e la ronda è stata completata. Saranno invece accese fisse quando vi sarà alta tensione ad uno o più modulatori.

Su ciascun modulatore vi saranno due lampade: una verde, accesa quando ci sarà tensione ai controlli ed un'altra rossa, accesa quando vi sarà alta tensione.

Le lampade di segnalazione devono funzionare in accordo con il seguente codice dei colori:

Verde: apparecchiatura spenta

Rosso lampeggiante: apparecchiatura in condizioni di pronto

Rosso fisso: apparecchiatura in funzione

Segnalazioni acustiche

Dopo l'effettuazione della ronda negli ambienti ove l'accesso è proibito durante il funzionamento della macchina, si deve automaticamente attivare un suono di sirena per la durata di 30 secondi prima di poter dare alta tensione ai modulatori del linac.

Chiave di avvio della macchina

Deve agire sul cannone e sull'alta tensione del linac. Essa deve essere estraibile soltanto in posizione di "OFF".

Pulsanti di emergenza

Devono essere presenti in tutte le aree ove passano i fasci, in Sala Controllo ed eventualmente nelle altre aree frequentate dal personale.

Devono essere visibili anche al buio.

Devono spegnere l'alta tensione del linac.

Devono poter essere ripristinati soltanto in loco.

Devono far scattare l'obbligo della ronda, una volta premuti.

Devono essere in numero sufficiente ed essere installati in modo da poter essere facilmente raggiungibili.

Magneti

I magneti curvanti, importanti ai fini della sicurezza radiologica, devono essere gestiti mediante la misura del relativo campo magnetico a mezzo di apposite sonde di misura.

Pannelli di controllo e quadro sinottico dei dispositivi di sicurezza.

Eventuali scatole di derivazione o morsettiere dei cavi dei sistemi di radioprotezione collegati ai pannelli di controllo devono essere sigillate.

La numerazione di identificazione dei cavi di arrivo deve essere visibile solo aprendo le parti sigillate.

Lo stato di tutte le sicurezze deve essere riportato in un quadro sinottico in Sala Controllo.

Allarmi

Durante lo stato di funzionamento della macchina l'attivazione di un pulsante di emergenza provoca un allarme sonoro e visivo in sala Controllo. Lo stato di allarme rimane attivo fino a quando l'operatore non interviene ripristinando localmente il pulsante in allarme.

Il superamento dei livelli di radiazione oltre le soglie prefissate dall'esperto qualificato generano un segnale di allarme acustico e luminoso localmente e in sala Controllo. Lo stato di allarme rimane attivo fino a quando i livelli di radiazione non scendono sotto le soglie prefissate, e il sistema di controllo non venga ripristinato attraverso un comando di "reset".

Tutti gli allarmi comportano automaticamente il blocco del fascio.

Elementi di Blocco del Fascio

Gli elementi degli acceleratori e delle linee di fascio che sono collegati con i sistemi di sicurezza per la radioprotezione sono parte integrante di esso. La loro manutenzione o modifica deve essere preventivamente autorizzata dall'Esperto Qualificato. Tali elementi e le loro caratteristiche sono individuati da apposita relazione dell'Esperto Qualificato.

Tutti i componenti del sistema di segnalazione sicurezza ed emergenza devono essere "fail safe", di elevata affidabilità e di lunga durata. Si terrà conto inoltre dell'eventuale danno che gli stessi potrebbero subire in presenza di forti campi di radiazione e si adotteranno le soluzioni del caso.

L'efficacia di tutti i componenti il sistema di sicurezza dovranno essere controllati con una frequenza almeno semestrale e comunque ogni qual volta c'è un intervento su uno di essi.

Modalità di accesso alla sala STAR

L'accesso e la permanenza nella sala STAR è regolata come di seguito indicato

- **INGRESSO LIBERO** - In tale condizione l'accesso è consentito senza limitazioni a tutto il personale, sia interno che esterno senza nessuna restrizione per motivi di radioprotezione. In tale stato le porte possono essere liberamente aperte. All'esterno di ogni porta è accesa la luce verde di "INGRESSO LIBERO".

- **INGRESSO CONTROLLATO** - In tale condizione l'accesso è consentito solo al personale autorizzato, la porta è bloccata e può essere aperta esclusivamente mediante scheda magnetica personale abilitata. Vengono così registrati gli ingressi e le uscite dalla sala di ciascun lavoratore, dai quali è possibile risalire al relativo tempo di permanenza. All'esterno della ogni porta è accesa la luce gialla di "INGRESSO CONTROLLATO".

- **INGRESSO VIETATO** - In tale condizione l'accesso è vietato a tutto il personale, i lettori di scheda sono disabilitati, le porte sono bloccate dalle elettroserrature e la loro eventuale apertura accidentale genera interlock. All'esterno di ogni porta è accesa la luce rossa di "INGRESSO VIETATO".

Solo nello stato di ingresso vietato, in assenza di allarmi e con la ronda completata correttamente ciascuna sala è pronta a ricevere il fascio.

Gli stati operativi di "INGRESSO CONTROLLATO", di "INGRESSO VIETATO" e di "INGRESSO LIBERO" sono determinati dallo stato di funzionamento della macchina. L'ingresso libero è comunque subordinato all'autorizzazione dell'Esperto Qualificato e/o del personale afferente al Servizio di Radioprotezione che la rilascia dopo aver

verificato i livelli di dose presenti in sala. Inoltre, sulla base del calendario di esercizio o di particolari interventi di manutenzione, su benestare dell'Esperto Qualificato, si potranno disporre specifiche deroghe sugli stati operativi suddetti.

Apposite norme interne di radioprotezione disciplineranno le attività lavorative nella fase di costruzione e di esercizio dell'impianto STAR, esclusivamente per quanto riguarda la protezione dalle radiazioni ionizzanti.

Sistema di controllo radiologico

Il controllo radiometrico dell'impianto verrà effettuato con rivelatori attivi e passivi.

In tutti gli ambienti frequentati abitualmente dal personale si prevede di installare una coppia di rivelatori per γ e n.

È altresì prevista l'installazione di uno strumento per il controllo dell'attività dell'aria espulsa nell'ambiente esterno.

La rete attiva di monitoraggio è utilizzata per interbloccare il funzionamento dell'acceleratore nel caso venga superata la soglia impostata dall'esperto qualificato.

Il blocco deve agire sui triggers del cannone e dei modulatori dei klystrons.

In tutti i locali e nelle aree esterne circostanti verrà istituita una rete di controllo con rivelatori passivi realizzata mediante dosimetri a termoluminescenza o altri idonei dispositivi.

10.1 Collaudo del Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza

Verrà verificato il corretto funzionamento dei singoli elementi del sistema di sicurezze precedentemente descritto sulla base di una "check list" ad hoc predisposta che verrà trasmessa non appena disponibile nei singoli elementi.

10.2 Collaudo delle schermature

Allo scopo di verificare l'efficacia delle schermature si effettuerà una mappatura con strumentazione mobile, dei livelli di radiazione X e dei neutroni presenti in tutti gli ambienti dell'impianto frequentati dal personale e nelle aree circostanti.

10.3 Impianto di ventilazione e di raffrescamento

È previsto che l'edificio che ospita la Sala STAR sia dotato di impianto di ventilazione e raffrescamento in grado di effettuare due ricambi /ora dell'aria della Sala stessa.

10.4 Sistema antincendio

L'Ufficio Tecnico dell' UNICAL ha avviato presso il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Cosenza la procedura di richiesta del parere di conformità antincendio dell'impianto STAR.

11. Sistema di Segnalazione Sicurezza ed Emergenza Sala Sperimentale

L'accesso alla sala Sperimentale avviene attraverso una sola porta d'ingresso, dotata di un sistema di microinterruttori montati su due linee completamente indipendenti, ciascuna costituita da due microinterruttori in serie.

La sua apertura provocherà l'inserimento di idonei assorbitori del fascio di fotoni, farà scattare una segnalazione acustica in Sala Controllo e richiederà l'effettuazione della ronda della sala stessa, prima del disinserimento degli assorbitori.

All'ingresso della sala Sperimentale e all'interno di essa sono installati due pannelli luminosi che indicano lo stato di funzionamento della macchina nonché lo stato di apertura degli assorbitori.

Il sistema attivo di controllo radiologico STAR prevede anche l'installazione nella sala

Sperimentale di una camera a ionizzazione come ulteriore sistema di sicurezza per la protezione del personale.

12. Classificazione delle aree

Si prevede la seguente classificazione delle aree, da confermare peraltro sulla base dell'esito dei rilievi sperimentali in fase di prima verifica.

Sala STAR (interno bunker)	Zona controllata ad accesso interdetto durante il funzionamento della macchina Zona di libero accesso a macchina spenta in caso di attivazione trascurabile. Zona sorvegliata o controllata in caso di attivazione non trascurabile.
Sala STAR (esterno bunker)	Zona di libero accesso
Sala Macchine	Zona controllata l'area delimitata dalla recinzione intorno ai modulatori
Sala Controllo	Zona di libero accesso
Sala Sperimentale	Zona controllata ad accesso interdetto con fascio in sala Zona di libero accesso a macchina spenta o in assenza di fascio

13. Classificazione del personale

Per il personale coinvolto nella conduzione e manutenzione dell'impianto STAR e' prevista la classificazione di lavoratori di categoria "B".

Per tutti gli altri la classificazione sara' di non esposto.

14. Organizzazione funzionale dell'impianto

La struttura organizzativa del personale addetto alla costruzione, alla manutenzione, alla conduzione e alla direzione dell'impianto verrà comunicata non appena formalizzata.

La sorveglianza fisica della radioprotezione sarà garantita da Esperti Qualificati con 3° grado di abilitazione.

La sorveglianza sanitaria dei lavoratori sarà affidata a medici competenti / autorizzati ad hoc designati dall'UNICAL.

15. Valutazioni ex art. 115-ter

Valutazioni preventive della distribuzione spaziale e temporale delle materie radioattive disperse o rilasciate, nonché delle esposizioni relative ai lavoratori e ai gruppi di riferimento della popolazione nei possibili casi di emergenza radiologica (art. 115-ter, capo X, del D.Lgs.230/95 e sue successive modifiche ed integrazioni).

Sorgente STAR

Premesso che

-) la potenza della macchina e le modalità di funzionamento non sono tali da rendere ipotizzabile la produzione di radionuclidi in aria, in misura di qualche interesse per l'ambiente esterno;
-) le strutture eventualmente attivate della macchina sono essenzialmente costituite da ferro, acciaio, alluminio, rame, senza contaminazione superficiale rimovibile;

-) la Sala STAR è comunque dotata di filtri assoluti in aspirazione ed espulsione;
-) un impianto di rivelazione incendi e' ivi installato ;
-) un impianto di segnalazione incendi, in grado di fornire una segnalazione acustica e visiva sia localmente che presso la guardiana presidiata dal Servizio di Vigilanza interna presidiata 24 ore su 24, è ivi installato.

Tutto ciò premesso, eventi incidentali, che diano luogo o possano dar luogo ad una immissione di radioattività nell'ambiente, tale da comportare dosi per il gruppo di riferimento della popolazione, ovvero possibili casi di emergenza radiologica non sono ipotizzabili per il funzionamento di STAR.

Sorgenti radioattive di calibrazione.

Le sorgenti radioattive di calibrazione verranno custodite in un apposito armadio metallico schermato con resistenza al fuoco REI 120, all'interno di un locale dotato di sistema di rilevazione incendi. Le valutazioni relative ad una loro eventuale dispersione in aria, in caso di incendio che le coinvolga, verranno effettuate non appena sarà definita la reale logistica di conservazione e di utilizzo delle stesse.

16. Smantellamento impianto

Vengono di seguito riportati i criteri adottati per le operazioni di decommissionamento degli impianti. Tutte le parti di un acceleratore investite dai fasci primari o dalla radiazione secondaria da questi prodotta possono in linea di principio attivarsi. Si tratta sempre di radionuclidi a vita media breve o intermedia, cosicché lo stoccaggio dei vari materiali da custodire non comporta in genere problemi particolarmente delicati. Il radionuclide a vita media più lunga e' il Co-60 il cui tempo di dimezzamento e' peraltro appena 5.27 anni. E' tuttavia opportuno che il destino delle singole parti venga sempre deciso sulla base dell'esito dei controlli specialistici degli operatori della radioprotezione. Ad ogni modo , tutte le parti provenienti dalle aree ove passano i fasci verranno considerate radioattive e trattate come tali fin quando non sia provato il contrario.

Dopo i controlli del caso i vari materiali verranno suddivisi in tre diverse categorie, cui verranno fatti corrispondere diversi adempimenti di radioprotezione:

- a) materiali che possono essere considerati non radioattivi e la cui destinazione sarà quindi del tutto libera;
- b) materiali debolmente attivati;
- c) materiali attivati.

Allo scopo di avere un criterio pratico per individuare livelli di radioattività, sotto i quali si possa procedere ad un allontanamento incondizionato dei materiali facenti parte degli acceleratori da smantellare, si fa riferimento al parere formulato dal CCPR (Comitato Consultivo per la Protezione Radiologica dell'ENEA-DISP) a proposito dell'allontanamento dagli impianti nucleari, senza vincoli sulla destinazione o limitazioni al riutilizzo, dei materiali solidi debolmente attivati o contaminati. Quando la radioattività è dovuta ad emettitori beta-gamma, il CCPR ritiene che possano essere in tali condizioni i materiali per i quali non si ecceda 0.1 Bq/cm^2 per la contaminazione superficiale e 0.1 Bq/g per l'attività specifica.

Materiali non radioattivi

A questa prima categoria apparterranno i materiali il cui contenuto di radioattività risulti non eccedere i livelli espressi nel sopra menzionato parere del CCPR.

Tutti questi materiali, dopo essere stati rimossi dalle aree ove passano i fasci, verranno contrassegnati dalla Fisica Sanitaria con un'apposita etichetta verde, con la scritta «non radioattivo», la firma in calce dell'operatore e la data dell'effettuazione delle misure, e inviati direttamente nell'area di parcheggio, in attesa di destinazione (riutilizzo, rottamazione e/o vendita, etc.).

Ovviamente si considereranno non radioattivi tutti i materiali provenienti dalle aree ove non passano i fasci, e quindi tutte le attrezzature presenti nelle Sale Controllo, Conteggio, Trasformatori, etc.

Materiali attivati e debolmente attivati

La distinzione tra materiali attivati e materiali debolmente attivati verrà effettuata, per motivi di praticità e di agilità operativa, sulla base del rateo di equivalente di dose misurato a 10 cm di distanza, anche se questo criterio sembra più appropriato dal punto di vista della protezione del personale addetto alle operazioni che da quello della classificazione del contenuto di radioattività.

Si considereranno debolmente attivati i materiali per i quali il rateo di dose a 10 cm di distanza non superi 10 $\mu\text{Sv/h}$, attivati quelli che eccedono tale valore. L'Esperto Qualificato certificherà l'appartenenza all'una o all'altra categoria con etichette sulle quali sarà indicato il valore misurato.

Tutti i pezzi così suddivisi saranno separati per categorie (ferro, acciaio, alluminio, rame, etc.) e, ove possibile, tagliati a pezzi e compressi idraulicamente, in modo da formare dei parallelepipedi da immagazzinare facilmente.

I pezzi più piccoli (bulloni, guarnizioni, viti, connettori), separati secondo le categorie su indicate, saranno stivati in appositi cesti. Analoghi recipienti conterranno i cavi di segnale e di potenza, privati dei relativi connettori e ridotti in pezzi da circa un metro di lunghezza.

I liquidi dei circuiti di raffreddamento delle targhette e degli assorbitori saranno infine raccolti e potranno essere conservati se necessario in speciali bidoni di ferro zincato.

Ad ogni parallelepipedo, cesto o bidone verrà applicata un'ulteriore etichetta autoadesiva, con simbolo di materiale radioattivo, recante l'indicazione della misura di intensità di dose, effettuata a contatto, e la data di effettuazione della stessa.

I materiali etichettati, suddivisi in attivati e debolmente attivati, verranno inviati, per l'immagazzinamento, rispettivamente nei locali a ciò predisposti.

I locali pertinenti le aree da smantellare verranno preventivamente liberati dalle polveri presenti, servendosi di apposito aspiratore in dotazione. Detto lavoro sarà effettuato da personale qualificato opportunamente formato allo scopo, eventualmente equipaggiato con idonei indumenti protettivi.

Successivamente potranno avere inizio le effettive operazioni di smontaggio.

Le parti centrali della linea di trasporto saranno smontate da personale qualificato opportunamente formato allo scopo, e trasportate dagli stessi in apposita area dove verranno misurate allo scopo di stabilirne la destinazione finale.

Successivamente allo smontaggio della linea da vuoto e delle apparecchiature direttamente ad essa collegate, l'E.Q. autorizzerà il completamento dello smontaggio, con modalità del tutto identiche alle precedenti. Quest'ultima operazione potrà essere effettuata anche a cura di personale di ditte esterne.

Dopo ulteriore controllo l'E.Q. provvederà alla declassificazione dell'area in parola e a renderla disponibile per le eventuali nuove iniziative.

È appena il caso di far presente che i rischi radiologici, nel caso dei materiali solidi, sono praticamente legati soltanto all'irradiazione esterna, potendosi restringere i rischi di contaminazione interna a talune particolarissime operazioni (segare o dissaldare metalli fortemente attivati, talvolta sollevare polveri, etc.), nelle quali ci si deve peraltro attendere l'assunzione da parte degli operatori di dosi del tutto trascurabili, tenuto anche conto che non si prevede la presenza di contaminazione superficiale rimovibile.

Bibliografia

- [1] The STAR Project – IPAC 2014
June 15: 20 2014 - Dresden (Germany)
- [2] IAEA TRS Report No 188
RADIOLOGICAL SAFETY ASPECTS OF THE OPERATION OF ELECTRON LINEAR ACCELERATORS
International Atomic Energy Agency
Vienna, 1979
- [3] NCRP Report No. 144, Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities
National Council on Radiation Protection and Measurements
7910 Woodmont Avenue, Suite 400/Bethesda, Mariland 20814-3095
- [4] H.J.Moe
Advanced Photon Source: radiological design considerations
APS-LS-141 Revised Argonne National Laboratories
- [5] NSLS-II Conceptual Design Report
Brookhaven Nation Laboratory
- [6] ICRP Publication 74
Conversion coefficients for use in radiological protection against external Radiation
Adopted by the ICRP and ICRU in septembere 1995
- [7] M Pelliccioni
Overview of Fluence-to-Effective Dose and Fluence-to-Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients
for High Energy Radiation Calculated Using the FLUKA Code
[Radiation Protection Dosimetry Volume 88, Issue 4](#) pp. 279-297
- [8] A.Fasso', K Goebel, M.Hoefert. J Ranft, G Stivenson
Shielding against High Energy Radiation
Landolt-Börnstein -Group I Elementary Particles, Nuclei and Atoms vol 11
- [9] Maurizio Pelliccioni
Fondamenti Fisici della Radioprotezione
Pitagora Editrice Bologna
- [10] A. Esposito
RADIATION PROTECTION PROBLEMS AROUND THE POSITRON CONVERTER OF THE DAØNE
MACHINE PROJECT
LNF-94/054 (P)
Presented at the "1st Mediterranean Congress on Radiation Protection"
5th-7th April 1994-Athens (Greece).
- [11] P. Cavallucci, A. Esposito, M. Pelliccioni, A. Rindi
PRODUZIONE DI OZONO IN ARIA CON FASCI DI ALTA ENERGIA
Annali di Radioprotezione, Vol. 1, Pag. 13, 1979.
- [12]A. Esposito, M. Pelliccioni
GAS BREMSSTRAHLUNG PRODUCTION IN THE ADONE STORAGE RING
LNF-86/23 (NT) 23 Maggio 1986.
- [13]A. Esposito, A. Ferrari, L. Liberatori, M. Pelliccioni
GAS BREMSSTRAHLUNG: A COMPARISON OF MEASUREMENTS AND SIMULATIONS
Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. B 88, 345-349, 1994.