

AMBROGIO PANTALEO
Esperto di Ricerca
Ospedale Regionale di Fisica Nucleare
Esperto Qualificato
Protezione - Fisica Sanitaria
Medicina Nucleare
Tecnologie Nucleari nell'Industria
Geremia D'Erasmus, 13 - 70125 BARI
Tel. (080) 5032328

Relazione Tecnica

11 Luglio 1998

**Progettazione dei presidi protezionistici
per l'esercizio terapeutico
di un acceleratore lineare di elettroni
di energia fino a 25 MeV
presso l'Ospedale Oncologico Regionale
di Rionero in Vulture (PZ).**

**Provvedimenti per l'attuazione
della Sorveglianza Fisica della
Radioprotezione**

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato n. 204 Gr. III



Riferimenti Generali ed Indice.

Presso l'Ospedale Oncologico Regionale di Rionero in Vulture (PZ) si prevede di esercire per scopi terapeutici un acceleratore lineare di elettroni con energia fino a 25 MeV, che verrà installato all'interno di un apposito locale schermato (Bunker).

Il Centro di Riferimento Oncologico della Basilicata (CROB), che ne ha la corresponsabilità di gestione, ha affidato al sottoscritto dott. Ambrogio PANTALEO, Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ed Esperto Qualificato n° 204 di III Grado, l'incarico di progettazione dei presidi occorrenti per realizzare la protezione delle persone del pubblico e quella degli operatori, nonché l'incarico della Sorveglianza Fisica della Radioprotezione presso la futura installazione. Il sottoscritto ha accettato con lettera del 25 Novembre 1997.

Il presente documento pertanto contiene:

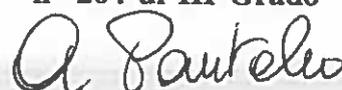
- 1) la descrizione dell'apparecchiatura, delle sue prestazioni con riferimento alle condizioni di rischio e del carico di lavoro per essa previsto;
- 2) la descrizione dei locali previsti per il suo esercizio e dei siti circostanti aventi rilievo per la protezione degli operatori e dei gruppi critici della popolazione.
- 3) le verifiche sulle strutture pre-esistenti del Bunker, le prescrizioni integrative e le verifiche in corso d'opera della loro realizzazione;
- 4) la valutazione delle barriere protettive del Bunker e delle dosi residue all'esterno dello stesso;
- 5) la valutazione del rischio residuo all'interno del Bunker, dovuto alla attivazione dei materiali, e delle procedure per la sua riduzione per gli operatori;
- 6) la valutazione della produzione di gas tossici all'interno del Bunker e le richieste di ricambi d'aria per l'impianto di condizionamento;
- 7) le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione di cui all'art. 61 del D.Lgs. 230/95;
- 8) l'Esame Preventivo ex art. 79, comma 1, lettera b), punto 1) del D.Lgs. 230/95 ed il rilascio del benestare al progetto;
- 9) la Bibliografia di riferimento per i vari capitoli.

La presente relazione tecnica costituisce anche il documento previsto all'art. 4, comma 2 del D.Lgs. 626/94 per gli aspetti concernenti il rischio da radiazioni ionizzanti presso l'acceleratore.

La relazione, redatta in triplice originale, si compone di una copertina, 30 pagine di testo e 6 pagine di figure (citate nel testo, ma presentate da pag. 31 a pag. 36), tutte singolarmente firmate dal sottoscritto Esperto Qualificato.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



1. Descrizione dell'apparecchiatura.

1.1. Premessa

L'acceleratore lineare previsto per l'acquisto, al momento dell'affidamento al sottoscritto dell'incarico di Esperto Qualificato per gli acceleratori dell'Ospedale Oncologico di Rionero, era il "Saturne 43" della G.E. Medical Systems, caratterizzato da fasci di elettroni e di fotoni con energia fino a 25 MeV e da intensità di dose erogabile al paziente fino a 4 Gy/min. Per tale apparecchiatura e per una condizione di rischio ambientale massimale caratterizzato da:

- 1) erogazione di fotoni da frenamento di elettroni di 25 MeV su bersaglio di tungsteno;
- 2) intensità di dosi erogate al paziente 4 Gy/min;
- 3) esercizio di 667 ore annue alla condizioni 1) e 2),

la presente relazione tecnica era stata preelaborata e ne erano scaturite alcune prescrizioni di integrazione delle barriere protettive già esistenti al momento dell'affidamento dell'incarico, ed altre sulla struttura di quelle barriere all'epoca non ancora realizzate, come ad esempio la porta scorrevole d'ingresso al bunker.

Successivamente la G.E. Medical Systems ha rinunciato alla fornitura, che è stata successivamente assegnata alla ditta VARIAN che fornisce un acceleratore lineare di elettroni CLINAC 2100 C.

1.2. Prestazioni dell'acceleratore CLINAC 2100 C.

Il riferimento principale per questo paragrafo e per i due successivi è la relazione tecnica della Oncology Systems, Varian International AG, del 17/04/98, relativa all'Offerta N. 140'207, integrata quando necessario con il documento VARIAN, CLINAC 2100 C, CLINAC 2100 C/D, Equipment Specification.

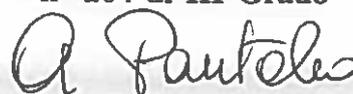
L'acceleratore lineare VARIAN mod. CLINAC 2100 C è un acceleratore di elettroni fino a 23 MeV di energia massima, con funzionamento ad erogazione diretta di elettroni o ad erogazione di fotoni di frenamento del fascio elettronico su un bersaglio di tungsteno.

Le caratteristiche dei due modi di funzionamento, aventi rilevanza per la radioprotezione degli operatori e della popolazione esterna, vengono riportate nel seguito. Non sono trattate esplicitamente le caratteristiche dell'acceleratore inerenti solo la qualità della prestazione di dose erogata al paziente, o riguardanti esclusivamente la qualità delle prestazioni di macchina. Si può però riconoscere che le caratteristiche qui non trattate in dettaglio si collocano tra le migliori dello stato dell'arte nelle tecnologie a cui sono inerenti.

Il sistema di sicurezza controlla i seguenti parametri, rilevati con continuità, e blocca l'irradiazione se riscontra una condizione fuori specifica: simmetria radiale e trasversale, dose troppo alta o troppo bassa, errori nella selezione di dose e tempo, nel posizionamento del

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



bersaglio, dei diffusori, del "flattener", degli accessori, nel funzionamento in arcoterapia, nel movimento del braccio o del lettino, nell'apertura della porta del bunker.

Il sistema di sicurezza controlla inoltre tutti i parametri elettrici e meccanici dell'acceleratore, come alta e bassa tensione, vuoto, acqua, gas, pressione, klystron, RF, magneti di deflessione, circuito di dosimetria.

1.2.1. Funzionamento ad erogazione diretta di elettroni.

Nel funzionamento ad erogazione diretta di elettroni sono selezionabili cinque energie: 6, 9, 12, 16 e 20 MeV e sei intensità di dose da 1 fino a 10 Gy/min. La omogeneizzazione del campo è effettuato mediante doppio foglio di diffusione. All'energia di 6 (o 9) MeV è disponibile per trattamenti di "Total Skin Electrons", solo all'isocentro, un tasso di dose elevato pari a 24 Gy/min. Sono previsti 5 collimatori fissi e **campi d'irradiazione a distanza di 100 cm fino a (25 * 25) cm²**. La contaminazione della dose da raggi X è inferiore al 2% fino a 10 MeV, mentre per le energie superiori è inferiore al 5%. La dose di fuga nel piano del paziente è inferiore al 2% della dose erogata.

I documenti citati al primo capoverso del paragrafo 1.2. non fanno riferimento alle **correnti di elettroni massime in uscita dall'acceleratore per unità di intensità di dose al paziente**, ma sulla scorta di analoghe informazioni da altri acceleratori di elettroni per terapia e della specifica d'impiego del doppio foglio di diffusione, si può ragionevolmente affermare che le correnti di elettroni in uscita dall'acceleratore durante il funzionamento ad erogazione diretta di elettroni siano di circa **0,05 µA per 1 Gy/min all'energia più bassa e di circa 0,01 µA per 1 Gy/min all'energia più alta.**

1.2.2. Funzionamento ad erogazione di fotoni di frenamento.

Nel funzionamento ad erogazione di fotoni di frenamento sono selezionabili **due energie**, delle quali **la più bassa (6 MV)** corrisponde al frenamento di elettroni da 6 MeV e **la più alta ha due alternative: 18 MV** (a norma del British Journal of Radiology, Suppl.11) e **23 MV** (a norma del British Journal of Radiology, Suppl.17); cinque intensità di dose da 0,8 fino a 4 Gy/min, con una intensità elevata di 90 Gy/min, solo all'isocentro, per trattamenti "Total Body Photon". I **campi d'irradiazione** a distanza di 100 cm vanno con continuità **fino a 40 cm**, con un limite di 49 cm sulla diagonale (ad es. 35*35 oppure 28*40 cm²). La dose fotonica di fuga dai collimatori e dalla testa dell'acceleratore, sia nel piano del paziente che in altre direzioni, ad 1 m di distanza dall'asse del fascio elettronico, non supera lo 0,1% della dose fotonica erogata. La dimensione del fascio di elettroni sul bersaglio di produzione dei fotoni non eccede i 3 mm di diametro. La contaminazione della dose da neutroni è dichiarata inferiore a 2 mSv/Gy all'isocentro (escluso trattamento "Total Body Photon"), ciò che pone già un **limite superiore all'intensità della sorgente di neutroni secondari che vi contribuisce**. Assumendo infatti il fattore di conversione da intensità di fluenza ad

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

intensità di dose equivalente neutronica (per neutroni veloci) pari a $6,7 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ per $10 \mu\text{Sv/h}$, si ricava che l'intensità della sorgente di neutroni secondari che contribuisce alla dose neutronica all'isocentro è pari a circa $4 \cdot 10^{10} \text{ n/sec}$.

I documenti citati al primo capoverso del paragrafo 1.2. non fanno riferimento alle **correnti di elettroni massime in uscita dall'acceleratore per unità di intensità di dose fotonica** al paziente, ma, sulla scorta di analoghe informazioni da altri acceleratori, si può ragionevolmente affermare che le correnti di elettroni in uscita dall'acceleratore durante il funzionamento ad erogazione di fotoni di frenamento siano **tra 35 e $1,5 \mu\text{A}$ per 1 Gy/min** dall'energia più bassa all'energia più alta.

1.2.3. Carico di lavoro.

Per definire un valido carico di lavoro a base della valutazione delle barriere protettive e dei rischi residui da radiazioni per gli operatori e la popolazione, **vanno considerate le varie operazioni che impegnano le strutture senza permettere, durante la loro esecuzione, l'erogazione di fasci dall'acceleratore:** espirazione dei tempi d'attesa che è necessario prescrivere dopo ogni irraggiamento ad elevata energia, prima di poter rientrare nel bunker; evacuazione del paziente dal bunker ed introduzione del nuovo paziente; preparazione del medesimo e dell'acceleratore alla prossima irradiazione; manutenzione ordinaria e straordinaria dell'acceleratore e degli impianti a servizio, ecc.. **Su un orario lavorativo di 2.000 ore per anno, si stima che circa due terzi siano destinate a dette incombenze.**

Il restante terzo dell'orario di lavoro annuo sarà dedicato agli irraggiamenti, i quali avranno la consueta variabilità di scelta delle energie, del tasso di erogazione delle dosi, del modo di funzionamento ad erogazione di elettroni o di fotoni. La scelta più conservativa (cioè quella a cui è connesso maggior rischio) soddisfa le esigenze del principio di ottimizzazione (art. 2, comma 1, lettera b, D.Lgs. 230/95) in quanto necessiteranno barriere protettive di maggior rilievo protezionistico ed il reale rischio residuo risulterà molto più ridotto.

Considerate le correnti di elettroni in gioco, così come stimate ai due paragrafi che precedono, ed il numero atomico dei bersagli assorbenti gli elettroni (alto per il Tungstano (simbolo W) e basso per il paziente) **il rischio ambientale residuo nel funzionamento a fotoni è del tutto prevalente rispetto a quello relativo all'erogazione diretta di elettroni. Inoltre, il rischio residuo negli irraggiamenti a bassa energia di fotoni è trascurabile (circa 1%) rispetto a quello ad alta energia. Infine conviene ipotizzare per tutti gli irraggiamenti (fotonici) il tasso di dose più elevata a campo aperto, ovvero 4 Gy/min .**

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

Concludendo, per la valutazione delle barriere protettive conviene utilizzare fasci fotonici di 23 MV a 4 Gy/min, per 667 ore nell'anno. In realtà, considerate le circostanze nella premessa del presente capitolo, sono state considerati **fasci fotonici di 25 MV a 4 Gy/min per 667 ore annue.**

E' appena il caso di sottolineare che la valutazione delle barriere protettive effettuata nei termini di cui sopra, tollera senza problemi, entro le approssimazioni del calcolo, un raddoppio del carico di lavoro effettivo, qualora si vincoli totalmente il carico di lavoro aggiunto all'esercizio a bassa energia fotonica e/o all'erogazione diretta di elettroni.

2. Descrizione dei locali per l'esercizio e dei siti circostanti.

2.1 Locali per l'esercizio dell'acceleratore.

L'acceleratore sarà esercito in un apposito reparto al piano interrato, sottostante quello d'ingresso nell'Ospedale, dotato di un locale pesantemente schermato (Bunker) destinato a contenere l'apparecchiatura. Una visione di insieme del reparto si ha nella planimetria mostrata nella fig. 1. Cominciando dal corridoio di fuga antincendio e procedendo in senso antiorario in fig. 1, il bunker confina con aree scoperte non frequentate ordinariamente, sala comando, disimpegno d'ingresso e locali di servizio. Non immediatamente a ridosso del bunker, ma di rilievo per il reparto e le valutazioni protettive si trovano la stanza tecnici, con il suo bagno, la stanza infermieri, con il suo spogliatoio, il locale di "Filtro" con i suoi spogliatoi e la stanza Primario con i suoi servizi e l'annessa segreteria.

2.2 Siti circostanti di rilievo protezionistico.

Si prende atto che non esistono locali a piano sottostante. Al piano superiore (Piano Terra) nelle vicinanze del bunker (minimo a otto metri di distanza dall'isocentro) si trovano alcuni uffici ed un parcheggio, una parte del quale potrebbe essere interdetto se lo richiedessero motivi di sicurezza. Gli altri locali più prossimi sono degenze allo stesso piano ed ai piani superiori, a più di 21 metri di distanza dall'isocentro.

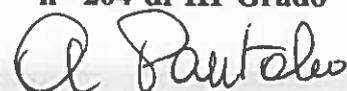
3. Qualificazione delle strutture pre-esistenti del bunker.

3.1 Stato delle strutture preesistenti.

Alla data di affidamento dell'incarico al sottoscritto Esperto Qualificato, il bunker dell'acceleratore risultava già realizzato da alcuni anni, ma nessuno era in grado di fornire dati sulla densità dei manufatti in conglomerato cementizio ordinario (CCO) e baritico

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



(CCB) e sulla omogeneità della loro realizzazione. Il C.R.O.B. ha riconosciuto, a seguito delle difficoltà segnalate dal sottoscritto, che non si potesse fare a meno di dati certi sulle opere già realizzate e si è reso perciò disponibile a mettere in atto una campagna di misure per la qualificazione dei manufatti in conglomerato cementizio (CC).

3.2 Misure ultrasoniche.

La campagna di misure di qualificazione delle strutture del bunker con metodi ultrasonici è stata affidata alla ISMES S.p.A., Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (BG) (azionista di maggioranza l'ENEL), nota tra l'altro in campo nazionale ed internazionale per la qualificazione di grandi dighe in conglomerato cementizio per bacini idroelettrici.

Le misure hanno avuto luogo nel mese di Dicembre 1997 e sono consistite in oltre 600 misure per trasparenza, prese a 50 cm l'una dall'altra tappezzando a tutta altezza le varie pareti del bunker e facendo un massiccio campionamento del soffitto, più quattro sezioni campione ad altezza d'uomo sulle pareti, per uno sviluppo lineare superiore a 10 metri, esaminate con tomografia ultrasonica di passo 15 cm.

Le misure ultrasoniche sono state complementate da campionamenti diretti di materiale per carotaggio, sui quali campioni sono state effettuate misure di densità.

L'esito delle misure ultrasoniche è riportato nel documento ISMES recante i riferimenti: Prog.STA-2163; Doc.RAT-STA-0055/98, da cui si trae che l'omogeneità dei manufatti in CCO ed in CCB è buona, non superando lo scarto quadratico medio tra le misure l'1 % per il CCB ed il 2,9 % per il CCO.

La densità del CCO è risultata essere di 2,3 g/cm³ e quella del CCB di 3 g/cm³.

Se ne conclude che i manufatti non presentano problemi strutturali, ma il CCB può richiedere integrazioni di barriera protettiva a causa della densità più bassa di quella normalmente presa a riferimento protezionistico (tra 3,3 e 3,5 g/cm³).

3.3 Prescrizioni e verifiche in corso d'opera.

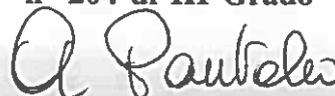
A seguito dei risultati presentati al paragrafo precedente ed avendo preso atto che la previsione di collocamento dell'isocentro dell'acceleratore G.E. Saturne 43, la cui fornitura era ipotizzata in prima istanza, risultava spostata rispetto al centro della barriera primaria già realizzata, sono state prescritte le seguenti opere di ripristino:

a) rinforzo della barriera primaria in CCB con 50 cm di CCO, eccetto il soffitto a motivo del basso valore presumibile per il fattore di occupazione del terrazzo sovrastante, e

b) prolungamento della barriera primaria (BP) rinforzata, ancora eccezion fatta per il soffitto, di 70 cm verso la parete del bunker opposta all'ingresso, sia per la BP confinante con il lato della sala comando che per quella confinante con il corridoio antiincendio. Per le parti del prolungamento insistenti su strutture in CCO già da tempo realizzate, è stato prescritto un

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



rinforzo articolato di CCO inglobante 15 cm di ferro pieno, per equiparare l'effetto schermante complessivo a quello del CCB rinforzato.

In corso d'opera ho effettuato personalmente sopralluoghi di verifica della aderenza dei lavori realizzati a quelli prescritti, avendo sempre riscontri positivi.

Per la porta d'ingresso, che ha necessità di essere strutturata principalmente come barriera neutronica ma anche come barriera fotonica, **ho prescritto una struttura articolata in 20 cm di Polietilene (CH₂) più 1 cm di Piombo verso l'esterno del bunker.** L'articolazione appena descritta si giustifica con la fisica della riduzione del rischio a valle della barriera, così come più avanti presentata sotto i paragrafi 4.2.6. e 4.3.4.

Successivamente alla variazione intercorsa di marca e modello dell'acceleratore da installare verso il CLINAC 2100 C della Varian, **irrinunciabili necessità tecniche** per l'installazione hanno richiesto lo **spostamento del collocamento dell'isocentro** di nuovo verso il corridoio d'ingresso, **tanto da dover prescrivere il rinforzo della BP per una lunghezza di 50 cm ulteriori in Sala Comando.** Essendoci ivi problemi di spazio per il collocamento delle apparecchiature previste, ho prescritto di raggiungere lo stesso livello di protezione aggiuntiva realizzando il rinforzo con uno **spessore di 13 cm di Ferro pieno** in alternativa allo spessore di 50 cm di CCO. Non si è ritenuto di proporre analogo ulteriore prolungamento del rinforzo della BP prospiciente il corridoio antincendio, a causa del basso valore presumibile per il fattore d'occupazione del sito in questione (vedi cap. 4 che segue).

4. Valutazione delle barriere protettive.

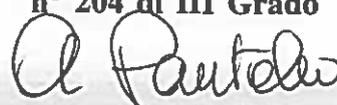
4.1. Obiettivo protezionistico.

L'obiettivo protezionistico che ci si propone è quello di **ridurre la dose complessiva agli operatori addetti**, e quindi maggiormente esposti, **al di sotto di 6 mSv per anno, considerando tutti i contributi** alla stessa dose rivenienti dalle varie sorgenti di rischio: radiazione fotonica e neutronica residua dal funzionamento dell'acceleratore, radiazione residua dai materiali attivati, sommersione in atmosfera contenente radionuclidi residui rivenienti dall'attivazione dell'aria. Contemporaneamente ci si propone di **ridurre la dose alla popolazione al di sotto di 0,3 mSv per anno** come somma dei contributi rivenienti dalla radiazione fotonica e neutronica residua dal funzionamento dell'acceleratore e dagli scarichi esterni di aria radioattivata alle alte energie di esercizio.

Le barriere protettive e le procedure operative saranno valutate in funzione del raggiungimento dell'obiettivo protezionistico proposto, riservandosi la possibilità di prescrivere ulteriori cautele qualora funzionali all'obiettivo o al suo miglioramento.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



Nella valutazione appena citata si deve ricorrere il meno possibile ad approssimazioni della realtà fisica fatte a vantaggio della sicurezza, in quanto il principio di ottimizzazione è ampiamente soddisfatto dalla scelta di una ipotesi conservativa per il carico di lavoro. Pertanto nei paragrafi che seguono verrà dato il giusto rilievo a studi di base sulla spettrometria e sulla dosimetria delle varie radiazioni che realmente interessano le diverse strutture.

4.2. Rischio da fotoni.

4.2.1. Caratteristiche del fascio primario di fotoni di alta energia.

La particolarità dei fasci di fotoni di alta energia ottenuti dal frenamento di elettroni richiede valide stime della distribuzione energetica ed angolare della radiazione sia primaria che secondaria. Allo scopo di procurarsi a base di valutazione delle barriere le distribuzioni energetiche ed angolari appena citate, sono stati effettuati calcoli di simulazione microscopica al computer dei processi fisici coinvolti nella produzione ed erogazione dei fasci. Il programma utilizzato per la simulazione dei fasci di fotoni è basato su GEANT3 (ref.1).

Per la generazione e propagazione del fascio fotonico primario, elettroni da 25 MeV sono stati fatti interagire, nel calcolo di simulazione, con un bersaglio di tungsteno di spessore 4 mm, producendo fotoni di frenamento che, nella direzione del paziente, sono stati filtrati da un "flattener" di ferro di spessore fino a 6,5 cm o, nelle direzioni di incidenza sul diaframma (35*35 cm² di apertura) e sulla schermatura della testa dell'acceleratore, sono stati attenuati da uno spessore di W/Pb (almeno 10 cm) sufficiente a garantire la specifica di massima dose emergente dalla testa dell'acceleratore (0,1% della dose erogata al paziente ad 1 metro dal fascio di elettroni). Un monitor rappresentato da un fantoccio ad acqua di 10 * 10 cm², posto all'isocentro ad 1 m dal bersaglio, è stato utilizzato nei calcoli per lo studio dei fasci prodotti, allo scopo di ottimizzare gli spessori dei materiali ad elevato numero atomico interposti sul fascio nella direzione del paziente. L'obbiettivo è stato quello di variare la geometria dei materiali appena citati fino a riprodurre le rese dosimetriche per unità di corrente di elettroni, sia con "flattener" che senza "flattener", previste da J. Milcamps e misurate sperimentalmente da Mac Gregor (ref.2), segnatamente: 3,9 Gy/min/μA ad 1 m senza "flattener" e 0,68 Gy/min/μA ad 1 m con il "flattener".

Lo spettro dei raggi X di frenamento " (con il "flattener" inserito) che raggiungono il monitor, ottenuto con la procedura precedente è riportato nella fig. 2.

La distribuzione angolare di tali raggi X ne concentra il 18% ad angoli al di sotto dei 5°, il 42% ad angoli tra 5° e 15° ed il rimanente 40% ad angoli al di sopra dei 15°.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

Nello spettro di fig. 2 è interessante, per i fini dei capitoli che seguono, valutare l'intensità della fluenza nel monitor dei raggi X in due caratteristici intervalli energetici nella regione della risonanza gigante di dipolo elettrico dei nuclei:

per $10 \text{ MeV} < E_X < 20 \text{ MeV}$ essa risulta pari a $5 * 10^{12} \text{ min}^{-1}$ e

per $E_X > 14 \text{ MeV}$ essa risulta pari a $2,5 * 10^{12} \text{ min}^{-1}$,

quando si eroga al monitor un tasso di dose di $0,68 \text{ Gy/min}$, cioè con una corrente di $1 \mu\text{A}$ di elettroni sul bersaglio.

Si definisce sorgente di fotoni monoenergetici equivalente la sorgente di fotoni monoenergetici che produce lo stesso profilo di distribuzione, con la profondità, della dose in acqua rilasciata dal fascio fotonico di frenamento in interesse. Dalla ref 2 si trae che la sorgente di fotoni monoenergetici equivalente ha energia tra 3 e 3,5 volte minore dell'energia primaria degli elettroni destinati al frenamento. E' stato qui verificato, mediante la simulazione del caso in interesse, che il profilo di distribuzione della dose in acqua con la profondità di penetrazione è equivalente, per lo spettro di raggi X di fig.2, a quello di una sorgente monoenergetica di raggi X da 8 MeV .

Con un adeguato livello di approssimazione, l'equivalenza appena verificata attraverso il profilo di distribuzione della dose in acqua si dimostra essere valida anche per il CCO, data la coincidenza entro qualche punto percentuale dei relativi μ/ρ , coefficienti massici di attenuazione lineare, e B, "build-up factors". Estenderemo, con vantaggio per la sicurezza, detta equivalenza anche per il CCB.

4.2.2. Barriera Primaria (BP).

La BP viene identificata dalle strutture del bunker ove può dirigersi il fascio primario, oltrepassando il paziente. Considerata la possibilità di rotazione della testa dell'acceleratore e la massima apertura dei diaframmi, dal fascio primario verrà interessata una striscia di parete corrispondente ad una massima apertura angolare di $\pm 11,3$ gradi, ma la maggior parte delle volte inferiore a ± 10 gradi. La BP può essere articolata tra le due pareti verticali opposte, nel soffitto e nel pavimento. Il pavimento con ogni probabilità avrà il fattore d'uso maggiore, il soffitto il fattore d'uso minore. Essendo il pavimento sovrastante un terrapieno e non essendo il soffitto destinato alla protezione di locali immediatamente sovrastanti il bunker, la precisa determinazione dello scompensamento di fattori d'uso tra di loro non è importante. Vengono pertanto attribuiti i seguenti fattori d'uso per la BP:

alle due pareti verticali $1/4 + 1/4$, al pavimento $3/8$ ed al soffitto $1/8$.

La BP deve intercettare il fascio fotonico primario che oltrepassa il paziente ed attenuarlo fino a dare contributi alla dose esterna al bunker compatibili con l'obiettivo protezionistico complessivo di cui al par. 4.1.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

Differentemente dagli studi di fascio, spettro e dose all'interno del bunker (che sono ad alta statistica di eventi) il metodo di simulazione diviene molto oneroso per valutare l'efficacia di grosse barriere protettive (che trasmettono a valle una bassa statistica di eventi) e pertanto **per le valutazioni di efficacia delle BP (di spessore x) si sono preferiti calcoli macroscopici effettuati sui fotoni della sorgente monoenergetica equivalente e basati sui concetti di attenuazione esponenziale con coefficienti di attenuazione lineare massici μ/ρ in cm^2/g e densità areale $\rho*x$ in g/cm^2 , moltiplicata per "build-up" factors B , seguendo le formule e le tabulazioni dei dati della ref .3.**

Il coefficiente μ/ρ per il CCB (0,0311 cm^2/g a 8 MeV) è stato valutato attraverso le frazioni di peso ed i μ/ρ dei suoi elementi costitutivi riportati in ref.4, utilizzando come μ/ρ del Bario una piccola estrapolazione, in funzione del numero atomico, di quello dello Iodio.

I fattori di "build-up" B a 8 MeV per il CCB sono stati elaborati interpolando, in funzione del numero atomico medio, tra quelli del conglomerato cementizio ordinario (CCO) e quelli del Ferro, riportati in ref .3. Il numero atomico medio per il CCO ($\langle Z \rangle = 9,5$) e per il CCB ($\langle Z \rangle = 13,7$) sono stati valutati pesando i numeri atomici degli elementi che li costituiscono (ref. 4) con le frazioni parziali di atomi costituenti. Con buona approssimazione, nell'intervallo di valori di penetrazione ($\mu*x$) tra 5 e 15 o poco superiori, si può valutare per il CCB con fotoni da 8 MeV che: $B = 2,7 + 0,41 * ((\mu*x) - 5)$.

A valori di penetrazione più bassi di 5 i fattori B per il CCB possono essere considerati coincidenti con quelli tabulati per il CCO.

Per quanto riguarda le valutazioni di **efficacia di barriere protettive composte da materiali diversi a profondità diverse**, si è adottato il criterio di valutare gli effetti composti delle varie barriere distinte, in quanto tale semplice procedura fornisce risultati conservativi rispetto alla considerazione di una barriera globale, come si prova considerando una barriera omogenea come composta di vari pezzi distinti.

L'effetto di schermo del paziente sul fascio primario è stato trascurato, non essendo certo che la collimazione intercetterà il paziente in ogni distretto del campo irradiato.

4.2.3. Protezione degli operatori e della popolazione dal rischio residuo relativo al fascio primario.

La BP deve garantire la protezione dei gruppi critici della popolazione, qui identificati come i frequentatori della Sala Primario sullo stesso piano del bunker a 12 metri di distanza dal paziente irradiato (fattore di occupazione cautelativamente unitario) i frequentatori degli uffici e i degenti delle Sale di Degenza al piano superiore, rispettivamente a 8 ed a 21 metri di distanza dal paziente stesso (fattore di occupazione unitario). **La protezione degli operatori in sala comando dalle dosi residue relative al fascio primario viene**

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

ulteriormente garantita dall'essere la medesima sala per gran parte fuori dalla apertura angolare dei fasci terapeutici, e quindi solo marginalmente interessata agli effetti della loro propagazione nella BP. Volendo peraltro effettuare una valutazione conservativa delle dosi agli operatori si può attribuire agli stessi un **contributo pari al 100% delle dosi residue a ridosso della BP costituita dalla parete verticale.**

Con le premesse appena concluse e riferendosi al carico di lavoro fissato al par.1.2.3.

la BP costituita dalle pareti verticali viene valutata secondo 510 g/cm^2 di CCB (pari a $x = 170 \text{ cm}$ di spessore con densità $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$) più 115 g/cm^2 di CCO (pari a $x = 50 \text{ cm}$ di spessore con densità $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$).

Sulla base di tutto quanto premesso si ricavano:

per il CCB di 170 cm: penetrazione $\mu * x = 15,86$, "build-up factor" $B = 7,2$ ed un **fattore di attenuazione dell'intensità di dose pari a $9,3 * 10^{-7}$.**

per il CCO di 50 cm: penetrazione $\mu * x = 2,82$, "build-up factor" $B = 2,01$ ed un **fattore di attenuazione dell'intensità di dose pari a $1,2 * 10^{-1}$.**

L'alternativa di 13 cm di Ferro pieno (in sala comandi) per il CCO di 50 cm è caratterizzata da un fattore di attenuazione molto simile: $\mu * x = 3,02$, "build-up factor" $B = 2,29$ ed un **fattore di attenuazione dell'intensità di dose pari a $1,12 * 10^{-1}$.**

A ridosso della BP verticale composita pertanto ritroviamo

124 $\mu\text{Gy/anno}$.

Tale valore viene totalmente trasformato (vedi sopra) in dose equivalente agli operatori, pari a $124 \mu\text{Sv/anno}$, mentre in Sala Primario avremo meno di $32 \mu\text{Sv/anno}$, nell'ufficio a 8 metri dal paziente meno di $72 \mu\text{Sv/anno}$ e nella Sala Degenza a 21 metri circa $10 \mu\text{Sv/anno}$.

La frequenza delle aree esterne al bunker, a ridosso della BP verticale ha già di per sè natura occasionale, comportante fattori di occupazione per la popolazione molto minori di 1 con conseguente riduzione ivi della dose annua per le persone del pubblico a livelli di una decina di μSv per anno. **Non vi è ragione pertanto di vietare il passaggio di persone nei siti di cui si tratta, se si riesce solo a vietarne lo stazionamento per futili motivi.**

La BP costituita dal soffitto del bunker viene valutata secondo 480 g/cm^2 di CCB (pari a $x = 160 \text{ cm}$ di spessore con densità $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$)

Sulla base di tutto quanto premesso si ricavano:

per il CCB di 160 cm: penetrazione $\mu * x = 14,93$, "build-up factor" $B = 6,77$ ed un **fattore di attenuazione dell'intensità di dose pari a $2,2 * 10^{-6}$.**

Al centro del terrazzo del bunker, pertanto, alla quota degli organi riproduttivi di una persona in piedi ($4,2 \text{ m}$ dal paziente) ci si aspetta una dose di circa $2,5 \text{ mGy/anno}$. Spostandosi verso i lati del terrazzo, in una direzione si esce dalla BP entrando nella barriera secondaria e nella direzione ortogonale gli spessori di CCB

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

aumentano rispetto al minimo di 160 cm per effetto di attraversamento diagonale, raggiungendo una condizione di sicurezza non meno efficace di quella a valle della BP verticale composita (prima valutata).

Anticipando i risultati delle valutazioni di dose residua a valle della barriera secondaria (vedi par. 4.2.6), ognuna delle posizioni periferiche sul terrazzino è sufficientemente protetta per le persone del pubblico. Pur tuttavia **converrà vietare incondizionatamente l'accesso alle persone del pubblico a tutto il terrazzo**, condizione facilmente ottenibile atteso che l'accesso di cui si tratta non è agevole.

4.2.4. Caratteristiche del fascio secondario, della radiazione di fuga e di quella riflessa per fotoni di alta energia.

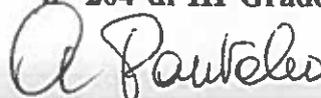
L'interazione del fascio primario con il paziente crea una diffusione di fotoni tutt'intorno al paziente stesso riveniente dagli urti Compton e dalla creazione di coppie elettrone-positrone con susseguente annichilazione del positrone e produzione di raggi gamma da 0,511 MeV. Tutti questi fotoni diffusi costituiscono il fascio secondario. Ad esso va aggiunta la **radiazione di fuga** dagli schermi della testa dell'acceleratore e la **radiazione riflessa (ALBEDO)** dalle strutture del bunker investite da flussi intensi di fotoni, principalmente dalla BP. La somma di queste tre sorgenti di fotoni crea un flusso fotonico secondario complessivo che va a interagire con tutte le strutture del bunker. Il **fenomeno dell'ALBEDO**, peraltro, è responsabile attraverso **riflessioni multiple**, della presenza di un flusso fotonico alle spalle della porta d'ingresso nel bunker, che pertanto necessita di essere strutturata come barriera contro il rischio da fotoni.

Considerata la complessità dei tre fenomeni, il **flusso fotonico secondario complessivo è stato studiato con calcoli di simulazione** analoghi a quelli già presentati al par. 4.2.1. e gli **spettri fotonici** che investono le varie strutture del bunker ne sono emersi così come appaiono dalle **figure 3** (ad angoli in avanti rispetto alla direzione del fascio primario) e **4** (ad angoli all'indietro), mentre lo spettro di fotoni ALBEDO che investe la porta è presentato nella **figura 5**.

Da una analisi degli **spettri fotonici** appena presentati emerge che l'**energia media** che li caratterizza è **sempre inferiore a 0,6 MeV**, scendendo a 0,13 MeV per lo spettro di fotoni di pura ALBEDO multipla. In ognuno di essi, inoltre, si **segnala la presenza di un picco monoenergetico a 0,511 MeV**, proveniente dall'annichilazione del positrone generato con la creazione di coppie elettrone-positrone. Le rese dosimetriche degli spettri a ridosso delle varie strutture, espressi in intensità di dose (Gy/min) connessa all'erogazione al monitor (vedi par. 4.1.1) di 4 Gy/min da parte del fascio primario, vanno da $2,35 \cdot 10^{-3}$ a $1,76 \cdot 10^{-4}$. La resa dosimetrica dello spettro di pura ALBEDO multipla è pari, nelle stesse condizioni, a circa 10^{-5} Gy/min.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



Le caratteristiche spettrali descritte sono congrue con la cinematica dell'urto Compton e della creazione di coppie ed anticipano, attraverso la bassa energia media, una semplicità di raggiungimento della protezione richiesta per i fotoni del fascio secondario.

4.2.5. Barriera Secondaria (BS).

La BS viene identificata dalle strutture del bunker ove non può dirigersi il fascio primario, ma solo quello secondario diffuso dal paziente, di fuga dalla testa dell'acceleratore e riflesso dalla varie strutture del bunker. **La BS deve intercettare il fascio fotonico secondario complessivo ed attenuarlo fino a dare contributi alla dose esterna al bunker compatibili con l'obiettivo protezionistico complessivo di cui al par. 4.1.**

Il fattore d'uso della barriera secondaria è ovviamente unitario, ma dipendendo la resa dosimetrica degli spettri del fascio fotonico secondario complessivo dalle direzioni rispetto al fascio primario, ogni componente ai vari angoli è stata fatta concorrere, per ciascuna articolazione della BS, con fattori di peso corrispondenti ai fattori d'uso del fascio primario. Con detta procedura **la resa media in intensità di dose del fascio fotonico secondario complessivo non supera in nessun distretto 1 mGy/min**, mentre alle spalle della porta non supera 0,01 mGy/min.

Anche per le valutazioni di efficacia delle BS (di spessore x) si sono preferiti calcoli macroscopici effettuati sui fotoni di una sorgente monoenergetica equivalente (conservativamente assunta di energia pari a 0,6 MeV) e basati sui concetti di attenuazione esponenziale con coefficienti di attenuazione lineare massici μ/ρ in cm^2/g e densità areale $\rho \cdot x$ in g/cm^2 , moltiplicata per "build-up" factors B , seguendo le formule e le tabulazioni dei dati della ref .3.

4.2.6. Protezione degli operatori e della popolazione dal rischio residuo relativo al fascio fotonico secondario complessivo.

Per semplicità si procede alla sola valutazione della dose residua dovuta al fascio fotonico secondario complessivo a valle di una barriera di CCO da 120 cm di spessore.

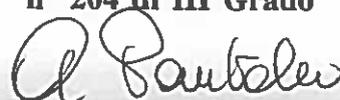
I coefficienti del calcolo macroscopico assumono a 0,6 MeV i seguenti valori: coefficiente di attenuazione lineare massico $\mu/\rho = 0,09 \text{ cm}^2/\text{g}$, densità areale $\rho \cdot x = 270 \text{ g}/\text{cm}^2$, penetrazione $\mu \cdot x = 24$, "build-up" factor $B = 200$.

Si ottiene un fattore di attenuazione della barriera pari a $7,6 \cdot 10^{-9}$ ed una intensità di dose attesa a valle inferiore a $7,6 \cdot 10^{-12} \text{ Gy}/\text{min}$, per una dose equivalente annua di $3,04 \cdot 10^{-7} \text{ Sv}/\text{anno}$, cioè $0,3 \text{ } \mu\text{Sv}/\text{anno}$, di nessun interesse protezionistico sia per gli operatori che per la popolazione.

Si può quindi concludere che tutte le articolazioni della BS in conglomerato cementizio trasmettono a valle un residuo di dose dovuta a fotoni che può essere considerato nullo per i fini della radioprotezione. La necessità di

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



una BS di una certa consistenza persiste a causa del rischio da neutroni che si esamina nei paragrafi successivi.

Per la valutazione della **porta d'ingresso come BS fotonica**, trascurando per semplicità l'attenuazione in polietilene e considerando solo quella in 1 cm di Piombo di uno spettro fotonico di energia media pari a 0,13 MeV si ottiene (grafici di penetrazione dei raggi X in piombo, ref.3, una attenuazione di oltre 10^{-6} , per una **dose equivalente residua annua inferiore a 0,4 μSv , di nessun interesse protezionistico**. Anche la struttura della porta, perciò, viene determinata principalmente dalle necessità della barriera neutronica.

4.3. Rischio da neutroni.

4.3.1. Caratteristiche della sorgente neutronica secondaria.

I neutroni vengono generati nell'interazione dei raggi X, o gamma, di alta energia, nella regione energetica cosiddetta della risonanza gigante di dipolo elettrico (intorno ai 15 MeV), con i materiali (meglio se ad elevato numero atomico) che incontrano sul loro cammino, segnatamente lo spessore residuo del bersaglio di tungsteno (W), il "flattener" in acciaio (principalmente Fe), i collimatori e la schermatura della testa dell'acceleratore (piombo e tungsteno, approssimati tutti con W), infine con il fantoccio rappresentante il paziente (15 cm di acqua). Differentemente rispetto a quanto si riporta sotto il paragrafo 5.2. che segue, per la produzione dei neutroni interessano tutte le reazioni analoghe sui vari isotopi dell'elemento chimico in interesse, anche quelle che conducono ad un prodotto di reazione non radioattivo:

- | | | | |
|--|--------------------|-----------------------------|----------------|
| 1) ${}^A\text{W} (\gamma, n) {}^{A+1}\text{W}$ | Ris. Gig. Dip. El. | $\sigma_M = 400 \text{ mb}$ | (refs.5 e 6) |
| 2) ${}^A\text{Fe} (\gamma, n) {}^{A+1}\text{Fe}$ | Ris. Gig. Dip. El. | $\sigma_M = 75 \text{ mb}$ | |
| 3) ${}^{16}\text{O} (\gamma, n) {}^{15}\text{O}$ | Ris. Gig. Dip. El. | $\sigma_M = 10 \text{ mb}$ | (per l'acqua), |

dove A sta per ogni particolare numero di massa degli isotopi in interesse, e σ_M è la sezione d'urto massima per la reazione.

Gli spessori di materiali attraversati sono stati presi a base della valutazione come 4 mm in media per il bersaglio, 6,5 cm in media per il flattener, 10 cm in media per la schermatura.

Per la valutazione in interesse si deve tenere presente (vedi par. 4.2.1.) che la fluensa totale dello spettro dei raggi X prodotti dalla macchina nella regione della risonanza gigante di dipolo elettrico dei nuclei ha una intensità nel monitor, di $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ posto a 100 cm di distanza dal target, pari a $2,5 \times 10^{12} \text{ min}^{-1}$ per $E_X > 14 \text{ MeV}$ (reazioni su Fe ed O) e pari a $5 \times 10^{12} \text{ min}^{-1}$ per $10 \text{ MeV} < E_X < 20 \text{ MeV}$ (reazioni su W), quando si eroga un tasso di dose di 0,68 Gy/min. Si deve inoltre considerare la distribuzione angolare dei raggi X di alta energia, che ne concentra il 18% ad angoli al di sotto dei 5° , il 42% ad angoli tra 5° e 15° ed il rimanente 40% ad angoli al di sopra dei 15° , e l'apertura dei diaframmi qui ipotizzata a $(35 \times 35) \text{ cm}^2$.

Tutto ciò premesso si valutano i seguenti contributi per la sorgente di neutroni secondari:

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

dal bersaglio di W:	$0,8 \cdot 10^{10}$ n/sec;
dal "flattener":	$4,3 \cdot 10^{10}$ n/sec;
dal fantoccio paziente:	$0,6 \cdot 10^{10}$ n/sec;
dalla schermatura della testa dell'acceleratore circa	$1,0 \cdot 10^{11}$ n/sec.

I primi due contributi sono quelli di rilievo per la determinazione della dose neutronica all'isocentro, e pertanto le valutazioni effettuate vanno in buon accordo con la specifica di limite di dose neutronica all'isocentro riportata al paragrafo 1.2.2.

Per tutti gli scopi protezionistici della presente relazione la sorgente neutronica viene allora assunta di intensità pari a $1,6 \cdot 10^{11}$ n/sec, isotropica in tutto lo spazio e centrata all'interno della testa dell'acceleratore (viene trascurato il contributo emergente dal paziente pari a meno del 4%).

La sua distribuzione energetica è assunta gaussiana, di media 1,5 MeV e deviazione standard di 0,75 MeV. Detta distribuzione approssima bene quella sperimentale riportata nella ref.7.

4.3.2. Neutroni interagenti con le strutture del bunker.

Una frazione dell'ordine dell'1% dei neutroni generati all'interno della testa dell'acceleratore può raggiungere la barriera primaria attraverso l'apertura dei diaframmi. **Tutti gli altri neutroni attraversano le strutture schermanti della testa dell'acceleratore venendo principalmente diffusi, con variazione di direzione e di energia.**

L'interazione appena citata (con materiali ad elevato numero atomico), quando seguita da uno schema ulteriore di materiali idrogenati (ad esempio le pareti del bunker), contribuisce alla rimozione dei neutroni determinata dal complesso delle barriere **con una sezione d'urto di rimozione pari a circa 3 barn (ref.4), che per il caso qui in interesse si traduce in una diminuzione di un ordine di grandezza della dose residua.**

Questo effetto va tenuto in seria considerazione nella valutazione dell'efficacia schermante delle barriere di conglomerato cementizio ai neutroni.

Un ulteriore fenomeno che contribuisce a variare lo spettro dei neutroni incidenti sulle strutture del bunker è la **riflessione dei neutroni (ALBEDO)** da parte delle altre superfici investite. Questo effetto non solo influenza lo spettro neutronico incidente sulle pareti e sul soffitto del bunker, ma **determina la presenza di uno spettro neutronico significativo alle spalle della porta d'ingresso del bunker, che pertanto va configurata anche e principalmente come barriera neutronica.**

Allo scopo di studiare gli spettri neutronici in interesse, una sorgente neutronica come quella descritta in calce al par.4.2.1. è stata simulata mediante un codice di calcolo di simulazione basato su MICAP (ref.8) e GEANT3 (ref.1), registrando gli spettri dei neutroni incidenti sulle pareti nelle varie situazioni operative. Ne emergono alcuni interessanti risultati, che vengono qui di seguito elencati:

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

a) tutti gli spettri hanno una **forma** fortemente decrescente all'aumentare dell'energia, simile a quella che si vede **nella figura 6**.

b) la loro **energia media** può essere così schematizzata: in generale circa 0,2 MeV, salvo quello sulla barriera primaria in esercizio (0,4 MeV, a causa del contributo dei neutroni fuoriuscenti dai diaframmi) e quello alle spalle della porta d'ingresso nel bunker (0,1 MeV);

c) il loro **contenuto integrale** è maggiore (a causa delle riflessioni multiple) di quanto attendibile da pure considerazioni di angolo solido sotteso alla sorgente, bensì ancora sufficientemente legato all'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente; lo spettro di pura ALBEDO alle spalle della porta d'ingresso del bunker contiene un numero di neutroni pari allo 0,33 % dei neutroni emessi dalla sorgente.

4.3.3. Protezione degli operatori e della popolazione dal rischio residuo relativo ai neutroni secondari.

Con la sola esclusione della barriera rappresentata dalla porta d'ingresso al bunker, la **valutazione delle barriere neutroniche in conglomerato cementizio (CC)** può essere effettuata alternativamente nei **due modi** seguenti, in **entrambi i quali** è di scarsa importanza distinguere il trattamento del CCB da quello del CCO (a motivo della elevatissima efficacia protettiva) e pertanto **i manufatti in CC verranno considerati solo per il loro spessore**, ma non per la differente densità e composizione:

a) la sorgente neutronica supposta libera (cioè non schermata dalla testa dell'acceleratore) e con la sua distribuzione energetica originale viene ipotizzata irradiare semplicemente le strutture del bunker, attraverso cui la resa dosimetrica del fascio neutronico viene propagata in diminuzione esponenziale, con lunghezza di rilassamento pari a 15,7 cm e fattore di "build-up" unitario (ref.3). Successivamente il risultato viene corretto per gli effetti della sezione d'urto di rimozione dei materiali di schermo contenuti nella testa dell'acceleratore e per gli effetti dei neutroni aggiunti dalle riflessioni (coefficiente di singola riflessione pari circa al 15%);

b) la resa dosimetrica corrispondente agli spettri neutronici specifici, come valutata dai calcoli di simulazione, viene propagata in diminuzione esponenziale entro le strutture del bunker con lunghezze di rilassamento pari a 11,5 cm a 0,4 MeV e pari a 10,5 cm a 0,2 MeV (e fattori di "build-up" unitari). I valori delle lunghezze di rilassamento alle varie energie sono stati ricavati estrapolando bilogaritmicamente con l'energia i dati per neutroni veloci riportati in ref.3.

I risultati dei due approcci sono congruenti, nè ognuno può essere ritenuto più attendibile dell'altro. Pertanto, ponendo uguali a zero i valori tanto modesti da non avere alcun rilievo protezionistico e arrotondano conservativamente i risultati significativi, **si ottiene la seguente distinta per la dose annua residua dovuta ai neutroni, a valle delle strutture del bunker:**

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

Corridoio di fuga antincendio : nella parte più esterna dietro la BP, zero μSv ; nella parte più interna, dietro la BS, 200 μSv . Stessa articolazione per il proseguimento, all'esterno del corridoio, dello stesso lato del bunker.

Proseguendo all'esterno sul lato ortogonale che si affaccia al panorama: 200 μSv ; zero μSv (al centro della parete, dove all'interno corrisponde il "dente" in CCO); 200 μSv .

Proseguendo ancora all'esterno a sinistra verso la sala comando: fino al rinforzo della BP, 200 μSv ; alle spalle del CCB, rinforzato o meno, zero μSv , compresa la Sala Comandi.

Sul lato esterno del bunker parallelo al corridoio d'ingresso, fino al punto al quale corrisponde il doppio schermo del corridoio: zero μSv ; più avanti: 100 μSv .

Sul terrazzo del bunker: zero μSv dietro la BP e 100 μSv dietro la BS.

4.3.4. Neutroni sulla porta e rischio residuo all'esterno.

La dose residua dovuta ai neutroni nei locali prospicienti la porta d'ingresso nel bunker dipende dall'efficacia schermante della porta stessa e del suo sopralucente, costituiti da 20 cm di Polietilene rinforzato, verso l'esterno del bunker, da 1 cm di Piombo.

Il trattamento di detta efficacia schermante e la conseguente valutazione della dose residua dovuta ai neutroni segue queste linee:

lo spettro neutronico di pura ALBEDO alle spalle della porta ha una energia media pari a 0,1 MeV, come si ricava dal paragrafo precedente. A tale energia, ed ancor di più a quelle più basse verso le quali lo spettro evolve penetrando nella porta stessa, la sezione d'urto per diffusione elastica di neutroni su H e C, costituenti il Polietilene (CH_2), è molto elevata, crescendo da circa 0,5 barn verso i 16 barn. Penetrando nel polietilene, pertanto, i neutroni subiranno tutti molteplici diffusioni elastiche, con variazione di direzione e progressiva perdita di energia, fino a scendere ad energie "termiche" (0,025 eV, o poco più) alle quali il loro destino è di essere catturati da un nucleo di H, con conseguente emissione di un raggio gamma di energia pari a 2,2 MeV .

Pertanto l'effetto dello spessore in Polietilene sarà alla fine quello di aver sostituito ad ogni neutrone un raggio gamma da 2,2 MeV. Questi ultimi interagiscono con lo stesso polietilene, principalmente per urto Compton, venendo a loro volta degradati in energia. I raggi gamma di minore energia emergenti dagli urti Compton, qualora diretti verso l'esterno del bunker, trovano una efficacissima barriera assorbente nel Piombo da 1 cm di spessore, che li elimina quasi completamente. Potremo perciò trattare l'autoassorbimento dei raggi gamma da 2,2 MeV nel CH_2 , mutuando i coefficienti di attenuazione lineare massici da quelli dell'acqua (ref.3) a cui sono molto simili, senza impiegare i "build-up factors" a causa dell'assorbimento nel Piombo dei fotoni degradati negli urti Compton. In queste premesse si valuta che almeno il 60% del flusso gamma (in direzione perpendicolare alla porta) viene

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

autoassorbito in CH_2 , mentre almeno un altro 20% del flusso residuo che non ha interagito nel polietilene non passa la barriera di piombo.

Al flusso dei raggi gamma indeflessi emergenti dalla porta viene attribuito una resa dosimetrica di 10^{-11} Sv cm^2 , corrispondente alla loro energia, da cui derivano le **seguenti dosi annue al centro dei locali limitrofi sullo stesso piano**, considerando spessori realistici dei materiali costituenti la porta nelle direzioni in interesse ed in assenza di altri schermi:

Disimpegno anteriore: a 2,5 m dalla porta 3,4 mSv;

Stanza Tecnici: a 7,5 m dalla porta 0,57 mSv;

Stanza Infermieri (esiste parziale schermo di una colonna in CC, non inclusa nella valutazione): a 8 m dalla porta 0,3 mSv;

Filtro e Spogliatoi adiacenti: a 5-6 m dalla porta circa 0,1 mSv;

Sala Primario: a 12 m dalla porta 0,2 mSv.

La Sala Comandi, in virtù della parete in CCB, non è praticamente interessata a queste dosi. Considerando qualunque ragionevole fattore di occupazione per la stanza tecnici e la stanza infermieri, nonché prescrivendo che sia normalmente non frequentato il disimpegno anteriore durante i trattamenti ad alta energia, **la stima di dose agli operatori per la frequenza del reparto nel suo complesso non supera 0,2 mSv.**

I locali al piano superiore sono, in gran parte, fortemente schermati contro queste dosi dal soffitto del disimpegno verso l'ingresso del bunker (circa 50 cm di CCO). Volendo proprio trovare alcune direzioni meno schermate di penetrazione della radiazione appena analizzata **verso il piano superiore**, solo la parte bassa della porta potrebbe contribuire all'irraggiamento che, **nell'ufficio più prossimo (a 8 m)**, produrrebbe dosi annue minori di 0,1 mSv.

5. Attivazione dei materiali.

I materiali investiti da elevati flussi di raggi X, o gamma, di alta energia e di neutroni (secondari) di energie adeguate possono dare luogo a reazioni di vario tipo con formazione di nuclei radioattivi il cui ritardato decadimento provoca un rischio residuo da radiazioni dopo lo spegnimento della macchina.

I materiali irradiati da neutroni, che vanno considerati per la valutazione di tali rischi, sono quelli costituenti i dettagli della testa dell'acceleratore e l'aria. I materiali costituenti le barriere protettive primarie e lo stesso paziente partecipano ai fenomeni descritti, ma per probabilità, soglia delle reazioni ed autoschermo del decadimento non costituiscono sorgenti di attivazione degne di attenzione.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

Le reazioni (γ, n) avvenenti sui nuclidi costituenti l'aria, mentre costituiscono una sorgente neutronica di intensità significativamente minore e quindi trascurabile (vedi par. 3.1.1.) rispetto a quella localizzata nei materiali costituenti la testa dell'acceleratore, contribuiscono all'attivazione dell'aria, per il caso degli acceleratori lineari terapeutici, meglio delle reazioni indotte dai neutroni.

5.1. Attivazione dell'aria.

5.1.1. Attivazione dell'aria indotta dai neutroni.

La valutazione della radioattivazione dell'aria indotta da neutroni si semplifica per il caso che qui interessa, in quanto lo spettro neutronico generato dalle fotoreazioni nell'intervallo energetico della risonanza gigante di dipolo elettrico dei nuclei (in prossimità di un'energia di fotoni di 15 MeV) ha una energia media di 1,5 MeV ed una distribuzione che presenta solo una piccola percentuale del flusso con energia superiore a 2,6 MeV e praticamente nessun flusso con energia superiore a 6 MeV (vedi par. 4.3.1.). In dette circostanze le reazioni indotte dai neutroni sui nuclei costituenti l'aria, in gran parte non vengono innescate per motivi di soglia, come risulta evidente dal dettaglio che segue:

1)	$^{14}\text{N} (n, 2n) ^{13}\text{N}$	Soglia	11,3 MeV	$T_{1/2} = 9,96 \text{ min}$	$\sigma = 10 \text{ mb}$
2)	$^{16}\text{O} (n, 2n) ^{15}\text{O}$	Soglia	16,6 MeV	$T_{1/2} = 2,03 \text{ min}$	$\sigma = 4 \text{ mb}$
3)	$^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$	Soglia	10,2 MeV	$T_{1/2} = 7,13 \text{ sec}$	$\sigma = 40 \text{ mb}$
4)	$^{40}\text{Ar} (n, \alpha) ^{37}\text{S}$	Soglia	2,6 MeV	$T_{1/2} = 5,00 \text{ min}$	$\sigma = 10 \text{ mb}$
5)	$^{40}\text{Ar} (n, p) ^{40}\text{Cl}$	Soglia	6,9 MeV	$T_{1/2} = 1,35 \text{ min}$	$\sigma = 16 \text{ mb}$
6)	$^{40}\text{Ar} (n_{\text{th}}, \gamma) ^{41}\text{Ar}$	con neutroni termici		$T_{1/2} = 1,83 \text{ ore}$	$\sigma = 630 \text{ mb}$

Si devono valutare pertanto solo i casi 4) e 6) non proibiti per soglia, riguardanti l'Argon, gas nobile che costituisce lo 0,93% del volume dell'aria. L'interesse protezionistico per altre reazioni, anche a bassa soglia come la $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$, è nullo poichè l'attività a saturazione è molto più bassa di quelle di seguito tabulate.

Le valutazioni sono state effettuate seguendo i metodi di Birattari et al., ref.9. La fluensa totale di neutroni veloci di energia superiore a 2,6 MeV è stata assunta avere intensità pari a $1,6 \cdot 10^{10}$ n/sec. Il flusso dei neutroni termalizzati a partire dalla sorgente di neutroni veloci di cui al par. 1.2.4. è stato valutato in proporzione diretta all'intensità della sorgente di neutroni veloci ed inversa all'estensione della superficie totale interna del bunker, secondo le indicazioni di Moyer, ref.10.

Il numero di ricambi d'aria all'ora dell'impianto di ventilazione è stato assunto pari a 10.

Con dette premesse si valutano: a_s , la concentrazione di attività a saturazione nel bunker ed A , l'attività scaricata (a saturazione) nell'ambiente in un'ora attraverso l'aria espulsa dall'impianto di ventilazione:

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

per ^{41}Ar : $a_s < 370 \text{ Bq/m}^3$ ($< 10^{-8} \mu\text{Ci/cm}^3$); $A < 0,74 \text{ MBq/h}$ ($< 20 \mu\text{Ci/h}$)
 per ^{37}S : $a_s < 22,2 \text{ Bq/m}^3$ ($< 6 \cdot 10^{-10} \mu\text{Ci/cm}^3$); $A < 4,44 \text{ kBq/h}$ ($< 1,2 \mu\text{Ci/h}$)

5.1.2. Attivazione dell'aria indotta dai raggi X.

La valutazione della radioattivazione dell'aria indotta dai raggi X inerisce la produzione di ^{13}N e ^{15}O attraverso le seguenti reazioni (γ, n) sull'azoto e sull'ossigeno:

$^{14}\text{N} (\gamma, n) ^{13}\text{N}$ e $^{16}\text{O} (\gamma, n) ^{15}\text{O}$, con energia dei fotoni maggiore di 14 MeV, sezione d'urto di circa 10 mb per ognuna, periodo di dimezzamento dei radionuclidi prodotti tabulato al paragrafo precedente.

Per la valutazione in interesse si deve richiamare dal paragrafo 4.2.1. che la fluenza totale dello spettro dei raggi X prodotti dalla macchina nella regione della risonanza gigante di dipolo elettrico dei nuclei ha una intensità nel monitor di $(10 \cdot 10) \text{ cm}^2$ posto a 100 cm di distanza dal target, pari a $2,5 \cdot 10^{12} \text{ min}^{-1}$ per $E_X > 14 \text{ MeV}$ (reazioni su N ed O), quando si eroga un tasso di dose di 0,68 Gy/min. Si deve inoltre considerare la distribuzione angolare dei fotoni di alta energia prodotti dall'acceleratore (il 18% sotto i 5° , il 42% tra 5° e 15° ed il 40% sopra i 15° , vedi par. 4.2.1) e l'apertura dei diaframmi pari a $(35 \cdot 35) \text{ cm}^2$. Il numero di ricambi d'aria all'ora dell'impianto di condizionamento resta assunto pari a 10. Composizione e densità dell'aria sono in condizioni standard di temperatura e pressione.

Con dette premesse si valutano: a_s , la concentrazione di attività a saturazione nel bunker ed A, l'attività scaricata (a saturazione) nell'ambiente in un'ora attraverso l'aria espulsa dall'impianto di condizionamento:

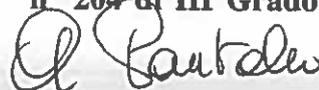
per ^{13}N : $a_s < 178 \text{ kBq/m}^3$ ($< 4,8 \cdot 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3$); $A < 356 \text{ MBq/h}$ ($< 9,6 \text{ mCi/h}$)
 per ^{15}O : $a_s < 107 \text{ kBq/m}^3$ ($< 2,9 \cdot 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3$); $A < 215 \text{ MBq/h}$ ($< 5,8 \text{ mCi/h}$)

5.1.3. Valutazione della dose al paziente dovuta alla presenza di radioattività aeriforme all'interno del bunker.

Per quanto possa essere potente l'impianto di ventilazione ed elevato il numero di ricambi di aria all'interno del bunker, il paziente sarà sempre sottoposto, durante gli irraggiamenti ad alta energia, anche al rischio relativo ad un'atmosfera lievemente contaminata da radioattività areiforme, caratterizzata da una concentrazione media di attività durante il trattamento mediamente minore della concentrazione di attività a saturazione a_s . Anche assumendo che durante il trattamento sia presente sempre una concentrazione di attività pari ad a_s , prendendo in considerazione un fattore di conversione in dose come quello riportato al paragrafo seguente, la dose equivalente aggiuntiva a cui il paziente è sottoposto non supera i $10 \mu\text{Sv}$ per trattamento che è del tutto trascurabile rispetto alle dosi erogate per scopo terapeutico. La valutazione che precede tiene conto di 10 ricambi d'aria per ora e della pericolosità dei radionuclidi come specificata nei paragrafi che seguono.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
 Esperto Qualificato
 n° 204 di III Grado



5.1.4. Valutazione della dose agli operatori dovuta alla presenza di radioattività aeriforme residua all'interno del bunker.

Al termine del primo trattamento ad alta energia di fotoni (ipotizzato durare 10 min), all'interno del bunker si troveranno le seguenti concentrazioni effettive di attività aeriforme per i quattro radionuclidi in interesse:

per ^{13}N :	a < 161	kBq/m^3	(< $4,3 \cdot 10^{-6}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{15}O :	a < 106	kBq/m^3	(< $2,9 \cdot 10^{-6}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{41}Ar :	a < 304	Bq/m^3	(< $8,2 \cdot 10^{-9}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{37}S :	a < 21	Bq/m^3	(< $5,7 \cdot 10^{-11}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$).

Gli operatori rientrano nel bunker per avvicinare i pazienti, dopo un tempo di attesa inteso a ridurre le loro condizioni di rischio, frequentando un ambiente che ancora non è completamente evacuato dalla radioattività aeriforme generata durante l'irraggiamento, nonostante continui ad operare l'impianto di ventilazione a 10 ricambi d'aria all'ora. Se il tempo di attesa viene fissato in 5 minuti, al loro ingresso nel bunker gli operatori trovano le concentrazioni di attività aeriforme elencate nella seguente tabella:

per ^{13}N :	a < 49,4	kBq/m^3	(< $1,3 \cdot 10^{-6}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{15}O :	a < 8,4	kBq/m^3	(< $2,3 \cdot 10^{-7}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{41}Ar :	a < 128	Bq/m^3	(< $3,5 \cdot 10^{-9}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{37}S :	a < 4,6	Bq/m^3	(< $1,2 \cdot 10^{-10}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$).

Se le operazioni di sistemazione di un altro paziente durano 10 minuti, all'uscita dal bunker gli operatori lasciano le concentrazioni di attività aeriforme elencate nella seguente tabella:

per ^{13}N :	a < 4,65	kBq/m^3	(< $1,3 \cdot 10^{-7}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{15}O :	a < 0,05	kBq/m^3	(< $1,4 \cdot 10^{-9}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{41}Ar :	a < 22,7	Bq/m^3	(< $6,1 \cdot 10^{-10}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$);
per ^{37}S :	a < 0,4	Bq/m^3	(< $1,15 \cdot 10^{-11}$	$\mu\text{Ci/cm}^3$).

Nelle condizioni appena esaminate, gli operatori hanno soggiornato 10 minuti in un ambiente caratterizzato da una contaminazione aerea media complessiva di 20 kBq/m^3 . Attribuendo a tutta la miscela di radionuclidi il fattore di conversione in dose (per sommersione, ref.11) pari a $1,43 \cdot 10^{-4} \mu\text{Sv}/(\text{Bq/m}^3)/\text{h}$ ed assommando per gli operatori i periodi citati fino a 600 ore annue, si valuta per i medesimi una dose di 1,77 mSv/anno.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

5.1.5. Valutazione della dose alla popolazione dovuta agli scarichi di radioattività aeriforme generata all'interno del bunker.

A seguito delle valutazioni precedentemente effettuate si può procedere a dare una stima della dose alla popolazione dovuta agli scarichi di radioattività aeriforme generata all'interno del bunker.

Il problema è complesso, ma si può procedere ad una stima largamente conservativa seguendo il metodo della ref. 9.

Il carico di lavoro ipotizzato è quello di 667 ore annue di esercizio dell'acceleratore con fotoni da 25 MV con una intensità di dose di 4 Gy/min erogata al paziente, così come alla base delle valutazioni effettuate nei paragrafi che precedono. Continuando ad ipotizzare che i trattamenti terapeutici ad alta energia durino in media solo dieci minuti l'uno e sono seguiti da intervalli di attesa e gestione pazienti non inferiori a 15 minuti ciascuno, le concentrazioni di attività medie a_m all'interno del bunker per i vari radionuclidi in interesse durante l'erogazione del fascio (ON) e durante il suo spegnimento (OFF) sono calcolate essere:

FASE ON

per ^{13}N : $a_m < 68,1 \text{ kBq/m}^3$ ($< 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{15}O : $a_m < 20 \text{ kBq/m}^3$ ($< 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{41}Ar : $a_m < 176 \text{ Bq/m}^3$ ($< 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{37}S : $a_m < 6,9 \text{ Bq/m}^3$ ($< 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

e

FASE OFF

per ^{13}N : $a_m < 44,1 \text{ kBq/m}^3$ ($< 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{15}O : $a_m < 14 \text{ kBq/m}^3$ ($< 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{41}Ar : $a_m < 108 \text{ Bq/m}^3$ ($< 2,9 \cdot 10^{-9} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$);

per ^{37}S : $a_m < 4,6 \text{ Bq/m}^3$ ($< 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3$).

I valori sopra tabulati possono essere utilizzati per la valutazione dell'attività totale massima di radionuclidi aeriformi scaricata annualmente nell'ambiente esterno al bunker, tenendo presente il carico di lavoro. Si ricavano così i seguenti valori massimi annui,

nell'ordine per ^{13}N , ^{15}O , ^{41}Ar e ^{37}S :

179,1;	54,7;	0,45;	0,0018	GBq/anno
(4,8;	1,5;	0,012;	0,0005	Ci/anno)

che con eccesso di cautela potremmo riferire interamente al nuclide guida ^{13}N , ottenendo un suo massimo scarico annuo di 234,3 GBq/anno (6,3 Ci/anno).

In dette ipotesi la dose alla popolazione a 100 m dal punto di scarico sarebbe di 0,86 $\mu\text{Sv/anno}$. All'interno del modello adottato per la diffusione dei radionuclidi nell'ambiente, seguendo la ref.9, tra i valori di dose alla popolazione in funzione della distanza

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

dal punto di scarico non intercorre con precisione la proporzione all'inverso del quadrato della distanza. Tuttavia, con buon livello di approssimazione, possiamo utilizzare la proporzione appena citata per valutare la dose alla popolazione a 10 m dal punto di scarico (distanza dagli uffici vicini per un camino sul terrazzo del bunker) in 86 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$. Detta stima è valida nell'ipotesi che il "pennacchio" del camino di espulsione dell'aria copra i luoghi frequentati dalla popolazione alle distanze citate. Se ciò non avvenisse, la stima di dose alla popolazione sarebbe prossima a zero. Allo scopo di andare incontro alla ottimizzazione appena descritta, viene prescritto che il camino di espulsione dell'aria dal bunker venga innalzato oltre la "veletta" in cemento del terrazzo del bunker, sul lato opposto all'ingresso.

Le stime di dose appena citate restano alla base della autorizzabilità degli scarichi radioattivi aeriformi massimali di cui si tratta, che sono al di sopra dei limiti di esenzione dall'autorizzazione di cui all'art. 105, comma 1), lettera a), DPR 185/64, così come riportati all'art. 6 del D.M. 14/07/70.

5.2. Attivazione di altri materiali.

L'attivazione di altri materiali riguarda principalmente il bersaglio per la produzione di fotoni (Tungsteno), il "flattener" della dose fotonica (principalmente Ferro), diaframmi e schermi della testa dell'acceleratore (Tungsteno e Piombo, approssimati col solo Tungsteno). I sottili fogliolini costituenti diffusori e flatteners del fascio di elettroni, nel funzionamento ad elettroni, non sono stati considerati esplicitamente in quanto producono effetti abbondantemente entro le approssimazioni delle valutazioni che seguono.

Le reazioni che interessano sono quelle che producono nuclei radioattivi di breve vita media, in quanto l'attività a saturazione degli stessi viene raggiunta con buona frazione nei brevi tempi degli irraggiamenti terapeutici. Le distingueremo in reazioni indotte da fotoni e reazioni indotte da neutroni.

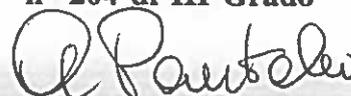
5.2.1. Attivazione dei materiali indotta dai neutroni.

Delle reazioni indotte da neutroni su isotopi del Ferro, considerato lo spettro neutronico qui in interesse (vedi par. 5.1.1.), nessuna produce radioattività residua degna di considerazione, sia per soglia elevata che per basso tasso di reazioni o per curva di attivazione depressa da vita media troppo lunga. Le stesse motivazioni (con in più la vita media troppo breve, 5 sec, per il ^{183}W formato mediante reazione (n,γ) su ^{182}W) escludono molte reazioni indotte da neutroni (sia veloci che termalizzati) su Tungsteno. Vengono prese in considerazione solo le seguenti reazioni:

1) ^{184}W (n, γ) $^{185}\text{W}^*$	Su tutto lo spettro	$T_{1/2} = 1,67$ min	$\sigma_m = 70$ mb
2) ^{186}W (n, γ) ^{187}W	Su tutto lo spettro	$T_{1/2} = 23,9$ ore	$\sigma_m = 70$ mb

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



Le frazioni isotopiche del ^{184}W e del ^{186}W sono entrambe prossime al 30%. A parità di sezione d'urto, pertanto, nei pochi minuti degli irraggiamenti terapeutici la seconda reazione produrrà una quantità di radioattività trascurabile rispetto alla prima, che a sua volta produce tra bersaglio e diaframmi attività a saturazione di qualche decina di mCi, in grado di erogare ad un metro di distanza e senza schermi una intensità di dose equivalente di solo qualche $\mu\text{Sv/h}$. Considerata inoltre la forte capacità di autoschermo del Tungsteno, tutta la radioattività citata produrrà trascurabili effetti esterni alla testa dell'acceleratore.

5.2.2. Attivazione dei materiali indotta dai raggi X.

Delle reazioni indotte da raggi X e gamma, quella che produce su isotopi del Ferro la radioattività residua caratterizzata da maggior rischio è la seguente (frazione isotopica 5,8%):

1) $^{54}\text{Fe} (\gamma, n) ^{53}\text{Fe}$ Ris. Gig. Dip. El. $T_{1/2} = 2,5-8,5 \text{ min}$ $\sigma_M = 67 \text{ mb}$

mentre l'unica che produce su isotopi del Tungsteno una qualche radioattività residua da potersi considerare è la seguente (frazione isotopica 28,6%):

2) $^{186}\text{W} (\gamma, n) ^{185}\text{W}^*$ Ris. Gig. Dip. El. $T_{1/2} = 1,67 \text{ min}$ $\sigma_M = 400 \text{ mb}$

La grande differenza tra le costanti di emissione specifica delle due sorgenti radioattive prodotte, fa divenire il contributo al rischio da radiazioni emergente dalla seconda una piccola approssimazione di quello relativo alla prima che pertanto rimane l'unica a determinare, nella sostanza, il rischio da radioattivazione dei materiali all'interno del bunker.

La schermatura della testa dell'acceleratore fa in modo che l'unica direzione a rischio sia quella del fascio terapeutico, mentre la sorgente si trova localizzata nel "flattener". Se si considerasse raggiunta l'attività a saturazione della sorgente di ^{53}Fe allora l'intensità di dose equivalente ad un metro dal "flattener", considerando assenti l'effetto di autoschermo del flattener stesso ed il decadimento radioattivo, verrebbe valutata al massimo in circa 1 mSv/h. In realtà, continuando ad ipotizzare che gli irraggiamenti terapeutici durino in media solo dieci minuti e siano seguiti da almeno 15 minuti di attesa e gestione pazienti, i due livelli del ^{53}Fe raggiungeranno solo attività massime rispettivamente pari al 93,7 % (quello con $T_{1/2} = 2,5 \text{ min}$) e pari al 55,6 % (quello con $T_{1/2} = 8,5 \text{ min}$) dell'attività a saturazione.

Includendo nella valutazione le percentuali qui sopra appena esplicitate, i cinque minuti di attesa prescritta all'operatore che entra nel bunker (per il decadimento radioattivo) ed una ragionevole stima della frazione autoschermata (in rapporto all'energia delle radiazioni emesse) l'intensità di dose equivalente sopra valutata dovrebbe scendere al di sotto dei 200 $\mu\text{Sv/h}$. Detto rischio riguarda principalmente le mani (sistemazione del paziente) e nel corso dei minuti di operazioni nel bunker diminuisce ulteriormente.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

A. Pantaleo

5.2.3. Valutazione della dose al paziente dovuta alla presenza di attivazione dei materiali della testa dell'acceleratore.

Il paziente si espone al campo della radiazione residua dei materiali attivati sia nella fase di preparazione dell'irraggiamento che lo riguarda, che nella fase di esecuzione dello stesso, sempre che l'acceleratore provenga da un esercizio ad elevata energia. La dose extra che questo campo di radiazione residua eroga al paziente dipende dal dettaglio degli irraggiamenti precedenti, dal tempo di preparazione, dall'eventualità che anche l'irraggiamento che lo riguardi sia ad elevata energia e da quale questa energia sia. Il caso più consistente è quello che l'acceleratore sia stato a lungo operato, precedentemente, a 25 MeV e che il suo stesso trattamento avvenga a 25 MeV. Nell'ipotesi che preparazione ed irraggiamento durino entrambi 10 minuti, si stima allora per il paziente un extra contributo alla dose terapeutica di qualche decina di μSv per trattamento, ampiamente entro i limiti di precisione della dose da somministrare per terapia.

5.2.4. Valutazione della dose agli operatori dovuta alla presenza di attivazione dei materiali della testa dell'acceleratore.

La presenza dei due livelli del ^{53}Fe con vite medie differenti complica il dettaglio della valutazione dell'attività residua. Si vede però immediatamente che alla fine della preparazione del paziente il livello eccitato caratterizzato da $T_{1/2} = 2,5$ min ha praticamente esaurito la sua attività mentre l'altro (stato fondamentale) la ha poco più che dimezzata. Tenendo conto di ciò, per una stima conservativa massimale della dose alle mani dell'operatore si può valutare una media di $60 \mu\text{Sv/h} * 600 \text{ h/anno}$, ottenendo 36 mSv/anno , che va paragonato favorevolmente con il limite di dose equivalente annuo per le estremità prescritto per la popolazione: 50 mSv .

Le norme di sicurezza devono regolare strettamente questa forma di esposizione a rischio residuo, per evitare che ne venga interessato il corpo intero dell'operatore.

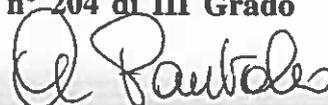
6. Produzione di gas tossici.

Durante il funzionamento dell'acceleratore si producono gas tossici come l'ozono ed i vapori nitrosi, le cui concentrazioni in aria vanno mantenute al di sotto delle concentrazioni ammissibili stabilite per i medesimi, per i fini della tutela della salute del paziente. Pertanto il punto focale dell'attenzione alla produzione di gas tossici è il lettino portapaziente.

Il tasso di produzione dei gas tossici va in competizione con il tasso di diluizione continua dovuta ai ricambi dell'aria, arrivando, per un impianto di condizionamento ben strutturato, ad

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



una concentrazione di equilibrio in aria inferiore alla concentrazione limite. Questa condizione detta le richieste sul numero di ricambi dell'aria nell'unità di tempo.

La competizione tra il tasso di produzione e quello di diluizione è più critica per l'ozono, a causa della sua bassa concentrazione (0,1 ppm) ammissibile. Perciò la tutela dal rischio da ozono, automaticamente comporta l'ottimizzazione della tutela contro il rischio da altri gas tossici. Nel seguito, pertanto, le necessità strutturali dell'impianto di condizionamento rispetto ai gas tossici verranno valutate per l'ozono.

L'ozono si produce durante il funzionamento ad elettroni dell'acceleratore, per la loro interazione con l'ossigeno dell'aria. La concentrazione C (ppm) di ozono in aria è data da (ref.12):

$$C = 3,25 * [(S_{coll} * I * l * t) / V]$$

dove

- S_{coll} = Potere frenante degli elettroni in aria (keV / cm);
- I = Intensità di corrente degli elettroni (mA);
- l = Percorso degli elettroni in aria (cm);
- t = Tempo di irraggiamento (sec);
- V = Volume del Bunker (litri)

Allo scopo di massimizzare la produzione di ozono, il calcolo è stato eseguito con una dose erogata al paziente di **24 Gy / min** ad una energia del fascio di elettroni di **6 MeV** ($S_{coll} = 2,4$ keV / cm), irraggiando ad una distanza $l = 100$ cm, con una intensità di corrente non superiore a $1,2 \mu A$ ($I = 0,0012$ mA), mentre il volume di diluizione è $V = 200.000$ litri se c'è sufficiente movimentazione d'aria. **Il risultato è pari a 0,017 ppm di ozono prodotto in un'ora**, in assenza di ricambi d'aria ma con sufficiente ventilazione interna. Se la ventilazione interna dovesse mancare, allora nei pressi del lettino si potrebbero creare densità tra 10 e 100 volte più grandi a causa del più basso volume di diluizione. Ad evitare condizioni di questo tipo, si impone un adeguato ricambio d'aria che oltre la movimentazione introduce ulteriori fattori di diluizione. Si ritiene che con **10 ricambi d'aria all'ora** si possa raggiungere la certezza di realizzare la protezione da gas tossici sul lettino del paziente, indipendentemente dai dettagli realizzativi dell'impianto di condizionamento.

11 Luglio 1998



Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

7. Valutazioni ed indicazioni di radioprotezione (art. 61, D.Lgs. 230/95)

7. 1. Classificazione delle aree

Sulla base di tutto quanto precede si può affermare che la **classificazione delle aree** per l'esercizio dell'acceleratore lineare CLINAC 2100 C presso l'Ospedale Oncologico Regionale di Rionero in Vulture è la seguente: **l'interno del bunker è Zona Controllata**, mentre **il resto del reparto oncologico ed il terrazzo del bunker è Zona Sorvegliata**. Le aree classificate, delimitate e segnalate secondo le norme vigenti, sono normalmente interdette al personale non autorizzato durante i trattamenti terapeutici, mentre durante i periodi di fermo macchina l'accesso alla Zona Sorvegliata può non essere vietato. Durante i periodi di fermo macchina potrà essere autorizzato all'ingresso in Zona Controllata personale addetto alle pulizie o a manutenzione impianti, a condizione che preventivamente la testa dell'acceleratore sia stata messa in sicurezza con la chiusura dei diaframmi ed una orientazione di salvaguardia (verticale).

7. 2. Classificazione del personale. Formazione.

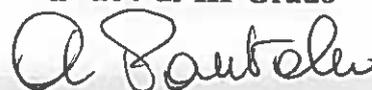
Il previsto esercizio verrà effettuato con **dose ordinaria presumibile** per gli operatori inferiore a 2,1 mSv/anno e **per la popolazione inferiore a 0,2 mSv/anno**. La dose presumibile agli operatori per le attività ordinarie va integrata, per i fini della loro classificazione di radioprotezione, con l'aggiunta di una dose presumibile dovuta alle esposizioni conseguenti ad eventi anomali e malfunzionamenti, che senza comportare esposizioni accidentali o di emergenza, siano suscettibili di aumentare le dosi dei singoli, derivanti dalla normale attività lavorativa programmata. Questi ulteriori contributi dosimetrici, quando la loro valutazione non scaturisce dalla valutazione di specifiche situazioni anomale di rischio, aggiungono al bilancio della dose presumibile per gli operatori una quota frazionaria della dose non superiore all'unità. Anche volendo assumere un addendo del 100 %, la **dose presumibile globale totale per gli operatori**, somma di quella relativa alle attività ordinarie ed agli eventi anomali, risulta inferiore **4,2 mSv/anno**.

Con un analogo raddoppio della dose ordinaria alle mani, valutata al par.5.2.4., la **dose presumibile parziale alle estremità**, ordinaria più dovuta ad eventi anomali, **assomma per gli operatori a 72 mSv/anno** (da mettersi in relazione ai 50 mSv/anno, DMA per la popolazione).

I valori di dose presumibile annua sopra citati confermano che l'obiettivo protezionistico di cui al par. 4.1. è raggiunto e che la **Classificazione di Radioprotezione per gli operatori è di Esposti di categoria B**. A seguito di questa classificazione gli operatori devono essere sottoposti a **visita medica idoneativa annuale**,

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



da parte di un Medico Autorizzato o di un Medico Competente, e devono essere loro forniti **dosimetri individuali** adeguati (per il corpo intero: neutroni e X/gamma, per le mani ad anello per X/gamma) alla tipologia del rischio.

Il personale autorizzato all'ingresso in Zona Controllata durante i periodi di fermo macchina per effettuare pulizie o manutenzione impianti, a motivo del trascurabile rischio residuo connesso sia alla particolare situazione che allo scarso indice di frequenza, è **classificato come ADDETTO a mansioni con rischio da radiazioni, bensì NON ESPOSTO**, senza obblighi di visita medica e di dosimetria personale.

Anche i lavoratori addetti a mansioni con rischio da radiazioni presso l'acceleratore dovranno essere resi edotti, nell'ambito di un **programma di formazione finalizzato alla radioprotezione**, in relazione alle mansioni cui essi sono addetti, dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, dalle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di sicurezza e protezione.

7. 3. Frequenza delle valutazioni.

Le **valutazioni dosimetriche ambientali** di cui all'art. 79, comma 1, lettera c) del D.Lgs.230/95 saranno effettuate **una volta l'anno con tecniche elettroniche e con continuità a mezzo di opportuni dosimetri ambientali**. Ancora annuale sarà la periodicità della verifica della efficacia dei dispositivi di protezione e delle buone condizioni di funzionamento degli strumenti di misura (art. 79, comma 1, lettera b), numeri 3) e 4), D. Lgs. 230/95).

La valutazione della dose agli operatori da sommersione in atmosfera contaminata verrà effettuata **sulla base della registrazione dei parametri e dei tempi di esercizio** disposta alla prescrizione 6) del par. 7.4. Le **valutazioni dosimetriche personali** verranno effettuate **mensilmente** sulla base dei risultati di dose assorbita dai dosimetri personali e delle registrazioni appena citate.

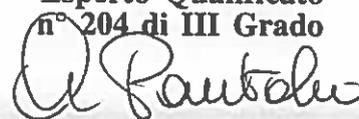
7. 4. Provvedimenti da adottare.

Vengono di seguito riportati i **provvedimenti di cui si ritiene necessaria l'adozione** al fine di assicurare una gestione locale della sorveglianza fisica della radioprotezione al livello di ottimizzazione corrispondente al raggiungimento dell'obiettivo protezionistico di cui al par. 4.1., o ancora superiore. Alcuni di essi sono da riportare nelle norme di sicurezza (NS).

1) Prescrizione di interdizione totale della frequenza del terrazzo del bunker da parte di personale non autorizzato. Potranno essere autorizzati gli addetti alle manutenzioni, durante lo spegnimento dell'acceleratore o il suo funzionamento ad elettroni o a bassa energia di fotoni.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



2) Prescrizione di interdizione dello stazionamento di personale non autorizzato in prossimità delle pareti esterne del bunker, ivi compresa la parte prospiciente il parcheggio a piano terra.

3) Prescrizione di interdizione dalla frequenza ordinaria del disimpegno anteriore la porta d'ingresso nel bunker durante i trattamenti ad alta energia di fotoni (NS).

4) Prescrizione agli operatori di un tempo di attesa minimo di cinque minuti prima di rientrare nel bunker dopo un trattamento ad alta energia di fotoni (NS).

5) Prescrizione di chiusura dei diaframmi alla fine di ogni trattamento e riapertura all'inizio del trattamento successivo o al più al momento di centrare il nuovo campo d'irraggiamento. Prescrizione agli operatori di rimanere con il corpo intero fuori dal campo d'irraggiamento per evitare la radiazione di attivazione che ne emerge (NS).

6) Prescrizione di tenuta di un rendiconto (su registro o su computer) delle presenze degli operatori e dei parametri dell'esercizio dell'acceleratore, ivi compresi, l'alta energia fotonica, dei tempi di irraggiamento, di attesa e di permanenza nel bunker per preparazione paziente successivo.

8. Esame Preventivo e Benestare

(art. 79, comma 1, lettera b), punto 1) del D.Lgs. 230/95)

Nelle mie funzioni di Esperto Qualificato incaricato della Sorveglianza Fisica della radioprotezione presso gli acceleratori dell'Ospedale Regionale Oncologico di Rionero in Vulture ho sottoposto ad Esame Preventivo, secondo le disposizioni di cui al titolo, il progetto della struttura sanitaria citata di porre in esercizio per scopi terapeutici un acceleratore lineare CLINAC 2100 C della ditta Varian, con i dettagli funzionali, tecnici, logistici ed operativi in dettaglio presentati nei capitoli precedenti del presente documento.

Essendo io stesso l'estensore della progettazione e valutazione dei presidi radioprotezionistici che precede, **rilascio immediatamente il benestare richiesto** alla installazione di cui si tratta.

11 Luglio 1998



Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

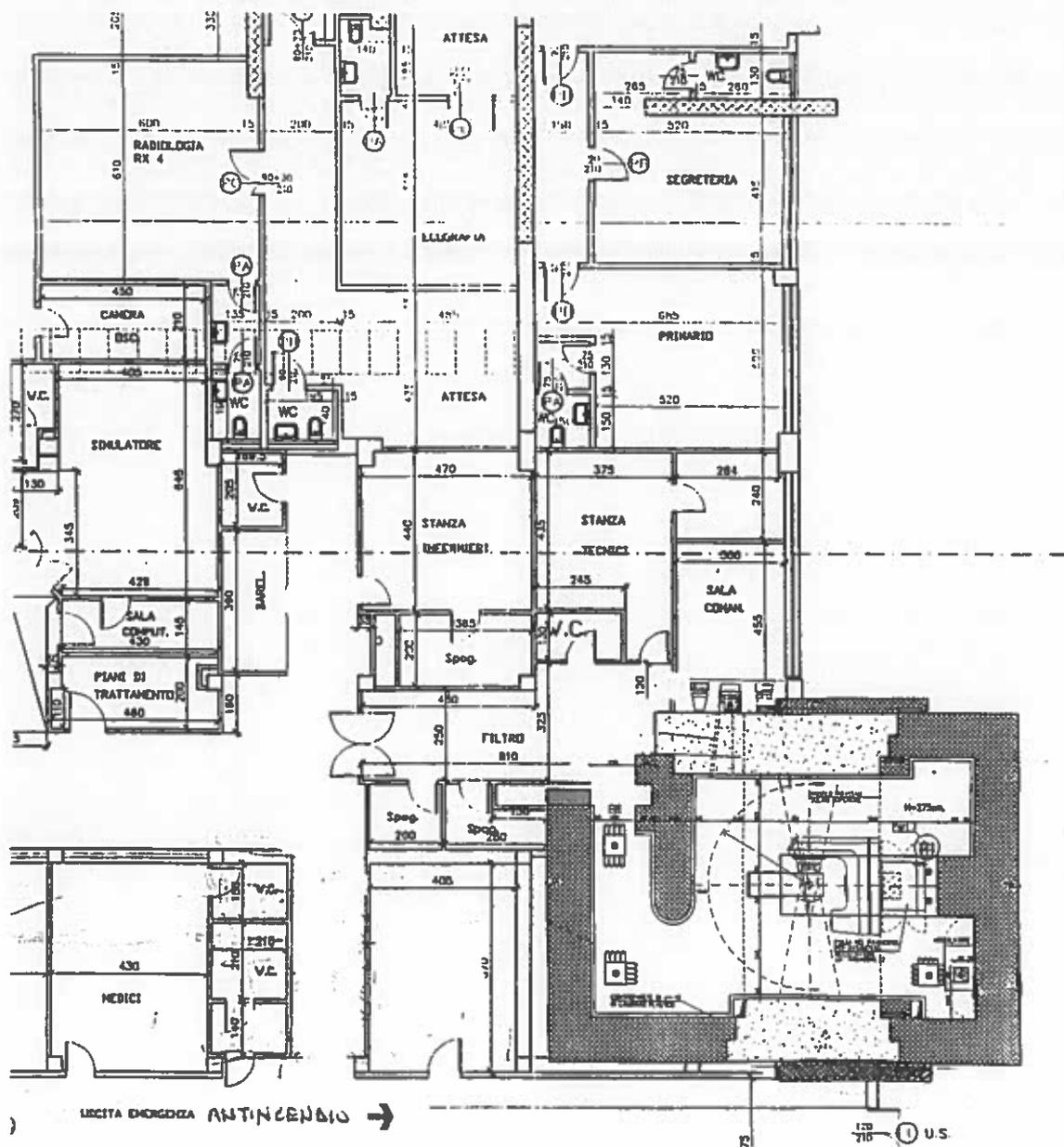
9. Bibliografia.

- 1) R. Brian et al., GEANT3, CERN DD/EE/84-1, 1986.
- 2) G. Azam, "Saturnes Linear Accelerators for Medical Applications" Training Course, CGR MeV (Groupe Thomson) Report, 1988, e bibliografia ivi citata alle pag. 251-255
- 3) G. Paic', "Ionizing radiation: Protection and Dosimetry", CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1988.
- 4) A. B. Chilton, J. K. Shultis, R.E. Faw, "Principles of Radiation Shielding", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. - USA, 1984.
- 5) National Nuclear Data Centre, Brookhaven National Lab., USA, indirizzo del sito Internet <http://www.nndc.bnl.gov>
- 6) R. Montalbetti et al., Phys. Rev. 91, 659 (1953)
- 7) G.A. Price, Phys. Rev. 93, 1279 (1954)
- 8) J.O. Johnson and T.A. Gabriel, MICAP, Techn.Report TM-10340, ORNL-Usa, 1988
- 9) C. Birattari et al., Rapporto I.N.F.N./TC - 84/29, 11 Dicembre 1984.
- 10) B.J. Moyer, "Shielding and Radiation Calculations for USNRDL Cyclotron", "Design Calculations for Preliminary Engineering Report", USNRDL Reports B1.102 e B1.128, (1958).
R. Wallace, "Cyclotrons: neutron emission and attenuation", Eng. Comp. on Rad. Shielding, 3, 157, (1970)
- 11) D.Lgs. 230/95, Tabella IV-1 e Valeur Directrice CA della legge svizzera.
- 12) NCRP Report n. 51 "Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 - 100 MeV Particle Accelerator Facilities".

11 Luglio 1998



Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado



Scala 1 : 50

Fig. 1. Planimetria del reparto oncologico al piano interrato, con il bunker dell'acceleratore.

A. Pantaleo

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

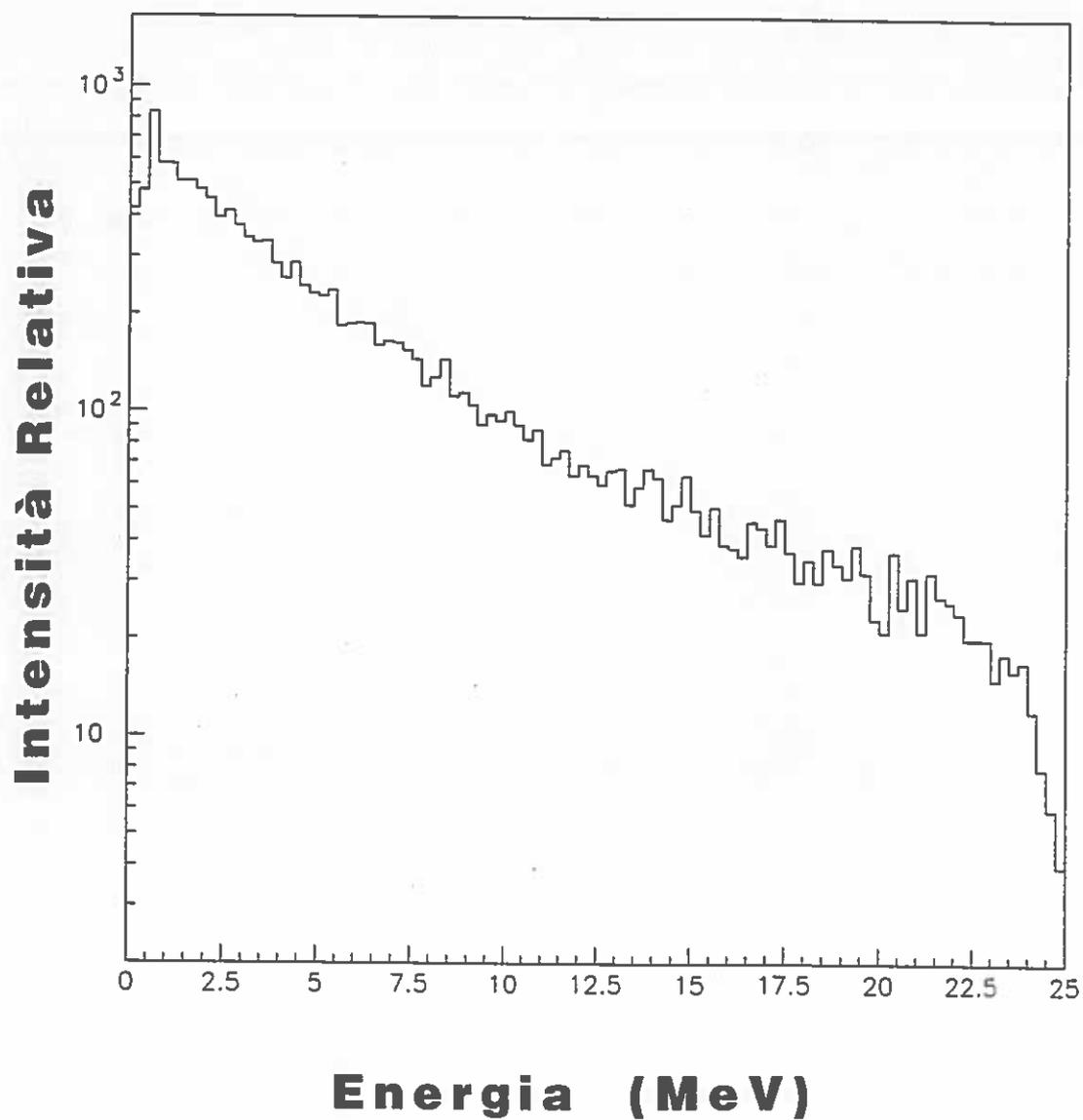


Fig. 2. Spettro dei raggi X di frenamento, con il "flattener" inserito, registrato nel monitor del calcolo di simulazione.

11 Luglio 1998

A. Pantaleo
Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

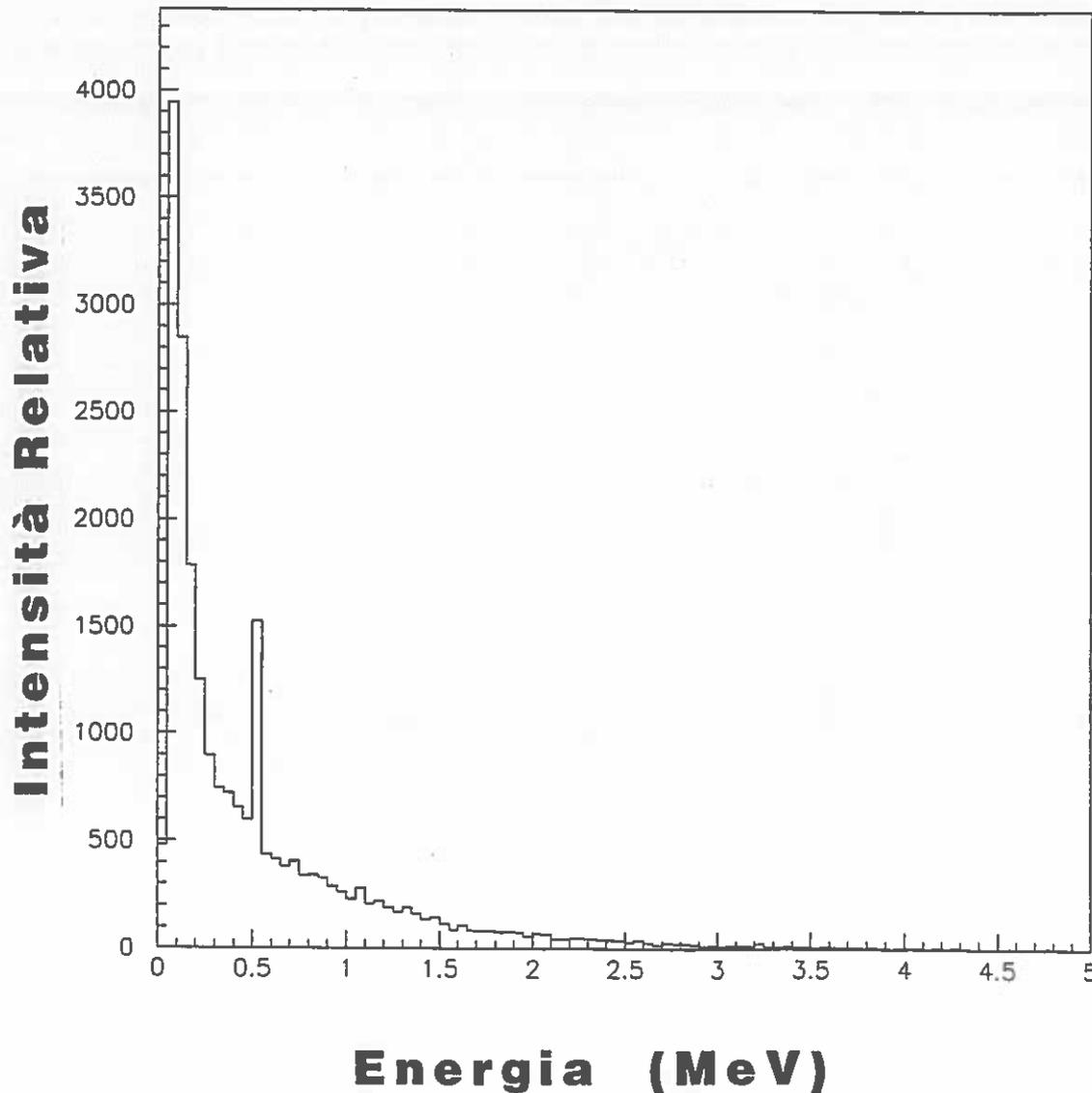


Fig. 3. Spettro del flusso fotonico secondario complessivo che investe le strutture del bunker ad angoli in avanti rispetto alla direzione del fascio primario.

11 Luglio 1998

A. Pantaleo
Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

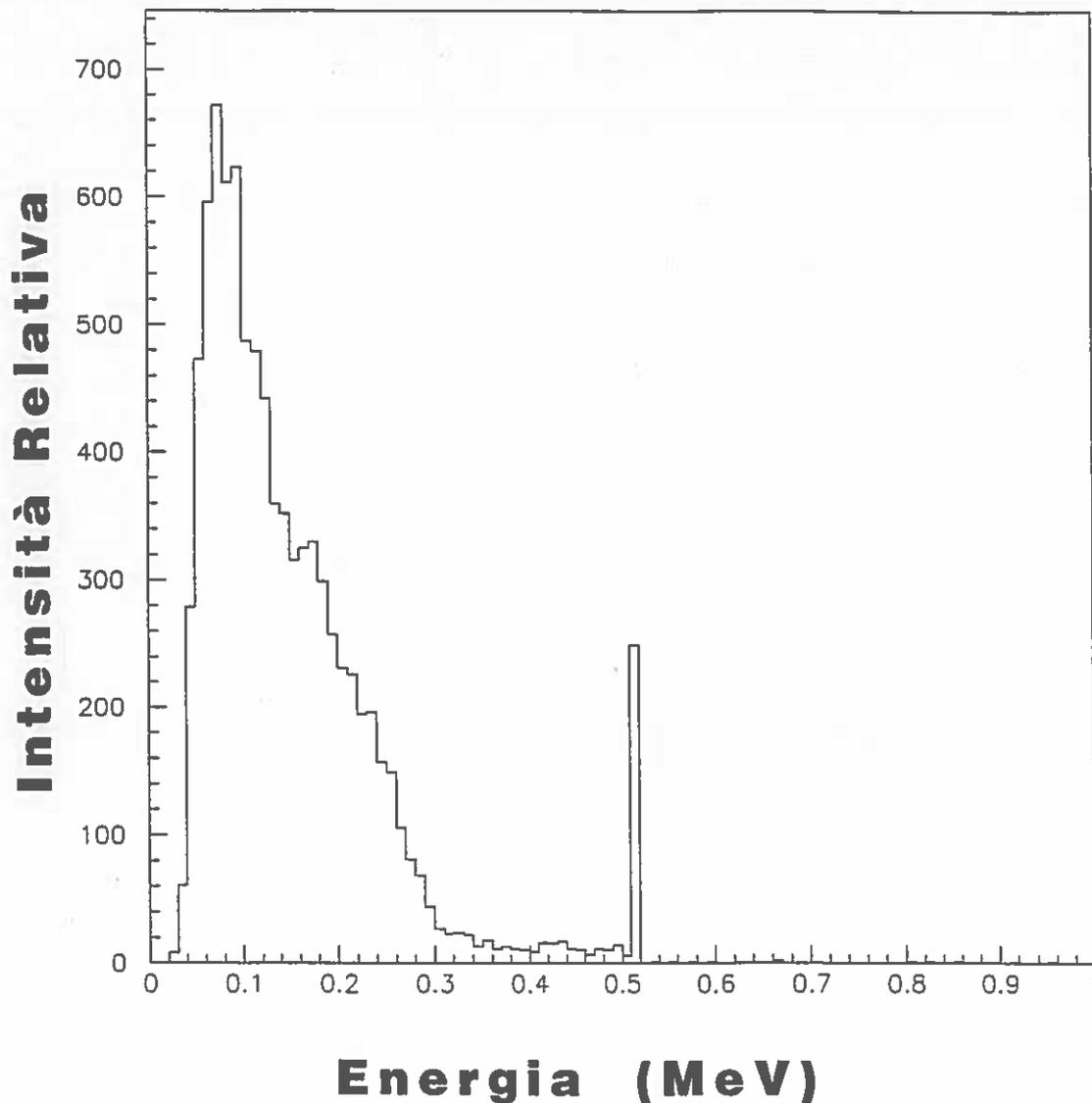


Fig. 4. Spettro del flusso fotonico secondario complessivo che investe le strutture del bunker ad angoli all'indietro rispetto alla direzione del fascio primario.

11 Luglio 1998

A. Pantaleo
Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

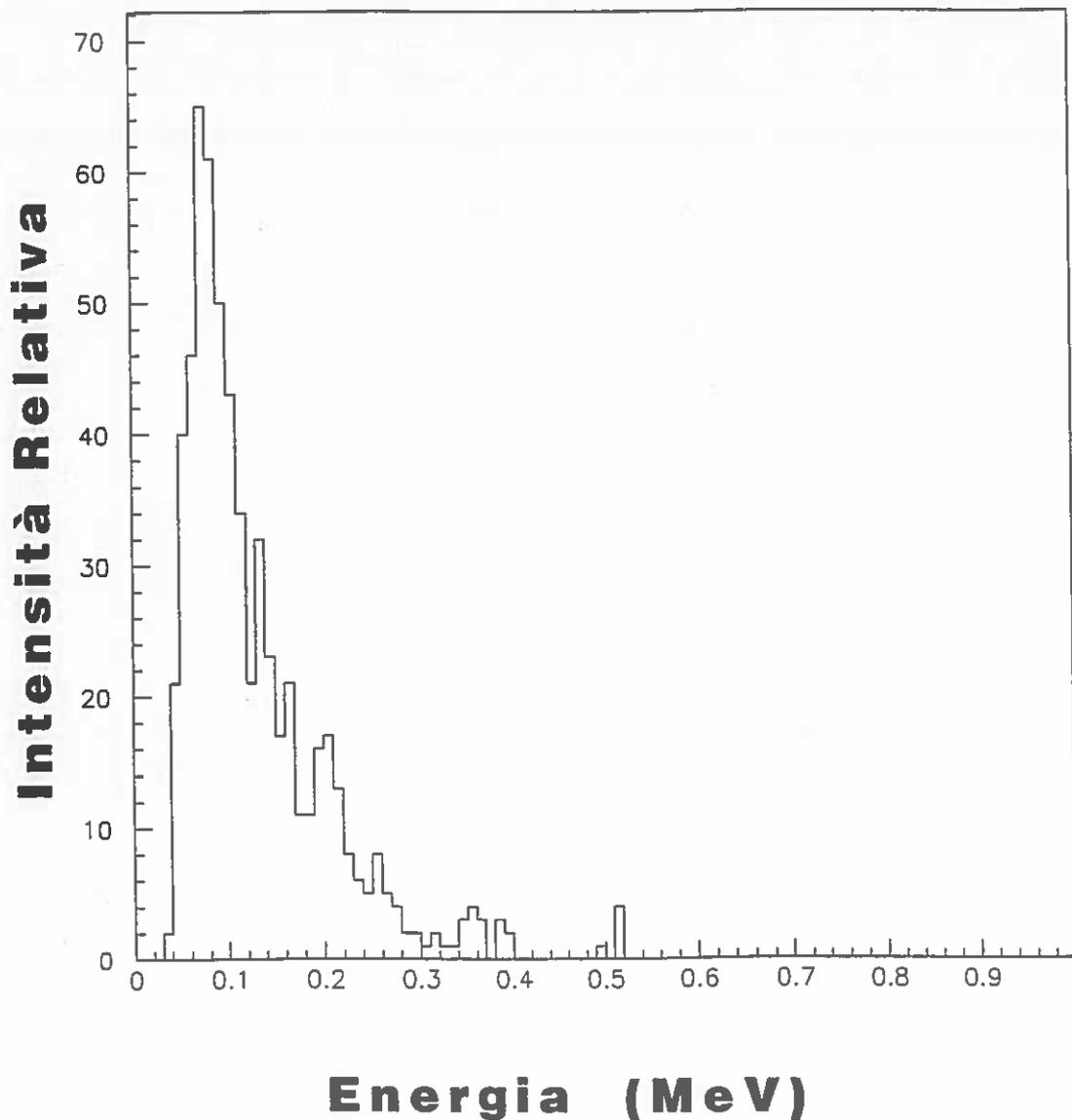


Fig. 5. Spettro del flusso fotonico secondario complessivo che investe la porta del bunker dall'interno (ALBEDO).

11 Luglio 1998

A. Pantaleo
Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado

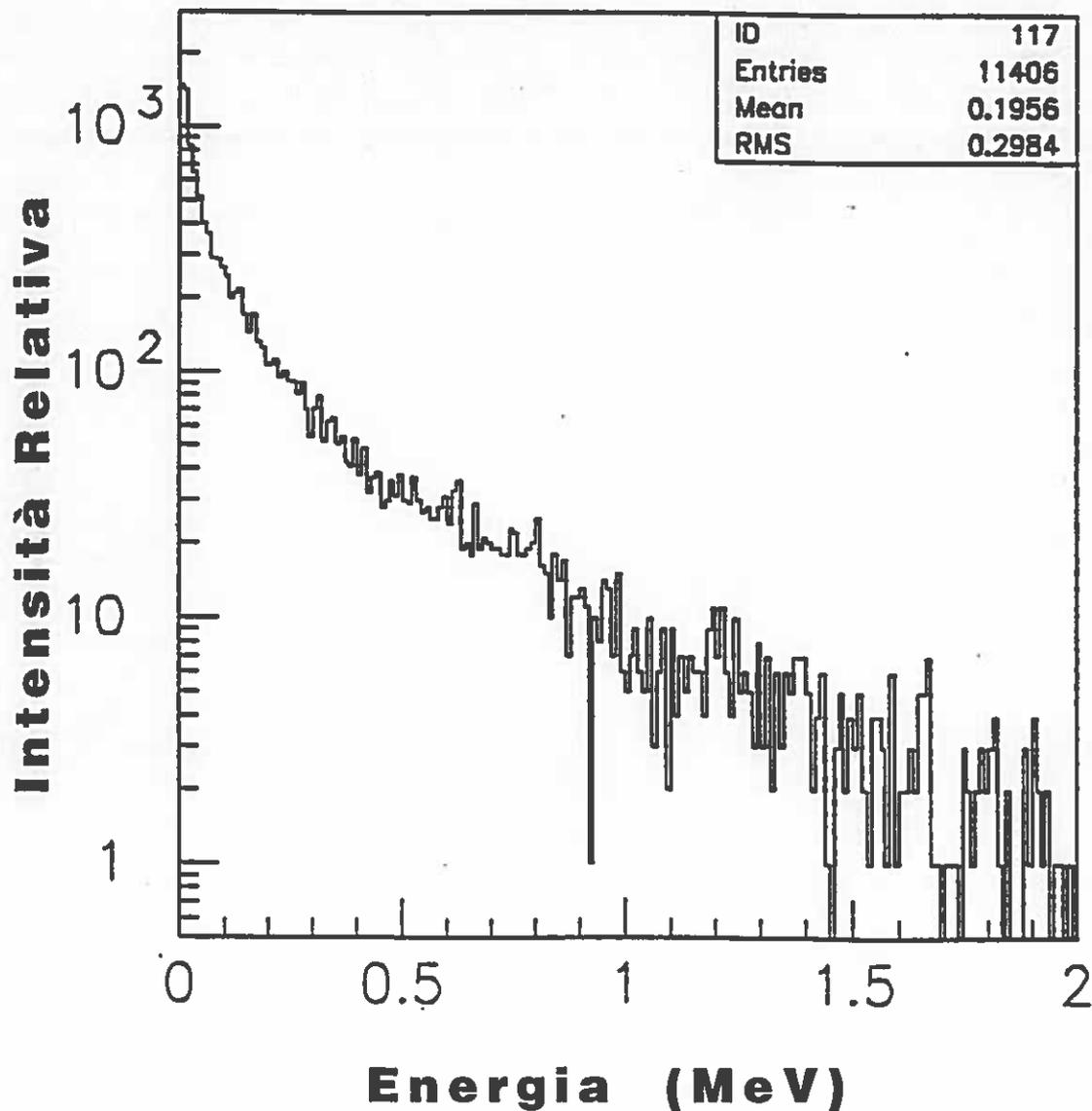


Fig. 6. Spettro neutronico tipico che investe le strutture del bunker.

11 Luglio 1998

Dott. A. PANTALEO
Esperto Qualificato
n° 204 di III Grado