

Michele Prata<sup>1</sup>, Bárbara Smilgys<sup>2</sup>, Sergio Manera<sup>1</sup>

## Il lavoro al ciclotrone per produzione di radioisotopi: rischi espositivi e misure di prevenzione

<sup>1</sup> L.E.N.A. - Laboratorio Energia Nucleare Applicata, Università degli Studi di Pavia, Via Aselli 41, 27100 Pavia (PV), Italy

<sup>2</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Pavia, Via Bassi 6, 27100 Pavia (PV), Italy

**RIASSUNTO.** In questo articolo verranno presentati i principali aspetti radioprotezionistici di un impianto dedicato alla produzione di radioisotopi per uso medicale mediante ciclotrone.

Dopo aver analizzato i parametri di progetto per l'esercizio dell'impianto da un punto di vista della radioprotezione degli operatori, della popolazione e dell'ambiente (schermature attorno alla macchina radiogena, impianto di ventilazione, rilasci al camino etc.), si focalizzerà l'attenzione sulla manipolazione delle sorgenti non sigillate prodotte con particolare riguardo alle procedure operative. La parte conclusiva sarà dedicata agli interventi in condizioni eccezionali di esercizio (ingresso nel bunker per un guasto della macchina, rottura di una vial in fase di trasferimento dalla cella calda al pozzetto di trasporto, contaminazione accidentale di un operatore).

**Parole chiave:** produzione radioisotopi, ciclotrone, radioprotezione.

**ABSTRACT.** In this article, there will be presented the main aspects of the radiation protection for a site dedicated to the production of radioisotopes by cyclotron for medical use. After analyzing the design parameters of the site for the operation from a point of view of the radiation protection of the operators, the population and the environment (shielding around the accelerator, ventilation system, chimney releases etc.), we will focus our attention to the handling of unsealed sources produced, with particular regard to the operating procedures.

The final part will be dedicated to intervention in exceptional operating conditions (entering the bunker due to a machine failure, breaking of a vial during transfer from the hot cell to the transport container and accidental contamination by an operator).

**Key words:** radioisotope production, cyclotron, radiation protection.

### Introduzione

Presso il L.E.N.A., Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università degli Studi di Pavia, è in funzione un impianto di produzione di radioisotopi per uso medicale (1) impiegati in esami di diagnostica PET (*Positron Emission Tomography*). L'acceleratore installato è un ciclotrone IBA "Cyclone® 18/9" (Figura 1) che può accelerare fasci di protoni di energia 18 MeV con una corrente massima di fascio di 40  $\mu$ A e fasci di deutoni da 9 MeV con una corrente massima di fascio di 20  $\mu$ A. Esso dispone di 8 porte di uscita e può produrre diversi tipi di radioisotopi  $\beta^+$  emettitori, a seconda della tipologia di target installato (target liquidi per  $^{18}\text{F}$  e  $^{13}\text{N}$ , target gassosi per  $^{11}\text{C}$  e  $^{15}\text{O}$ , target solidi per  $^{124}\text{I}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Zr}$  e numerosi altri nuclidi). L'impianto è attualmente autorizzato con nulla osta di categoria A alla produzione di  $^{18}\text{F}$  e  $^{13}\text{N}$ .

### Sorgente di Radiazioni Ionizzanti

Al fine di dimensionare correttamente l'impianto da un punto di vista radioprotezionistico è necessario caratterizzare la sorgente di radiazioni ionizzanti in termini di tipo di particelle, spettro di energia e carico di lavoro della macchina.

Il ciclotrone accelera fasci di protoni che sul bersaglio liquido costituito da acqua arricchita in  $^{18}\text{O}$  inducono la reazione nucleare  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  con produzione di un campo neutronico secondario ben caratterizzato in termini di intensità e spettro di energia, anche da recenti lavori (2), e un campo di radiazione gamma noto in termini di intensità di dose da dati della casa costruttrice del ciclotrone.

Il massimo carico di lavoro della macchina è indicato nel nulla osta autorizzativo per l'esercizio dell'impianto in termini di corrente integrata massima di 80 000  $\mu$ Ah/anno, calcolato a partire dall'ipotesi di 8 ore di funzionamento giornaliero alla massima corrente di fascio di 40  $\mu$ A per 250 giorni lavorativi all'anno.

### Ambiente di Lavoro: Protezione dei Lavoratori

Una volta caratterizzata la sorgente, al fine di garantire la protezione dei lavoratori, l'esperto qualificato ha fissato



Figura 1. Il ciclotrone IBA "Cyclone® 18/9" installato presso il LENA

come parametro di progetto al massimo carico di lavoro della macchina una dose efficace annua all'operatore non superiore a 0.5 mSv. Questo porta, dopo opportuni calcoli di dimensionamento delle schermature (3), a dimensionare le pareti di calcestruzzo del bunker con uno spessore di 2.00 - 2.10 m, in grado di garantire un efficace schermo sia per il campo neutronico che per il campo gamma presente all'interno del bunker.

L'aria presente nel bunker, in condizioni di fascio acceso, si attiva per via delle reazioni nucleari indotte dal campo neutronico secondario con i nuclei dell'argon presenti nell'aria (circa l'1% dell'aria è composta da argon). La reazione (n- $\gamma$ ) produce  $^{41}\text{Ar}$ , che è un radionuclide  $\beta/\gamma$  emettitore con un emivita di circa 109 minuti. Al fine di garantire la protezione dei lavoratori e della popolazione occorre ben dimensionare l'impianto di ventilazione. Esso deve garantire il contenimento dinamico degli effluenti aeriformi mantenendo i diversi ambienti di lavoro in condizioni di depressioni a diversi livelli: i locali in cui vanno contenuti gli effluenti radioattivi aeriformi devono essere mantenuti a livelli di depressione più elevati che vanno via via a diminuire andando verso l'ambiente esterno (Figura 2).

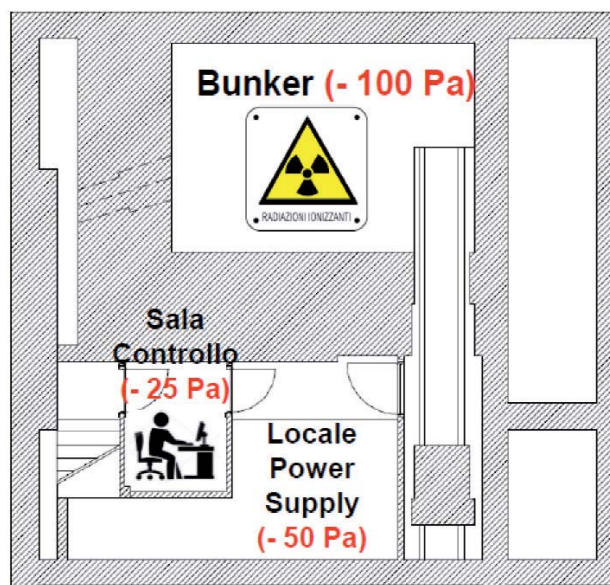


Figura 2. Planimetria in cui sono evidenziati i gradienti di depressione

La depressione di  $-100$  Pa all'interno del bunker deve essere garantita con il minor numero di volumi di ricambio all'ora, affinché l'attività dell'aria rilasciata al camino dell'impianto sia inferiore ai limiti di legge ( $1 \text{ Bq/g}$  - art. 154 comma 2 D.Lgs 230/95 e s.m.i.). Il rispetto dei limiti è garantito da una misura in continua dell'attività dell'aria al camino mediante spettrometria gamma con rivelatore allo Ioduro di Sodio (NaI). In caso di superamento dei limiti un sistema di interblocco spegne il fascio di particelle del ciclotrone e non è possibile riattivarlo fino a che non siano ripristinate le corrette condizioni e il rilascio.

La piccola portata d'aria nel bunker (1 volume di ricambio all'ora) confina l' $^{41}\text{Ar}$  al suo interno dove decade, riducendo così il più possibile il suo rilascio in ambiente esterno. In caso di necessità di accedere al bunker da parte degli operatori, questo è interdetto da un interblocco a tempo: non è possibile entrare nel bunker prima di 12 ore dallo spegnimento del fascio e dopo ulteriori 6 minuti di "lavaggio" del bunker con aria prelevata dall'esterno a grande portata (10 volumi di ricambio all'ora).

#### Ambiente Esterno: Protezione della Popolazione e dell'Ambiente

La protezione della popolazione e dell'ambiente si attua con controlli su tutti i rilasci dall'impianto: effluenti radioattivi aeriformi e liquidi e rifiuti radioattivi allo stato solido.

Per quanto riguarda gli effluenti aeriformi questi sono stati trattati nel precedente paragrafo.

Gli effluenti liquidi potenzialmente radioattivi sono: le acque di lavaggio della vetreria del lavello del laboratorio di radiochimica, le acque del lavello e della doccia decontaminazione, l'acqua della vasca di raccolta di eventuali perdite del circuito di raffreddamento del ciclotrone e l'acqua di condensa del deumidificatore collocato nel bunker del ciclotrone. Tutte questi effluenti liquidi sono raccolti in una vasca di contenimento del volume di 1000

litri. Quando il livello dell'acqua all'interno della vasca raggiunge i 700 litri, il Servizio di Fisica Sanitaria del LENA preleva un campione di 100 ml su cui vengono condotte le analisi radiometriche: spettrometria gamma in alta risoluzione e conteggio  $\alpha+\beta/\gamma$  totale su un campione di 10 ml portato a secco su piattello. Parallelamente all'analisi radiometrica si effettua un'analisi chimica secondo un protocollo standard per le acque reflue. Se quest'ultima ha esito negativo e i controlli radiometrici evidenziano l'assenza di radionuclidi con emivita superiore a 75 giorni e concentrazione inferiore a 1 Bq/g (*Art. 154 comma 2 D.Lgs. 230/95 e s.m.i.*) il Direttore dell'impianto, sentito l'Esperto Qualificato, autorizza lo scarico in ambiente.

Per quanto riguarda i rifiuti radioattivi, questi sono principalmente guanti, carta, aghi, vial e piccole parti consumabili della macchina acceleratrice. Questi vengono raccolti in fusti di metallo da 60 litri, omologati come collo di tipo A per il trasporto di materie pericolose su strada (Regolamento Internazionale ADR). Una volta che questi fusti raggiungono il massimo volume, vengono confezionati, caratterizzati da un punto di vista radiometrico e conferiti ad una ditta autorizzata per il ritiro di rifiuti radioattivi (*Art. 33, D.Lgs. 230/95 e s.m.i.*).

I principali radionuclidi presenti in questa tipologia di rifiuti sono elementi metallici oggetto di attivazione neutronica o protonica che vanno allontanati dal ciclotrone a causa dei processi di corrosione.

### Sorveglianza Fisica della Radioprotezione

L'intera area di lavoro dell'impianto ciclotrone è classificata come Zona Controllata. La sorveglianza fisica delle radioprotezione dei lavoratori è garantita mediante un servizio di dosimetria personale esterno, con frequenza di lettura mensile, e da un sistema di monitoraggio d'area costituito da 5 rivelatori Geiger-Müller collocati in diversi punti dell'impianto che registrano in continua l'intensità di dose gamma e dotati di sistemi di allarme ottico e acustico in caso di superamento dei limiti operativi derivati di intensità di dose. In parallelo al sistema attivo di misura di intensità di dose, sono posizionati nelle principali aree di lavoro (sala controllo, porta accesso bunker, laboratorio di confezionamento del radionuclide) dei dosimetri a film tarati H\*(10) con frequenza mensile di lettura.

### Sorgenti non sigillate: procedure di manipolazione e confezionamento

Una volta terminato l'irraggiamento sotto fascio di protoni, il bersaglio liquido viene trasferito mediante una linea di capillari in una vial sterile all'interno della cella calda di manipolazione (Figura 3). Questa vial costituisce una sorgente non sigillata di  $^{18}\text{F}$  con una attività media di 2 Ci (74 GBq) e massima di 5 Ci (185 GBq). La sua manipolazione avviene all'interno di una cella calda (Figura 4) dove viene mantenuta una depressione di  $-100$  Pa un sistema di ventilazione con filtri HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*) e ULPA (*Ultra-Low Penetration Air*). Tutte le pareti della cella sono in piombo con uno spessore

di 75 mm. Quando al suo interno è presente una sorgente gamma di attività 3 Ci (111 GBq) l'intensità di dose alla pronta della cella è inferiore a  $5 \mu\text{Sv/h}$ , mentre a 1 m è inferiore a  $0.5 \mu\text{Sv/h}$ .



Figura 3. Vial di raccolta del  $^{18}\text{F}$  all'interno della cella calda di manipolazione



Figura 4. Cella calda di manipolazione

La fase più delicata da un punto di vista radioprotezionistico è il trasferimento della vial contenente fino a 5 Ci (185 Bq) di  $^{18}\text{F}$  dalla cella calda al contenitore in piombo per il trasporto. I principali rischi per gli operatori sono:

- Rischio esposizione: senza schermi l'intensità di dose  $\gamma$  massima ad 1 m sarebbe di 25 mSv/h;
- Rischio di contaminazione interna per ingestione/inalazione in caso di rottura accidentale della vial.

Per ridurre il rischio di esposizione per irradiazione esterna l'operatore deve sempre interporre tra sé e la vial uno schermo. Durante la manipolazione in cella calda vi è lo schermo di piombo da 75 mm di spessore delle porte e delle pareti della cella calda. Durante la discesa della vial dalla cella al contenitore di trasporto vi è un collare di piombo di spessore di 80 mm. Una volta che la vial raggiunge il pozzetto di trasporto (Figura 5), questo schermo completamente la sorregge con uno spessore di 40 mm di piombo che nel caso in cui l'attività raccolta nella vial sia di 2 Ci (74 GBq) garantisce una massima intensità di dose a contatto inferiore a 2 mSv/h, e a 1 m inferiore a 20  $\mu$ Sv/h.



**Figura 5. Sistema di chiusura pneumatica automatica del pozzetto di trasporto**

In caso di rottura accidentale della vial il monitor di dose ambientale del laboratorio fornirà una pronta segnalazione acustica e luminosa. L'operatore dovrà abbandonare immediatamente il laboratorio avendo cura di richiudere dietro di sé la porta. Il locale di trova ad una depressione di  $-50$  Pa che garantisce il contenimento dinamico della componente volatile del  $^{18}\text{F}$ . Il direttore dell'impianto vieta l'accesso al laboratorio per le successive 24 ore. Il Servizio di Fisica Sanitaria conduce un'analisi mediante spettrometria  $\gamma$  del muco nasale e su un campione biologico di 100 ml di urine degli operatori coinvolti e comunica i risultati al Direttore, all'Esperto Qualificato e al Medico Autorizzato (quest'ultimo solo in caso di superamento dei limiti di dose).

## Manutenzione del Ciclotrone

La manutenzione ordinaria della macchina acceleratrice viene programmata al lunedì mattina, in modo da garantire un intervallo di tempo superiore a 36 ore dall'ultimo stato di fascio acceso per poter consentire il decadimento dei radionuclidi a vita breve. Il principale rischio per i manutentori è il rischio esposizione per irradiazione esterna dalle parti attivate della macchina, con particolare attenzione alla finestra del target (massima intensità di dose  $\gamma$  a 20 cm circa 3 mSv/h). Questa è costituita da una lega di HAVAR® e i principali radionuclidi presenti dopo 500 ore di funzionamento sono:  $^{55}\text{Co}$  (emivita 0.7 giorni),  $^{56}\text{Co}$  (emivita 77 giorni),  $^{58}\text{Co}$  (emivita 71 giorni),  $^{52}\text{Mn}$  (emivita 5.6 giorni),  $^{54}\text{Mn}$  (emivita 312 giorni),  $^{51}\text{Cr}$  (emivita 28 giorni) (4).

Al fine di ridurre il più possibile la dose ai manutentori si applicano i 3 fattori della radioprotezione: tempo (fare se possibile prove in bianco su componenti freddi prima di intervenire sui componenti attivati della macchina, al fine di eseguire le operazioni nel minor tempo possibile), distanza (tenere la maggiore distanza possibile tra sé e le parti attivate, aiutandosi ove possibile con pinze distanziatrici) e schermo (se possibile interporre schermature adeguate fra sé e le parti attivate, p.es. manutenzione del target dietro schermo di piombo).

## Bibliografia

- 1) Alloni D, Borio di Tigliole A, Coniglio M, Manera S, Piazzoli A, Prata M, Salvini A, Scian G. Produzione di radioisotopi per uso medicale mediante ciclotrone presso il Laboratorio Energia Nucleare Applicata (L.E.N.A.) dell'Università degli Studi di Pavia. *Radiazioni Ricerca e Applicazioni*, Anno XI N. 1, Aprile 2008, 6-9. Periodico della Società Italiana per le Ricerche sulle Radiazioni (SIRR).
- 2) Alloni D, Prata M. Characterisation of the secondary neutron field generated by a compact PET cyclotron with MCNP6 and experimental measurements. *Applied Radiation and Isotopes* 2017; 128: 204-209. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.07.031>
- 3) NCRP Report N. 51. Radiation Protection design guidelines for 0.1 - 100 MeV particle accelerator facilities. National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington DC, 1977.
- 4) Alloni D, Prata M, Smilgys B. Experimental and Monte Carlo characterization of radionuclidic impurities originated from proton irradiation of  $^{18}\text{O}$  in a modern medical cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes* 2019; 146: 84-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.01.026>

**Corrispondenza:** Michele Prata, L.E.N.A. - Laboratorio Energia Nucleare Applicata, Università degli Studi di Pavia, Via Aselli 41, 27100 Pavia (PV), Italy, Tel. +39 0382 98 7306, [michele.prata@unipv.it](mailto:michele.prata@unipv.it)