

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-67/68

M. Ladu, M. Pelliccioni e M. Roccella : PRODUZIONE E SCARICO
DI GAS TOSSICI E RADIOATTIVI NEL TUNNEL DEL LINAC DI
FRASCATI.

*Estratto da: Minerva Fisiconucleare 11, 112 (1967)

MINERVA FISICONUCLEARE

GIORNALE DI FISICA SANITARIA E PROTEZIONE CONTRO LE RADIAZIONI
ORGANO DELL'ASSOCIAZIONE ITALIANA DI FISICA SANITARIA E PROTEZIONE CONTRO LE RADIAZIONI

TORINO - Casella Postale 491 - CCP. 2/40912 - Corso Bramante 83 - 85 - Telefono 67.82.82 - TORINO

Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati (Roma)

M. LADU - M. PELLICIONI - M. ROCCELLA

Produzione e scarico di gas tossici e radioattivi nel tunnel del Linac di Frascati

Estratto da

*GIORNALE DI FISICA SANITARIA
E PROTEZIONE CONTRO LE RADIAZIONI*

Vol. 11 - N. 2 - Pag. 112-116 (Aprile-Giugno 1967)

E D I Z I O N I M I N E R V A M E D I C A

Introduzione. — Fra gli altri problemi di sicurezza posti dagli acceleratori lineari di grande potenza vi è quello della produzione dei gas tossici NO_2 ed O_3 e dei nuclidi ^{15}O , ^{13}N (radioattivi β^+) e ^{38}Cl (radioattivo β^- e γ). In effetti viene prodotto anche il nuclide ^{11}C ma la corrispondente concentrazione di equilibrio risulta sempre notevolmente inferiore a quella dei nuclidi ^{15}O , ^{13}N e ^{38}Cl . Pertanto una valutazione delle condizioni di sicurezza relativamente a questi ultimi dovrà ritenersi valida anche per il ^{11}C .

In rapporto alla sicurezza delle persone, i valori di concentrazione massima ammissibile in aria sono quelli riportati nella tabella I:

TABELLA I

Sostanze	Concentrazioni *)	Nuclidi	Concentrazioni **)
NO_2	25 ppm	^{15}O	0,5 $\mu\mu\text{C}/\text{cm}^3$ (1)
O_3	0,1 ppm	^{13}N	0,5 $\mu\mu\text{C}/\text{cm}^3$ (1)
		^{38}Cl	0,1 $\mu\mu\text{C}/\text{cm}^3$

*) 1 ppm = una parte per milione in peso.

**) Le concentrazioni massime ammissibili dei nuclidi ^{15}O , ^{13}N e ^{38}Cl sono calcolate tenendo presente che, se tali concentrazioni sono presenti in un volume infinitamente esteso di aria, un corpo in essa immerso assorbe una dose totale di 30 mrem in 40 hr.

In vista della protezione e sicurezza del personale, abbiamo calcolato la produzione, nel tunnel del Linac di Frascati, sia dei gas tossici che dei nuclidi detti.

A questo scopo abbiamo utilizzato i seguenti dati tecnici della macchina (2):

a) Sezione alta corrente: energia 90 MeV, corrente 400 μA , lunghezza 15 m.

b) Sezione alta energia: energia 400 MeV, corrente 100 μA , lunghezza 45 m.

c) Perdita uniforme di corrente lungo il tubo: $10 \mu\text{A}$ (pessimisticamente si supporrà che l'energia sia ovunque di 400 MeV).

d) Il fascio della sezione alta corrente (40 kW) urta contro un convertitore di W spesso 1 r.l.

e) Il tubo acceleratore è racchiuso in un solenoide di rame dello spessore di $\sim 10 \text{ cm}$.

f) Attorno al convertitore vi è uno spessore di $12,5 \text{ cm}$ di rame e di 1 cm di acciaio.

Per semplicità di calcolo, si è supposto che il tunnel abbia la forma di un prisma a sezione quadrata, di lato 3 m e lunghezza 60 m .

I) Produzione dei gas tossici.

La produzione di gas tossici nel tunnel è principalmente dovuta alla ionizzazione dell'aria da parte degli elettroni e dei γ dello sciame che fuoriescono dalla parete del tubo acceleratore. Il contributo dovuto agli elettroni ed ai γ sarà valutato separatamente. Per entrambi i contributi il calcolo viene fatto a convertitore inserito e non inserito.

Contributo degli elettroni alla produzione di O_3 e NO_2 .

1) **Convertitore non inserito.** — Per ogni elettrone primario che devii dalla direzione del fascio di un angolo compreso tra φ e $\varphi + d\varphi$, sia $\pi(\varphi)$ il numero di elettroni dello sciame che fuoriescono in aria. Detta $\eta(\varphi)$ l'energia dissipata in ionizzazione da ciascuno di essi e $\phi(\varphi)d\varphi$ la probabilità che l'elettrone primario devii di un angolo tra φ e $\varphi + d\varphi$, si ha che per ogni elettrone primario, l'energia dissipata per ionizzazione in aria, è:

$$W_e = \int \phi(\varphi)\pi(\varphi)\eta(\varphi)d\varphi$$

Poichè non si conoscono le espressioni esatte delle funzioni $\phi(\varphi)$, e $\eta(\varphi)$, non è possibile calcolare l'integrale. Essendo però sufficiente, per gli scopi del problema, conoscere l'ordine di grandezza di W_e , alle funzioni che vi compaiono si possono sostituire dei valori approssimati.

a) Calcolo di $\phi(\varphi)$. - Sia θ , nel sistema del baricentro, l'angolo di deviazione degli elettroni dal fascio, e φ il corrispondente angolo nel sistema del laboratorio. In approssimazione relativistica la relazione tra gli angoli nei due sistemi è data da:

$$\text{tg } \varphi = \sin \theta$$

Da questa relazione ne consegue che non è possibile, per un elettrone, deviare dal fascio di un angolo φ maggiore di $\pi/4$. Poichè in corrispondenza al massimo angolo di deviazione otteniamo il minimo percorso degli elettroni in rame e quindi il minimo assorbimento, noi assumeremo che tutti gli elettroni incidano sulla parete secondo tale angolo. Si ottiene così che il loro percorso in rame è di 14,2 cm equivalente a 9,7 r.l.

b) Calcolo di $\pi(\varphi)$. - Il numero $\pi(E_0, t)$ di elettroni, prodotti da un elettrone incidente di energia iniziale E_0 , che sopravvivono dopo uno spessore di t r.l., può essere ottenuto dalla teoria degli sciami. Per spessori elevati ($t \gg 1$ r.l.), si ha approssimativamente:

$$\pi(E_0, t) = Ae^{-\mu t}$$

dove A è una funzione di $\ln(E_0/\varepsilon_0)$, ε_0 l'energia critica nel materiale in esame, mentre μ può ritenersi indipendente da E_0 e ε_0 , almeno fino a spessori non superiori a 30 r.l.

Nel nostro caso ($E_0 = 400$ MeV, $\varepsilon_0 = 22$ MeV), con un procedimento di estrapolazione, abbiamo potuto ricavare dalle curve di Rossi⁽³⁾: $A \approx 25$ e $\mu \approx 0,54$ (r.l.)⁻¹ (vedi fig. 1).

Pertanto si ottiene:

$$\pi(E_0, t) = 25 e^{-0,54 \times 9,7} = 0,14 \text{ elettroni/elettrone primario}$$

c) Calcolo di $\eta(\varphi)$. - Gli elettroni relativistici dissipano per ionizzazione in aria in condizioni normali 2,1 MeV/g/cm²⁽⁴⁾. Essi possono urtare contro le pareti del tubo acceleratore solo se deviano dalla direzione del fascio di almeno 10°, dal che si calcola facilmente che il loro massimo percorso in aria sarà di 10 m. Pertanto un elettrone relativistico potrà al più perdere in aria per ionizzazione $2,1 \times 1,29 \times 10^{-3} \times 10^3$ MeV ≈ 3 MeV. Un elettrone non relativistico potrà invece perdere per ionizzazione anche tutta la sua energia, che però sarà certamente inferiore a 3 MeV.

Per il calcolo di W_e assumeremo pessimisticamente che ogni elettrone che giunga nel tunnel, perda in esso 3 MeV per ionizzazione.

d) Produzione di molecole dannose. - Nelle ipotesi fatte, l'energia W_e dissipata in aria in ionizzazione per ogni elettrone primario incidente, è data da:

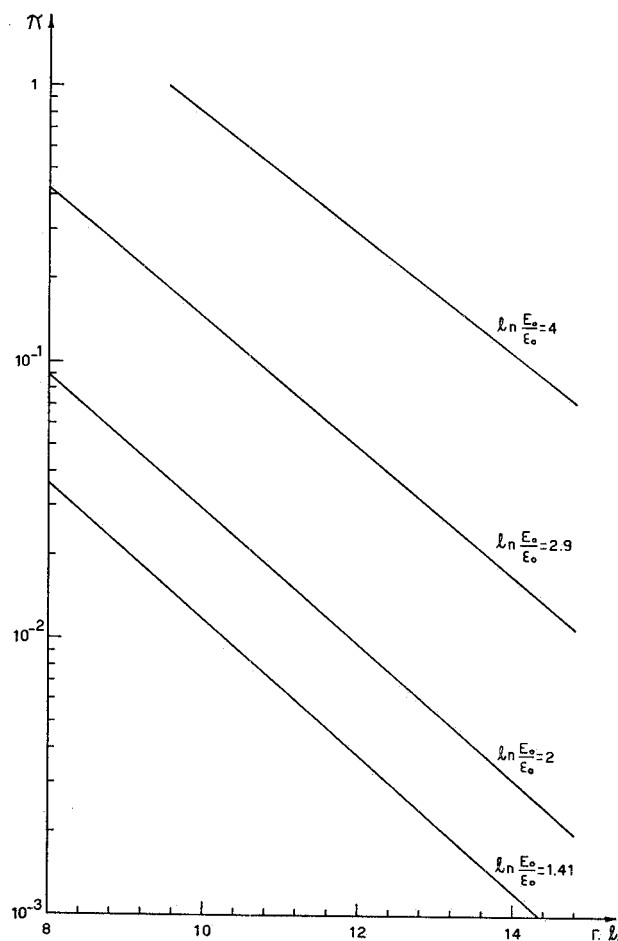


Fig. 1.

$$W_e = 0,14 \times 3 \approx 0,5 \text{ MeV/elettrone primario.}$$

Poichè in aria occorrono in media 33 eV per creare una coppia di ioni, se si fa l'ipotesi che per ogni coppia di ioni si produca una molecola dannosa^(4,5), la corrente di $10 \mu\text{A}$ da 400 MeV perduta sulle pareti dell'acceleratore, produrrà al massimo:

$$(1) \quad N_e = \frac{0,5 \times 10^6}{33} \cdot \frac{10 \times 10^{-6}}{1,6 \times 10^{-19}} \approx 10^{18} \text{ molecole dannose/sec.}$$

2) **Convertitore inserito.** — In questo caso assumiamo che gli elettroni debbano attraversare 12,5 cm di rame, 1 cm di acciaio e 1 r.l. di W, il tutto equivalente ad uno spessore di circa 10 r.l. Tuttavia si ha a che fare con elettroni da 90 MeV anzichè da 400 MeV poichè nel convertitore viene fatto urtare il fascio di bassa energia. Con lo stesso procedimento usato nel caso precedente, si ha ora:

$$\pi(90, t) = 2,1 e^{-0,54 t} = \sim 10^{-2} \text{ elettroni/elettrone primario}$$

e per l'energia dissipata in ionizzazione:

$$W_e = 0,03 \text{ MeV/elettrone primario}$$

e quindi per una corrente di 400 μA si ha:

$$(2) \quad N_e \simeq 2,5 \times 10^{18} \text{ molecole dannose/sec.}$$

Contributo dei γ alla produzione di NO_2 ed O_3 .

1) **Convertitore non inserito.** — Per un fascio di elettroni incidente sulla materia, la massima conversione di energia in radiazione γ si ha dopo uno spessore di 0,2 r.l. con un corrispondente fattore di conversione pari a circa il 20 %⁽⁴⁾.

Dopo questo spessore comincia a prevalere l'assorbimento, e per spessori sufficientemente elevati, il coefficiente di assorbimento diventa all'incirca uguale a quello dei γ più penetranti.

Il coefficiente di assorbimento nel rame è minimo per energie dei γ intorno ai 2–3 MeV per i quali risulta di 0,025 cm^2/g . Noi assumeremo che la potenza convertita in radiazione γ si mantenga costante fino al massimo dello sciame e che dal massimo dello sciame in poi si abbia una attenuazione con coefficiente di assorbimento pari a quello dei γ più penetranti.

Lo spessore di rame risulta di circa 14,2 cm, mentre lo spessore corrispondente al massimo dello sciame è di circa 4,2 cm. Pertanto, considerando una perdita di corrente pari al 10 % di quella totale, la potenza della radiazione γ all'uscita del tubo acceleratore sarà:

$$40 \times 10^8 \times 0,1 \times 0,2 e^{-0,025 \times 10 \times 8,9} \simeq 90 \text{ W.}$$

Poichè il coefficiente di assorbimento in aria è 0,02 cm^2/g , per un percorso massimo dei γ dell'or-

dine dei 10 m, equivalente a circa $1,3 \text{ g/cm}^2$, la frazione di energia persa in aria sarà $1 - e^{-0,02 \times 1,3}$ cioè circa il 2,6 %. Ne segue che la potenza dissipata in aria risulterà

$$W_\gamma = 90 \times 0,026 \approx 2,5 \text{ W.}$$

Assumendo che tutta questa potenza venga spesa in ionizzazione otteniamo una produzione pari a:

$$(3) \quad N_\gamma = \frac{2,5}{33 \times 1,6 \times 10^{-19}} \approx 5 \times 10^{17} \frac{\text{molecole}}{\text{dannose/sec.}}$$

2) **Convertitore inserito.** — Col convertitore inserito vengono convertiti in radiazione γ $0,2 \times 40 = 8 \text{ kW}$. Assumendo un percorso medio in rame di 15 cm, all'uscita del tubo acceleratore si ha una potenza di:

$$8 e^{-0,025 \times 15 \times 8,9} \approx 0,3 \text{ kW.}$$

Di questa ne verrà assorbita in aria soltanto una frazione pari al 2,6 %, e nella solita ipotesi che tutta l'energia dissipata in aria venga spesa in ionizzazione, otteniamo:

$$(4) \quad N_\gamma = \frac{7,8}{33 \times 1,6 \times 10^{-19}} \approx 1,5 \times 10^{18} \frac{\text{coppie di ioni}}{\text{sec}} = 1,5 \times 10^{18} \text{ molecole dannose/sec.}$$

In definitiva, la produzione di molecole dannose è data nella seguente tabella II.

TABELLA II

	Contrib. elettr. mol. dann. ($\frac{\quad}{\text{sec}}$)	Contributo γ mol. dann. ($\frac{\quad}{\text{sec}}$)	Prod. totale mol. dann. ($\frac{\quad}{\text{sec}}$)
Conv. inserito	$2,5 \times 10^{18}$	$1,5 \times 10^{18}$	4×10^{18}
Conv. non ins.	1×10^{18}	$0,5 \times 10^{18}$	$1,5 \times 10^{18}$

Nel seguito, per motivi di sicurezza, assumeremo come produzione totale quella più elevata.

Concentrazioni dannose e scarico.

La presenza di sostanze chimicamente attive comporta i seguenti problemi:

1) Se l'aria contiene vapori di acqua, le molecole di NO_2 possono formare vapori di acido nitrico, con possibilità quindi di attaccare i metalli.

2) Per poter accedere nel tunnel, una volta che la macchina sia spenta, i gas devono essere espulsi all'esterno di esso a mezzo di un opportuno sistema di ventilazione, fino a che la loro concentrazione sia ridotta a livelli inferiori ai massimi consentiti.

Le concentrazioni ammesse, come è stato già detto, sono di 0,1 ppm per l' O_3 e di 25 ppm per l' NO_2 . Poichè la composizione dell'aria è di una parte di ossigeno per 4 parti di azoto, se la concentrazione di O_3 è mantenuta al di sotto di 0,1 ppm la concentrazione di NO_2 potrà ritenersi trascurabile.

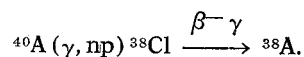
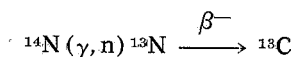
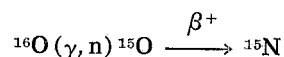
Nel nostro caso, dai calcoli eseguiti ci si deve attendere una produzione di molecole dannose non superiore a: 4×10^{18} mol/sec.

Essendo il volume del tunnel pari a circa 6×10^8 cc, vi saranno contenute circa $1,5 \times 10^{28}$ molecole d'aria. Poichè in media sono prodotte $0,8 \times 10^{18}$ molecole di O_3 per sec, si calcola facilmente che la concentrazione massima consentita viene raggiunta in un tempo pari a circa 20 minuti.

Ne segue che cambiando, ad esempio, l'aria del tunnel ogni 10 minuti, la concentrazione di gas tossici sarà certamente mantenuta al di sotto dei livelli consentiti. La portata della ventilazione risulterebbe pertanto: $Q \approx 60 \text{ m}^3/\text{min}$.

II) Produzione di ^{15}O , ^{13}N e ^{38}Cl .

Le attivazioni dell'azoto, dell'ossigeno e dell'argon avvengono per effetto delle seguenti reazioni:



I nuclidi ^{15}O , ^{13}N e ^{38}Cl decadono con periodi di dimezzamento di 2, 10 e 37 minuti rispettivamente.

Il numero di reazioni prodotte, detto $f(E)$ lo

spettro di energia dei γ che fuoriescono dall'acceleratore lineare, $\sigma(E)$ la sezione d'urto differenziale per la reazione in esame, X il percorso medio dei γ in aria, ρ la densità dell'aria, è dato da:

$$(5) \quad N(\gamma, n) = \rho \frac{N_o X}{A} f(E_p) \int \sigma(E) dE = \rho \frac{N_o X}{A} f(E_p) \sigma_{tot}$$

dove E_p è l'energia per la quale la sezione d'urto è massima.

Nella tabella III sono riportati alcuni dati che saranno utili nei calcoli che seguono:

TABELLA III (1)

Reazione	Prodotto di decadimento	$T_{1/2}$ (min.)	σ tot. (mb · MeV)	E_p (MeV)
$^{14}\text{N}(\gamma, n) \text{N}^{13}$	$\beta + (1,2 \text{ MeV})$	10	20	23
$^{14}\text{N}(\gamma, n) \text{N}^{13}$	$\beta + (1,7 \text{ MeV})$	2,1	130	24
$^{16}\text{O}(\gamma, n) \text{O}^{15}$	$\beta - (3,5 \text{ MeV})$	37	200	27
	$\gamma (1,5 \text{ MeV})$			

Poichè E_p è di circa la stessa per le tre reazioni, eseguiremo il calcolo per il solo valore di $E_p = 24 \text{ MeV}$.

Calcolo di $f(E_p)$ e della produzione di ^{13}N , ^{15}O e ^{38}Cl . — La produzione di γ di una data energia sarà diversa a seconda che lungo il tubo acceleratore sia inserito o meno il convertitore.

Nei due casi, supporremo che lo sviluppo della cascata elettromagnetica nel rame sia dovuto rispettivamente a $400 \mu\text{A}$ di elettroni da 90 MeV o a $10 \mu\text{A}$ da 400 MeV .

Per il calcolo dei γ da 24 MeV presenti dopo un certo spessore (nel nostro caso 10 r.l.), applicheremo la teoria degli sciami in modo da sopravvalutare la produzione dei γ .

Ciò posto, il numero di fotoni di energia tra E ed $E + dE$ presenti alla profondità di $t \text{ r.l.}$ prodotti da un elettrone incidente di energia E_o è dato da:

$$\gamma^{(\pi)}(E_o, E, t) dE = \left\{ \frac{H_\gamma^{(\pi)}(s)}{\sqrt{2\pi} [\lambda_1''(s)t + \frac{1}{2s^2}]^{1/2}} \right\} \frac{1}{\sqrt{s}} \left(\frac{E_o}{E} \right)^s \frac{dE}{E} e^{\lambda_1(s)t}$$

dove s è una variabile ausiliaria implicitamente definita dalla relazione:

$$t = -\frac{1}{\lambda_1'(s)} \left[\ln \frac{E_0}{E} - \frac{1}{2s} \right]$$

mentre le funzioni $\lambda_1(s)$, $\lambda_1'(s)$, $\lambda_1''(s)$, $H_\gamma^{(\pi)}(s)$ si trovano tabulate ⁽³⁾.

Nel primo caso si trova:

$$\gamma^{(\pi)} (90 \text{ MeV}, 24 \text{ MeV}, 10 \text{ r.l.}) \approx 3 \times 10^{-4} \text{ fotoni/el. MeV}$$

e quindi:

$$\begin{aligned} f_1(E_p) &= \frac{3 \times 10^{-4} \times 4 \times 10^{-4}}{1,6 \times 10^{-19}} = \\ &= 8 \times 10^{11} \text{ fotoni/sec. MeV.} \end{aligned}$$

Nel secondo caso invece si ricava:

$$\gamma^{(\pi)} (400 \text{ MeV}, 24 \text{ MeV}, 10 \text{ r.l.}) \approx 6 \times 10^{-3} \text{ fotoni/el. MeV}$$

e quindi:

$$f_2(E_p) = \frac{6 \times 10^{-3} \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-19}} = 4 \times 10^{11} \text{ fotoni/sec. MeV.}$$

Nei calcoli che seguono, assumeremo:

$$f(24) = 10^{12} \text{ fotoni/sec. MeV.}$$

Sostituendo nella (5) il valore trovato per $f(E_p)$ ed i valori della tabella III, assumendo per l'aria un peso atomico medio di 14,6 otteniamo per la produzione dei tre isotopi ^{13}N , ^{15}O e ^{38}Cl i seguenti valori:

$$\begin{aligned} N_N &= 0,9 \times 10^9 \text{ nuclidi/sec} \\ N_O &= 1,5 \times 10^9 \text{ nuclidi/sec} \\ N_{Cl} &= 0,6 \times 10^8 \text{ nuclidi/sec.} \end{aligned}$$

All'equilibrio i corrispondenti numeri di nuclidi sono:

$$\begin{aligned} N'_N &= 8,1 \times 10^{11} \\ N'_O &= 2,7 \times 10^{11} \\ N'_{Cl} &= 2 \times 10^{11}. \end{aligned}$$

Calcolo della dose dovuta a ^{13}N , ^{15}O e ^{38}Cl all'interno del tunnel. — Consideriamo separatamente i contributi dovuti alla inalazione dei gas radioattivi e all'irradiazione esterna degli stessi.

A questo scopo indichiamo con a_{N} , a_{O} ed a_{Cl} le attività (in disintegrazioni per sec e per litro) rispettivamente dell'azoto, dell'ossigeno e del cloro nell'aria. All'equilibrio si ha:

$$\begin{aligned} a_{\text{N}} &= 1,5 \times 10^3 \text{ disintegrazioni/sec. litro} \\ a_{\text{O}} &= 2,5 \times 10^3 \text{ disintegrazioni/sec. litro} \\ a_{\text{Cl}} &= 10^2 \text{ disintegrazioni/sec. litro.} \end{aligned}$$

Amnesso che i polmoni abbiano una capacità media di 3 litri e massa di 1 kg, e che l'attività dell'aria inalata sia uguale a quella dell'aria esterna, considerando che le energie messe in gioco per ogni disintegrazione, come risulta dalla tabella III, sono di 1,2 MeV per l'azoto, 1,7 MeV per l'ossigeno e 5 MeV per il cloro, otteniamo che la dose assorbita in un secondo dai polmoni è data da:

$$\begin{aligned} D_{\text{N}} &= 9 \times 10^{-6} \text{ erg/g} \\ D_{\text{O}} &= 2,1 \times 10^{-5} \text{ erg/g} \\ D_{\text{Cl}} &= 2,4 \times 10^{-6} \text{ erg/g.} \end{aligned}$$

La dose totale assorbita in un'ora risulta pertanto:

$$(6) \quad D = (D_{\text{N}} + D_{\text{O}} + D_{\text{Cl}}) 3600 = 1,2 \times 10^{-3} \text{ rad.}$$

Essa risulta quindi del 20 % inferiore alla massima ammissibile, che per i polmoni è, secondo le raccomandazioni dell'I.C.R.P. ⁽⁸⁾, di 4 rem in 13 settimane, cui corrisponde un valore di 7×10^{-3} rad/h per 40 ore settimanali.

Per ciò che riguarda la dose da irradiazione esterna, essa sarà massima sull'asse del tunnel e, ovviamente, a parità di nuclei attivati, risulterà minore di quella che si avrebbe al centro di una sfera di uguale volume.

Per motivi di semplicità, calcoleremo la dose al centro della suddetta sfera; essa sarà così sopravvalutata.

Due calcoli distinti debbono essere eseguiti per valutare il contributo alla dose totale dovuta a ^{13}N e ^{15}O e al ^{38}Cl . Questo per il fatto che il ^{38}Cl decade emettendo un γ ed un β^- , mentre il ^{13}N e il ^{15}O sono emettitori di β^+ .

Ovviamente per il calcolo della dose a distanza si dovrà tenere conto solo delle componenti più penetranti e cioè dei γ di annichilamento da 0,5 MeV del ^{15}O e del ^{13}N e dei γ da 1,5 MeV del ^{38}Cl .

La radiazione di annichilamento dovuta ad una sorgente di β^+ puntiforme, avente attività 1 Curie, provoca ad 1 metro di distanza una intensità di dose $D_{\beta^+}^*$ pari a ~ 600 mr/h ^(4, 6). Tenuto conto che nell'intervallo 0,5 ÷ 1,5 MeV la dose assorbita, a parità di flusso, è approssimativamente proporzionale all'energia della radiazione γ ⁽⁷⁾, possiamo assumere, per il decadimento del nuclide ^{38}Cl , $D_{\gamma}^* = 1800$ mr/h.

Se a_{β^+} e a_{γ} sono le concentrazioni in Ci/m³ degli emettitori β^+ e γ rispettivamente, l'intensità di dose al centro di una sfera di raggio R, risulterà:

$$(7) \quad D = \frac{4\pi a_{\beta^+} D_{\beta^+}}{\mu_{\beta^+}} (1 - e^{-\mu_{\beta^+} R}) + \frac{4\pi a_{\gamma} D_{\gamma}}{\mu_{\gamma}} (1 - e^{-\mu_{\gamma} R})$$

dove $\mu_{\beta^+} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ è il coefficiente di assorbimento dei γ di annichilamento in aria e $\mu_{\gamma} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ è il coefficiente di assorbimento dei γ di circa 1,5 MeV. Si ha nel nostro caso:

$$a_{\beta^+} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ Ci/m}^3$$

$$a_{\gamma} = 2,7 \times 10^{-6} \text{ Ci/m}^3.$$

Inoltre perchè il volume della sfera considerata sia lo stesso del tunnel, deve essere $(4/3)\pi R^3 = V_{\text{tunnel}}$ da cui $R = 5,25$ m. Sostituendo nella (7) otteniamo allora:

$$(8) \quad D = 5 \text{ mr/h.}$$

Questo valore si riferisce all'istante in cui la macchina cessa di funzionare. Esso decresce rapidamente col tempo a causa dei brevi periodi di dimezzamento del ^{15}O e del ^{13}N .

Problemi connessi con lo scarico dei gas tossici. — Vogliamo infine calcolare se la ventilazione necessaria per scaricare i gas tossici formati all'interno del tunnel, e di cui si è parlato in precedenza, generi, per la presenza di ^{15}O , ^{13}N e ^{38}Cl , un livello di radia-

zione pericoloso nelle immediate vicinanze del punto di scarico.

Per questo calcolo supporremo che i gas radioattivi espulsi vengano diluiti entro una semisfera con centro nel punto di scarico.

Sia ora $a(r)dV$ l'attività in un elemento di volume dV a distanza r dallo scarico.

Si ha per l'intensità di dose D in tale punto

$$(9) \quad D = D^* \int_0^{\infty} \frac{a(r)}{r^2} e^{-\mu r} dV = 2\pi D^* \int_0^{\infty} a(r) e^{-\mu r} dr.$$

Detta $a(0)$ l'attività nel punto di scarico, che assumeremo uguale a quella presente nel tunnel, alla distanza r si ottiene:

$$(10) \quad a(r) = a(0) e^{-\frac{t(r)}{\tau}}$$

dove τ è la vita media dell'elemento radioattivo e t il tempo impiegato dall'elemento di volume dV a percorrere la distanza r .

Indicata con Q la portata della ventilazione, la velocità v del nostro elemento di volume in un punto a distanza ρ dal punto di scarico, deve essere tale che: $2\pi v(\rho) \rho^2 = Q$ e quindi $v(\rho) = Q/2\pi\rho^2$.

Il tempo t impiegato dall'elemento di volume in questione per arrivare alla distanza r , sarà dato da:

$$(11) \quad t(r) = \int_0^r \frac{d\rho}{v(\rho)} = \int_0^r \frac{2\pi\rho^2 d\rho}{Q} = \frac{2\pi}{3} \frac{r^3}{Q}.$$

Per una valutazione grossolana del livello di radiazione supporremo che la concentrazione dei gas radioattivi sia uniforme, entro una sfera di aria di raggio R tale che: $t(R) = 3\tau$. Ammetteremo inoltre che essa sia pari a quella dell'aria del tunnel.

Poichè per l'ossigeno è $\tau_O = 3$ min, per l'azoto $\tau_N = 15$ min e per il cloro $\tau_{Cl} = 55$ min, essendo $Q = 60$ m³/min dalla (11) si ottiene: $R_O = 6,5$ m, $R_N = 13$ m, $R_{Cl} = 20$ m, e quindi:

$$(12) \quad D = 2\pi D^*_{\beta^+} a_O R_O + 2\pi D^*_{\beta^+} a_N R_N + 2\pi D^*_{\gamma} a_{Cl} R_{Cl} \approx 5 \text{ mr/h}$$

Conclusioni

In conclusione per ridurre le concentrazioni di O_3 e di NO_2 al di sotto dei massimi livelli ammissibili, risponde bene allo scopo una ventilazione della portata di $60 \text{ m}^3/\text{min}$. Le stessa ventilazione crea condizioni di sicurezza anche agli effetti della dose di cui possono essere responsabili il ^{13}N , il ^{15}O e il ^{38}Cl .

Pertanto il tunnel, se non vi fossero problemi di radioattività residua del materiale di cui è costituita la macchina, potrebbe essere occupato anche solo qualche istante dopo che l'acceleratore ha cessato di funzionare.

BIBLIOGRAFIA

- 1) De Staebler H. Jr. SLAC-TN62-9, 1962.
 - 2) Amman F., Andreani R. LNF 63/46, Nota Interna n. 206, 1963.
 - 3) Rossi B. High energy particles. Ed. Prentice Hall, 1962.
 - 4) Katz L., Cormack D. Saskatchewan Linac, Internal Report 2.
 - 5) Petree B. NBS Linac, Internal Reports, May 20, 1959.
 - 6) Petree B. NBS Linac, Internal Reports, Nov. 11, 1958.
 - 7) Price B. T. et al. Radiation Shielding. Ed. Pergamon Press, 1957.
 - 8) I.C.R.P. Report of Committee II. Ed. Pergamon Press, 1959.
-

