



Progetto TECHEA - Technologies for Health

WorkPackage WP2

Rapporto tecnico relativo alle misure sperimentali di caratterizzazione del sistema.

DELIVERABLE 3

Concetta Ronsivalle, Alessandro Ampollini, Maria Denise Astorino, Giulia Bazzano, Fabio Fortini, Paolo Nenzi, Luigi Picardi, Vincenzo Surrenti, Emiliano Trinca, Monia Vadrucci

FSN-TECFIS-APAM, Frascati

19/11/2021

INDICE

INTRODUZIONE	4
ATTIVITÀ SVOLTE NEL TERZO ANNO	5
1. Messa in operazione del cannone elettronico	5
2. Test di accelerazione del fascio di elettroni	7
3. Caratterizzazione del fascio accelerato: misura della dimensione trasversa e dell'energia.....	9
4. Montaggio del convertitore elettroni-X e produzione della radiazione X	11
5. Sviluppo del layout	15
BIBLIOGRAFIA	16

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Geometria degli elettrodi del cannone e traiettorie elettroniche. Le lunghezze sono in mesh units (mesh unit=0.1 mm).....	5
Figura 2. Immagine dell'oscilloscopio relativo alla misura della tensione applicata (traccia verde) e della corrente emessa dal cannone elettronico (traccia azzurra). : (a) Frequenza di ripetizione 10 Hz, V=14.25 kV, I=593 mA (b) Frequenza di ripetizione 100 Hz, V=10.5 kV, I=386 mA.....	7
Figura 3. Acceleratore lineare di elettroni durante i test di caratterizzazione del fascio in uscita.....	8
Figura 4. Immagine dell'oscillografo durante il test di accelerazione degli elettroni a Frip=100 Hz: Potenza riflessa (traccia magenta), tensione anodica del cannone elettronico (traccia verde), corrente iniettata (traccia celeste), corrente accelerata (tracce gialla).	8
Figura 5 Valori misurati della corrente all'uscita dell'acceleratore in funzione della corrente iniettata. Dati misurati e "fit" lineare.	9
Figura 6 Tre immagini della spot del fascio su rivelatore di tipo blue cellophane per tre diversi tempi di irraggiamento: 5,10,20 secondi.	9
Figura 7 Profili in orizzontale e in verticale misurati con sovrapposto fit gaussiano. La scala orizzontale è in mm. (a) misura con 5 secondi di irraggiamento, (b) misura con 10 secondi di irraggiamento. In entrambi i casi la frequenza di ripetizione è 10 Hz.....	10
Figura 8 Misura della curva di trasmissione in alluminio degli elettroni accelerati per la determinazione del range in alluminio	11
Figura 9 . Foto del linac seguito dal convertitore elettroni-X incluso lo schermo di piombo (chiuso). Sono visibili i canali di raffreddamento a liquido (tubi verticali) e ad aria (tubi orizzontali).....	12
Figura 10 Foto del linac seguito dal convertitore elettroni-X incluso lo schermo di piombo (aperto). Sono visibili i canali di raffreddamento a liquido (tubi verticali) e ad aria (tubi orizzontali).....	13
Figura 11 Pellicola gafcromica EBT3 irraggiata con raggi X a una distanza di 10 cm dalla sorgente. Durata dell'irraggiamento=10 secondi. Frequenza di ripetizione=100 Hz	13
Figura 12 Analisi dei profili di dose della GAF in figura 11: (a) profilo orizzontale,(b) profilo verticale	14
Figura 13 Layout attuale del dispositivo.....	15
Figura 14 Zona del linac nel layout attuale con schermatura di piombo: (a) schermatura completa chiusa (b) vista con schermatura del convertitore aperta.	15

Introduzione

Obiettivo del workpackage TECHEA-WP2 è lo sviluppo di un sistema prototipale per radioterapia basato su acceleratore lineare compatto di elettroni da 3 MeV, con generazione di raggi X secondari, per un efficace irraggiamento dei tumori al seno. La geometria del generatore compatto di raggi X consente lo sviluppo di un sistema di irraggiamento laterale ottimizzato attraverso un lettino attrezzato ove la paziente prona possa esporre la sola mammella al fascio di radiazioni ionizzanti, limitando così gli eventuali danni collaterali ai tessuti circostanti.

Le attività consistono nella progettazione esecutiva dell'apparato, nella sua realizzazione e nella effettuazione dei test sperimentali della radiazione prodotta in zona radioprotetta (bunker B5 del laboratorio APAM a Frascati)..

Il terzo anno di TECHEA-WP2 è stato dedicato alla messa in funzione della macchina in condizioni statiche, ai primi test di accelerazione del fascio di elettroni e di produzione dei raggi X. In particolare sono state svolte le seguenti attività tecnico-scientifiche:

1. Messa in opera del cannone elettronico
2. Primi test di accelerazione del fascio di elettroni
3. Caratterizzazione del fascio accelerato: misura della corrente, della dimensione trasversa e dell'energia del fascio di elettroni all'uscita dell'acceleratore
4. Montaggio del convertitore elettroni-X e test preliminari di produzione della radiazione X
5. Sviluppo del layout

Attività svolte nel terzo anno

1. Messa in operazione del cannone elettronico

Gli elettroni sono generati e pre-accelerati nel cannone elettronico che precede la struttura accelerante a radiofrequenza. E' stata effettuata la procedura di attivazione del catodo del cannone elettronico aumentando gradualmente la tensione sul filamento che riscalda la pasticca emittente (catodo a dispenser) e controllando il livello di vuoto nel cannone fino al raggiungimento della tensione di lavoro sul filamento di 6.2 Volt corrispondente a una temperatura di circa 1130°C. In queste condizioni la corrente emessa non dipende dalla temperatura ma unicamente dalla geometria del cannone e dalla tensione anodica applicata. In tale regime l'operazione del cannone è stabile. Il parametro che collega la corrente emessa alla tensione applicata è la Perveanza che è funzione unicamente della geometria del cannone (forma, e distanza degli elettrodi) definita come $P=I/V^{3/2}$. Riportiamo in figura 1 la geometria degli elettrodi del cannone elettronico e le traiettorie elettroniche calcolate tramite il codice numerico EGUN. Il catodo è sferico con un diametro di 3.4036 mm e un raggio di curvatura di 10.0076 mm. Le traiettorie elettroniche sono mostrate fino alla posizione del piattello di ingresso della prima cavità del linac (a 23 mm dal catodo). La perveanza calcolata è circa 0.3 μPerV .

ANALYSIS OF OUTPUT DATA FROM EGUN(C)1988 W.B. HERMANNSELDIT

0.528 A , COMPRESSION=6.7

ANALYSE

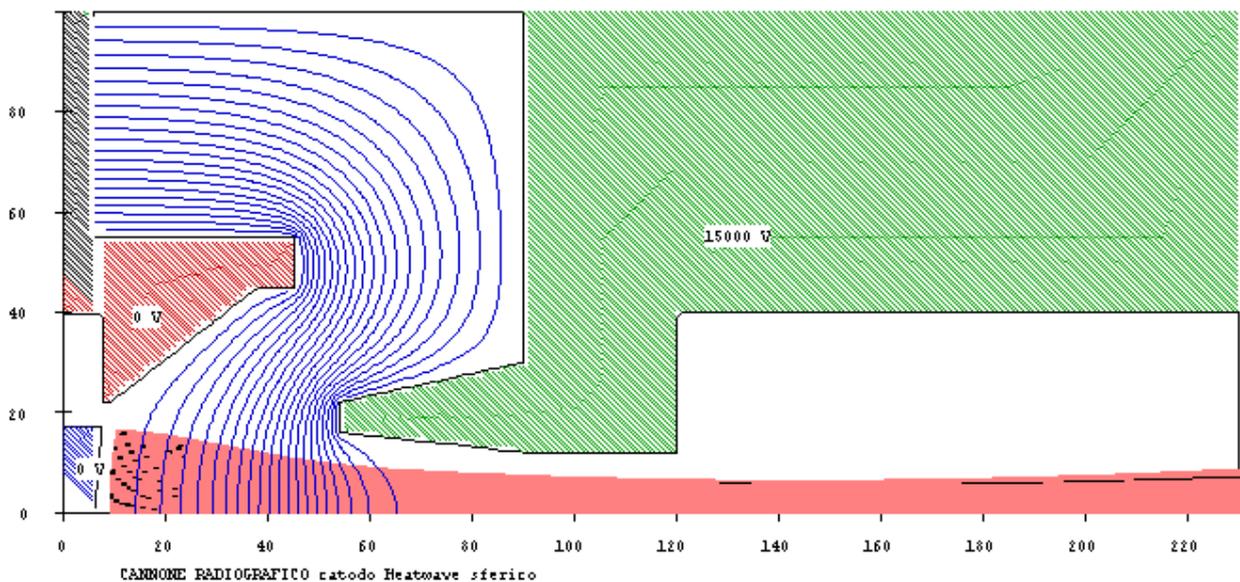


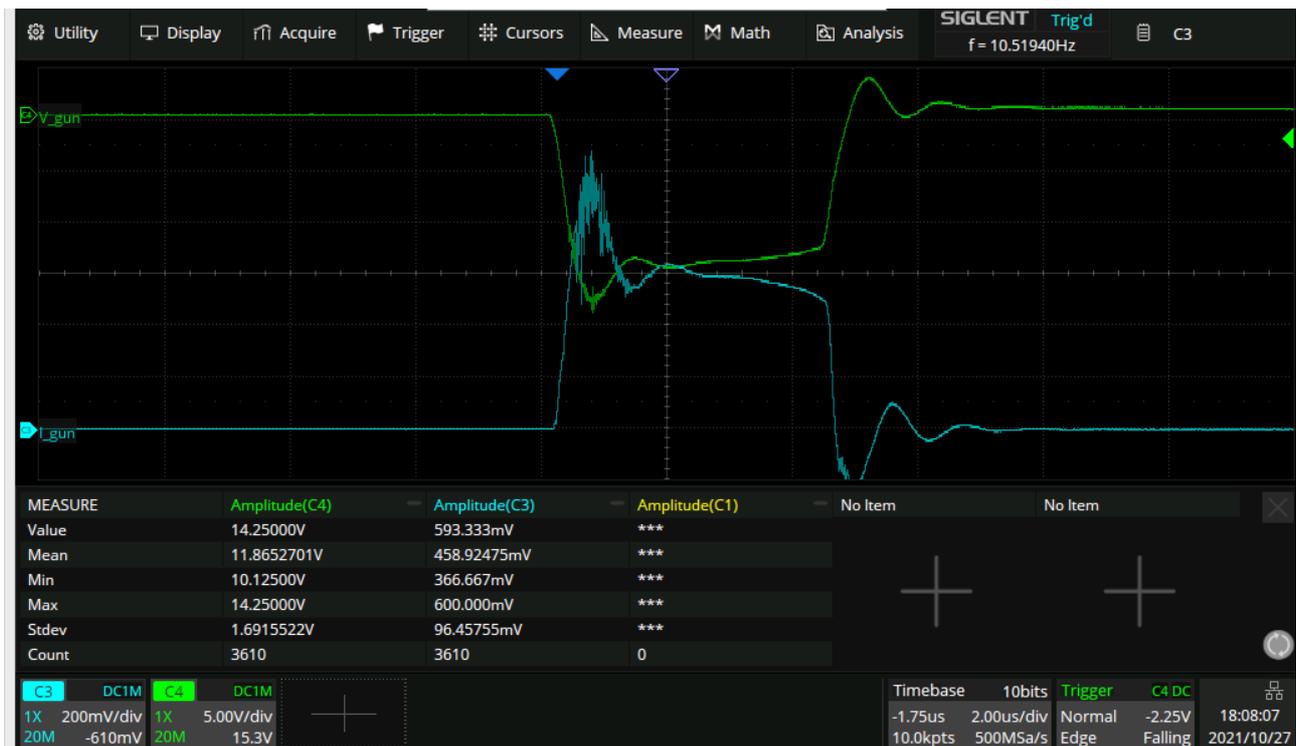
Figura.1. Geometria degli elettrodi del cannone e traiettorie elettroniche. Le lunghezze sono in mesh units (mesh unit=0.1 mm).

Una volta terminata la procedura di attivazione del catodo è stata effettuata una serie di misure nelle quali è stata applicata la tensione V ed è stata misurata la corrente emessa dal cannone tramite un toro di lettura (1V corrisponde a 1A) andando a verificare il valore e la stabilità della perveanza al variare della tensione applicata e della frequenza di ripetizione. Si riportano i risultati in tabella 1. Nelle figure 2a e 2b sono

mostrate le immagini dell'oscillografo corrispondenti a due dei casi riportati in tabella. Il valore misurato della Perveanza risulta stabile al variare dei parametri e in buon accordo con quello atteso.

TABELLA 1: Misure di caratterizzazione del cannone elettronico

Frequenza di ripetizione (Hz)	Tensione anodica (kV)	Corrente emessa dal cannone (mA)	Perveanza (μPerV)
100	10.5	386	0.36
70	12.3	480	0.35
50	13.75	567	0.35
40	14.25	593	0.35
30	14.25	600	0.35
25	14.25	600	0.35
10	14.25	600	0.35



(a)



(b)

Figura.2. Immagine dell'oscilloscopio relativo alla misura della tensione applicata (traccia verde) e della corrente emessa dal cannone elettronico (traccia azzurra). : (a) Frequenza di ripetizione 10 Hz, V=14.25 kV, I=593 mA (b) Frequenza di ripetizione 100 Hz, V=10.5 kV, I=386 mA

2. Test di accelerazione del fascio di elettroni

Dopo alcuni giorni di "conditioning" della struttura accelerante nei quali la potenza del generatore (magnetron) è stata portata al valore di operazione (circa 2.0 MW) sono stati effettuati i primi test di accelerazione del fascio di elettroni. La corrente degli elettroni accelerati è letta su una bandierina posta all'uscita dell'acceleratore. La figura 3 mostra l'acceleratore durante le misure di caratterizzazione del fascio direttamente all'uscita. In figura 4 è riportata l'immagine dell'oscillografo che mostra le tracce relative alla tensione del cannone V_{gun} (traccia verde), corrente prodotta dal cannone elettronico e iniettata nella struttura accelerante I_{gun} (traccia azzurra), potenza riflessa dalla struttura accelerante (traccia magenta), il segnale V_{out} proporzionale alla corrente accelerata in uscita dall'acceleratore I_{out} (traccia gialla). Il segnale della bandierina è chiuso su 50 ohm, per cui I_{out}=V_{out}/50. In questa misura la frequenza di ripetizione è 100 Hz (la massima frequenza di ripetizione richiesta da progetto). La durata temporale dell'impulso è 3.5 μsec. In questa misura la tensione sul cannone elettronico è V=11.6 kV, la corrente iniettata I_{gun}= 403 mA e la corrente accelerata I_{out}=V_{out}/50=5.23 [Volt]/50[ohm]=104.6 mA. La trasmissione di corrente ossia il rapporto tra la corrente uscita e la corrente iniettata è 0.26, di poco inferiore a quello calcolato dalla dinamica delle particelle come frazione di elettroni catturati e accelerati dal linac di 0.3. E' stato poi effettuato uno "span" di valori di corrente iniettata andando a misurare la

corrente accelerata (fig.5). Lo "span" è stato effettuato variando la tensione sul cannone elettronico in un range tra 11.6 e 14.6 KV.

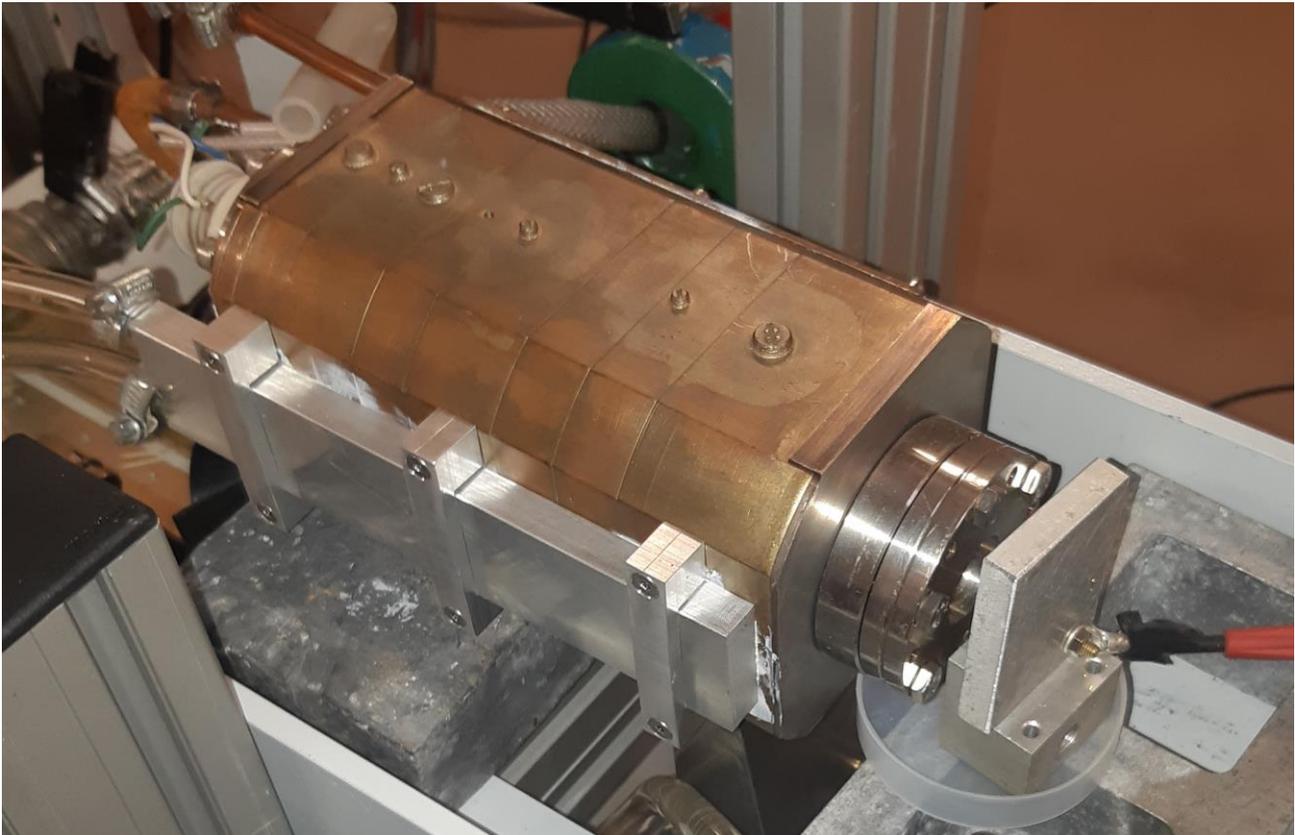


Figura.3. Acceleratore lineare di elettroni durante i test di caratterizzazione del fascio in uscita.

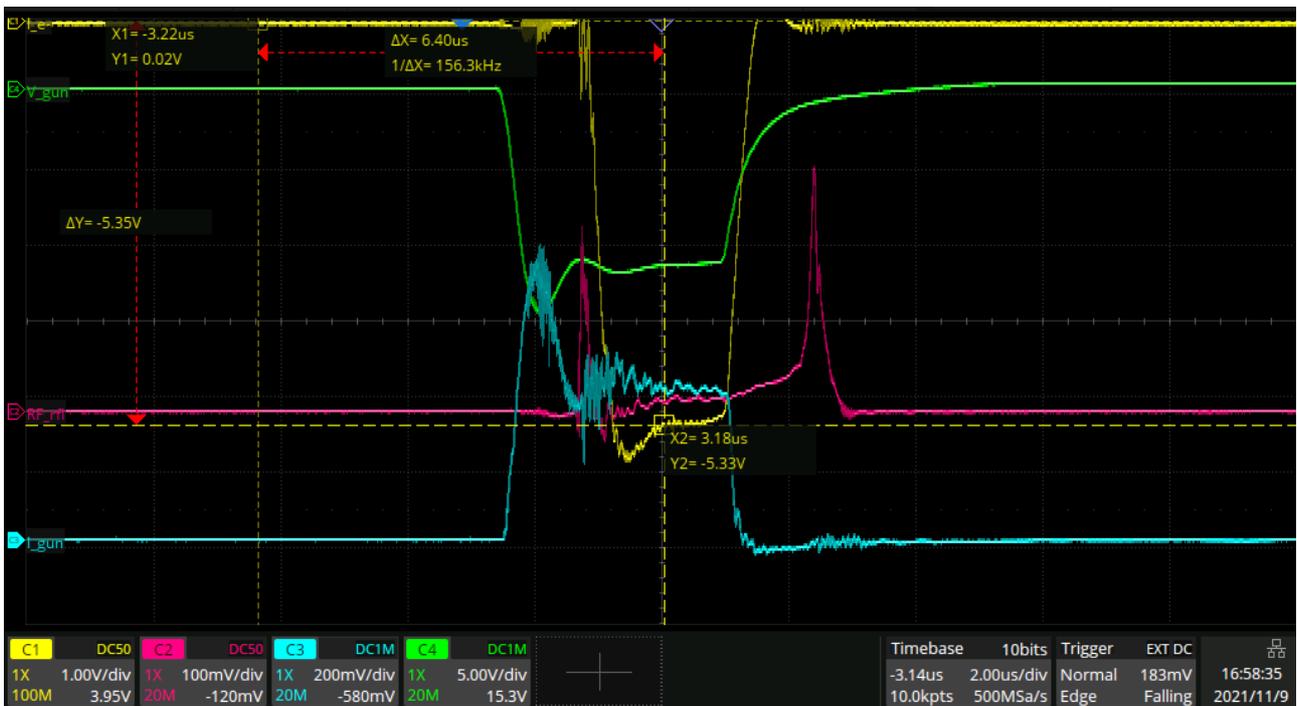


Figura 4. Immagine dell'oscillografo durante il test di accelerazione degli elettroni a Frip=100 Hz: Potenza riflessa (traccia magenta), tensione anodica del cannone elettronico (traccia verde), corrente iniettata (traccia celeste), corrente accelerata (tracci gialla).

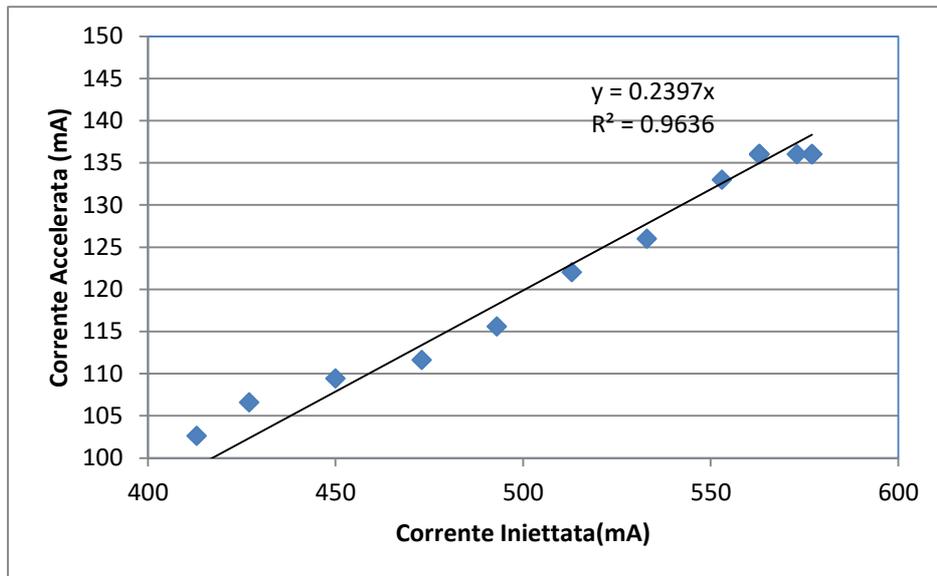


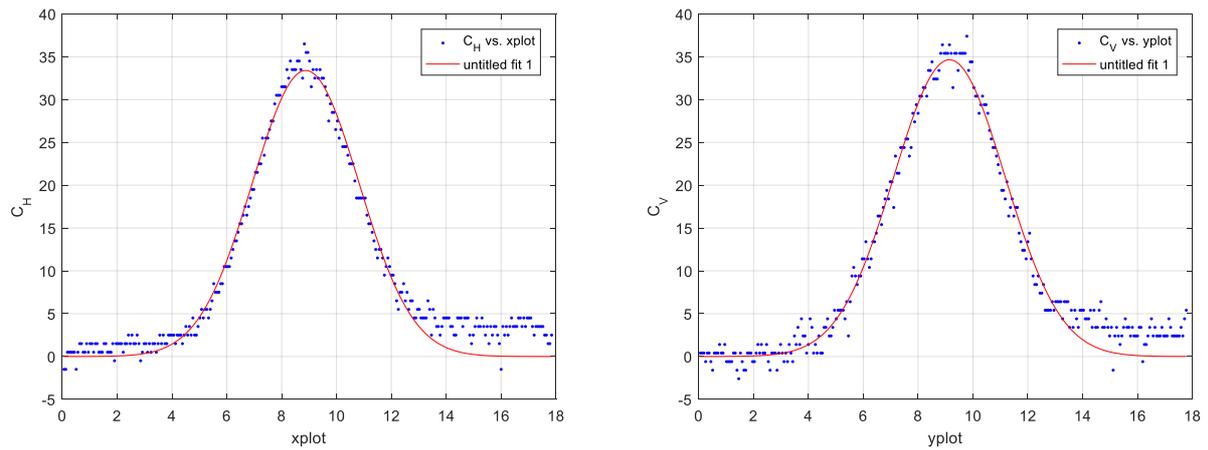
Figura 5. Valori misurati della corrente all'uscita dell'acceleratore in funzione della corrente iniettata. Dati misurati e "fit" lineare.

3. Caratterizzazione del fascio accelerato: misura di distribuzione trasversa ed energia

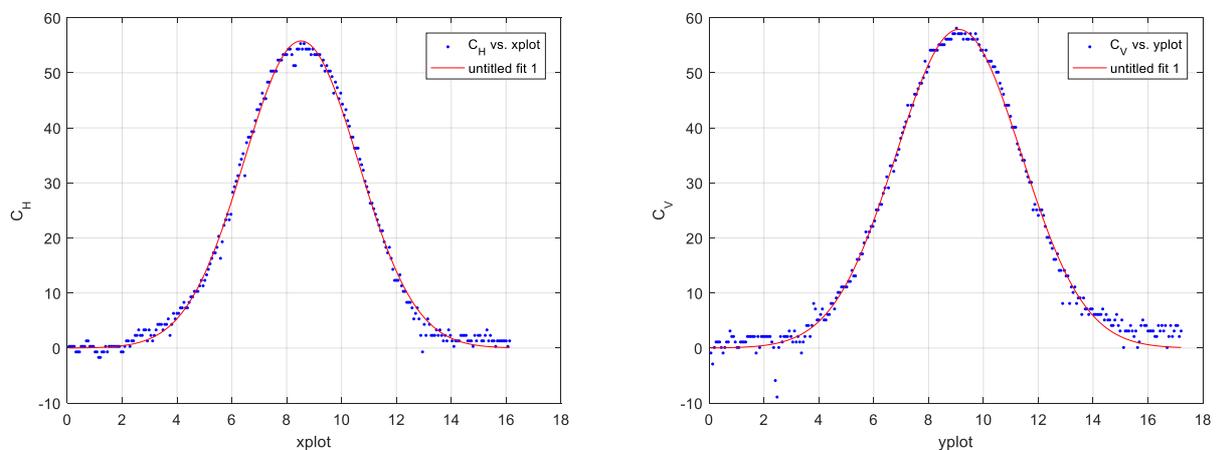
Il fascio in uscita dal linac è stato caratterizzato in termini di distribuzione trasversa. Per la distribuzione trasversa sono state utilizzate delle pellicole di tipo "blue cellophane". In figura 6 sono riportate le immagini della pellicola situata direttamente all'uscita del linac in tre diverse misure effettuate con tre diverse durate di irraggiamento 5,10,20 secondi. Le tre misure sono state effettuate a 10 Hz per evitare di saturare il rivelatore. L'immagine acquisita con lo scanner è stata analizzata per ricavare i profili trasversi. Il fit gaussiano fornisce per la prima misura $\sigma_x=1.95$ mm $\sigma_y=2.03$ mm, per la seconda misura $\sigma_x=2.1$ mm $\sigma_y=2.3$ mm. L'immagine della terza misura (20 secondi) risulta saturata.



Figura 6. Tre immagini della spot del fascio su rivelatore di tipo blue cellophane per tre diversi tempi di irraggiamento: 5,10,20 secondi.



(a)



(b)

Figura 7. Profili in orizzontale e in verticale misurati con sovrapposto fit gaussiano. La scala orizzontale è in mm. (a) misura con 5 secondi di irraggiamento, (b) misura con 10 secondi di irraggiamento. In entrambi i casi la frequenza di ripetizione è 10 Hz.

È stata effettuata la misura dell'energia media del fascio accelerato con il metodo descritto in [1], basato sulla misura del range in alluminio ricavato dalla curva di trasmissione di corrente ottenuta ponendo in uscita al linac spessori di dimensione crescente di alluminio e andando a misurare la corrispondente corrente trasmessa al di là dello spessore inserito fino al totale annullamento della corrente in uscita. In figura 8 è riportata la curva di trasmissione misurata da cui si ricava un valore del Range in alluminio di circa 5.5 mm.

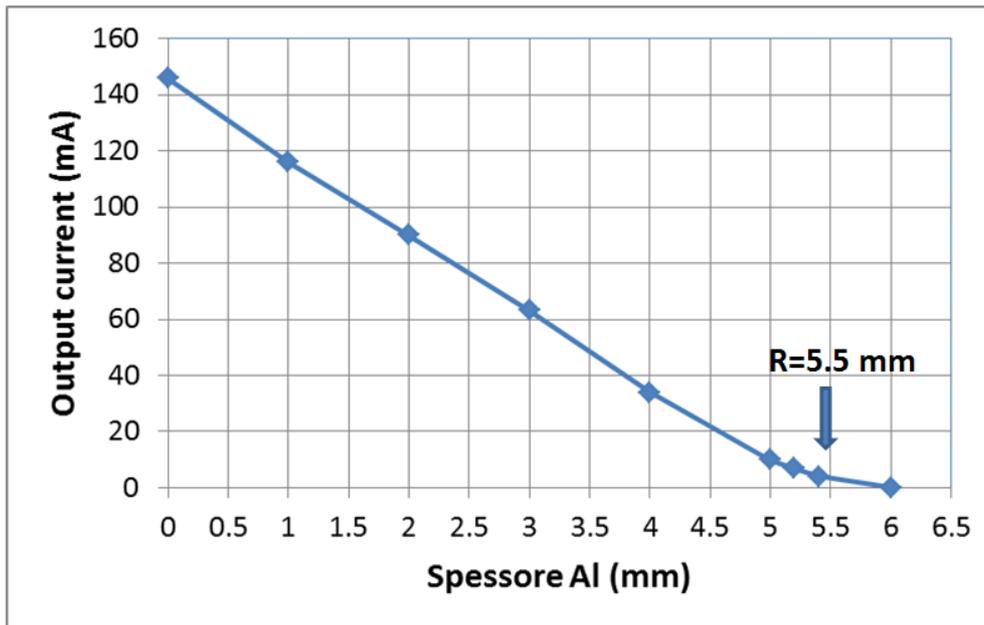


Figura 8. Misura della curva di trasmissione in alluminio degli elettroni accelerati per la determinazione del range in alluminio.

L'energia media è collegata al range dalla seguente relazione [1]:

$$E(\text{MeV}) = \frac{(0.27 R(\text{mm}) + 0.165)}{0.536} \quad (1)$$

Da questa relazione il Range misurato $R=5.5$ mm corrisponde a una energia di circa 3.08 MeV.

4. Montaggio del convertitore elettroni-X e test di produzione della radiazione X

E' stato realizzato il sistema di conversione del fascio di elettroni in radiazione X. La produzione di raggi X avviene tramite l'interazione del fascio di elettroni in uscita dall'acceleratore con un bersaglio costituito da un elemento ad alto Z, nello specifico tungsteno (radiazione di "bremsstrahlung"). Il bersaglio spesso 410 μm è incastrato in un disco di rame dallo spessore di 1.5 mm che ha lo scopo di bloccare gli elettroni emergenti dal tungsteno così da evitare che essi contaminino la radiazione prodotta. Poichè la densità di potenza sul bersaglio in condizioni di operazione è 50 W/mm^3 il bersaglio viene raffreddato, per cui il convertitore è munito di canali di raffreddamento a liquido e ad aria. Questi componenti sono seguiti da uno schermo di piombo all'interno del quale è praticato un cono di apertura angolare di 13.5 gradi che si estende per 10 cm in cui si espande la radiazione X. La scelta delle dimensioni del bersaglio di tungsteno, dello schermo in piombo e della sua apertura angolare fa riferimento a uno studio effettuato da IFO [2] basato su calcoli Montecarlo (programma FLUKA) per la ottimizzazione sia del convertitore sia della camicia completa esterna di piombo che ingloberà la stessa struttura accelerante, la regione del target e il "dump" finale. In figura 9 è mostrato il convertitore montato in uscita alla struttura accelerante e in figura 10 la foto

del sistema parzialmente scoperto, nella quale è visibile il cono di collimazione dei raggi X praticato nello schermo di piombo.

Sono state effettuati test preliminari di produzione di raggi X. La radiazione prodotta è stata misurata tramite pellicole GAFcromiche EBT3 poste all'uscita dello schermo di piombo da 10 cm di lunghezza mostrato nelle figure 9 e 10. Una relazione semiempirica che consente di valutare l'intensità della radiazione X misurata in rad/min a 1 metro di distanza dalla sorgente prodotta da un fascio di elettroni di corrente media $\langle I \rangle$ (espressa in μA) che incide su un bersaglio di tungsteno è data dalla seguente espressione [3]

$$I_X = 0.07 * E(\text{MeV})^n * \langle I \rangle \quad (2)$$

dove n dipende dall'energia e a 3 MeV vale 3.

La corrente media è data dalla corrente nell'impulso che viene misurata moltiplicata per la durata dell'impulso (3.5 μsec) e per la frequenza di ripetizione.

In figura 11 è riportata l'immagine acquisita allo scanner di una pellicola gafcromica tipo EBT3 posta alla fine dello schermo di piombo impiegata per la misura della dose prodotta dalla radiazione X. In questa misura la frequenza di ripetizione è 100 Hz, la durata dell'irraggiamento 10 secondi e la corrente misurata nell'impulso è 100 mA. Applicando la relazione (2) e tenendo conto del fatto che la dose si riduce con il quadrato della distanza il valore atteso a 10 cm dalla sorgente è 11 Gy in 10 secondi di irraggiamento.

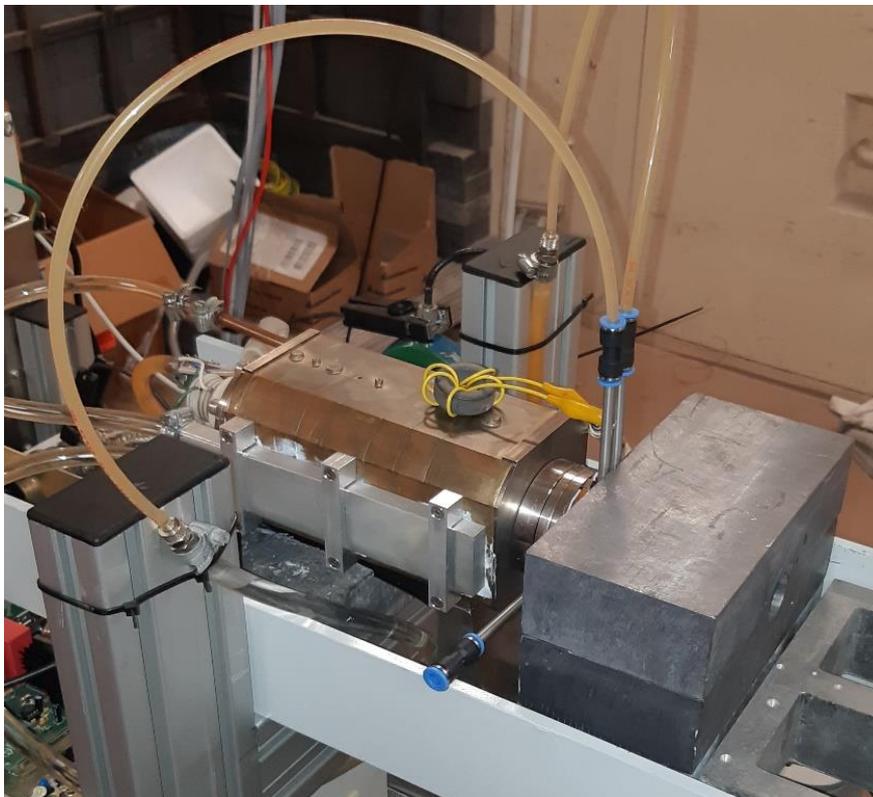


Figura 9. Foto del linac seguito dal convertitore elettroni-X incluso lo schermo di piombo (chiuso). Sono visibili i canali di raffreddamento a liquido (tubi verticali) e ad aria (tubi orizzontali).

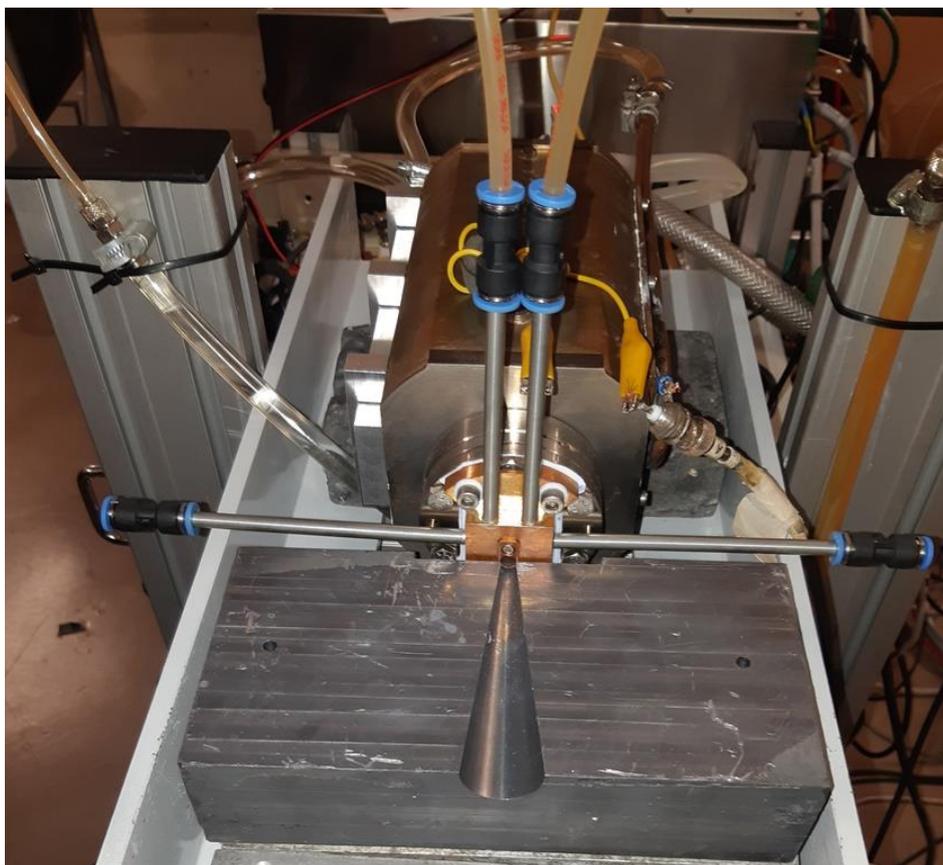


Figura 10. Foto del linac seguito dal convertitore elettroni-X incluso lo schermo di piombo (aperto). Sono visibili i canali di raffreddamento a liquido (tubi verticali) e ad aria (tubi orizzontali).

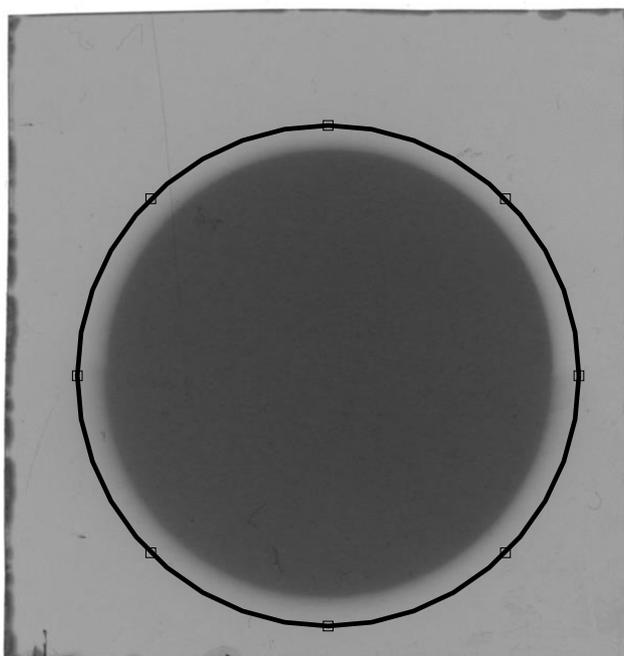
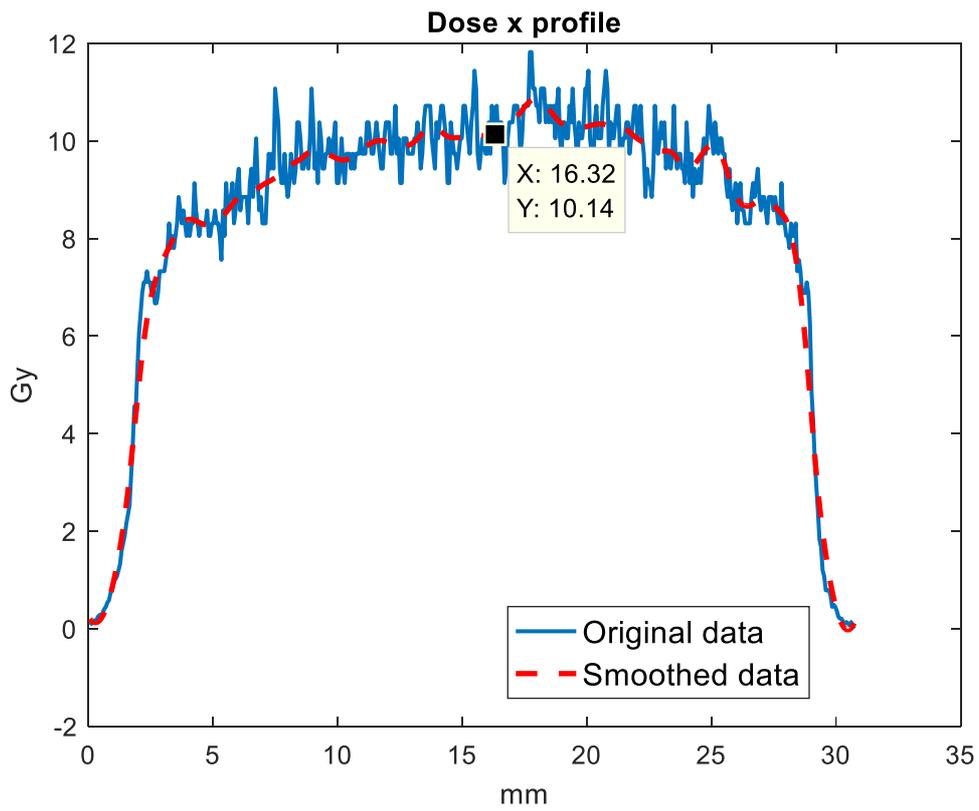
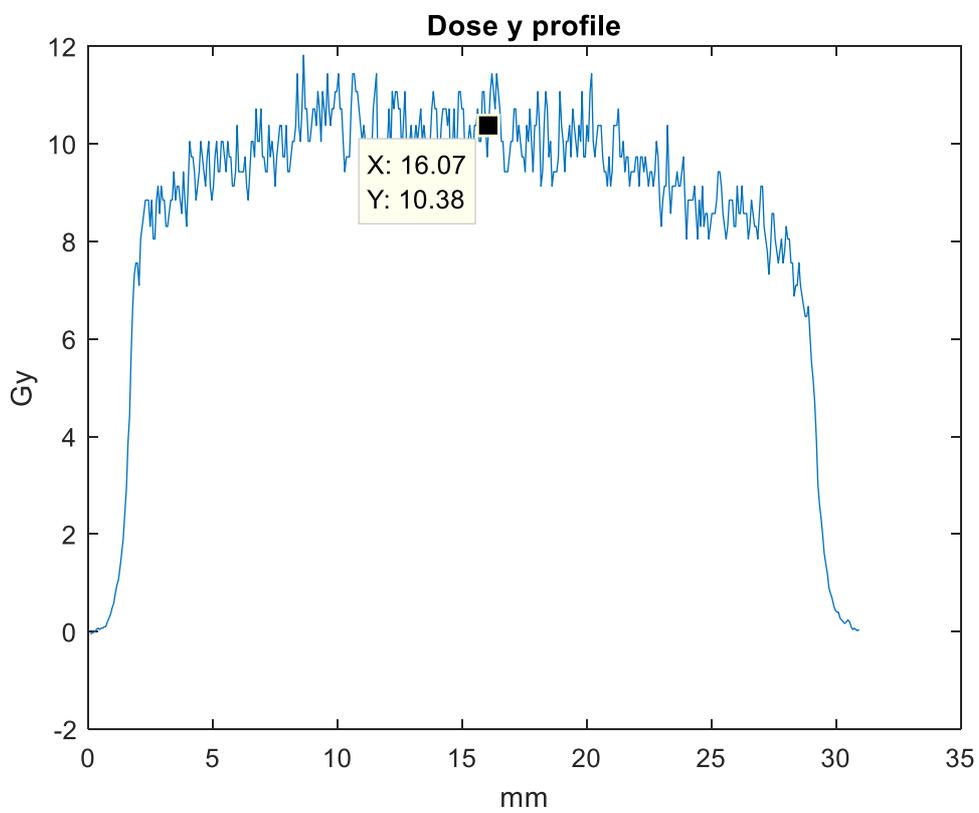


Figura 11. Pellicola gafcromica EBT3 irraggiata con raggi X a una distanza di 10 cm dalla sorgente. Durata dell'irraggiamento=10 secondi. Frequenza di ripetizione=100 Hz.



(a)



(b)

Figura 12. Analisi dei profili di dose della GAF in figura 11. (a) profilo orizzontale (b) profilo verticale.

5. Sviluppo del layout

La schermatura completa in piombo è attualmente in fase di montaggio ed è destinata a contenere la dose diffusa. Essa è composta da una serie di blocchi di piombo di dimensioni 5x10x20 cm ciascuno (peso del singolo blocco 11kg). La foto di figura 13 mostra lo stato attuale del layout.

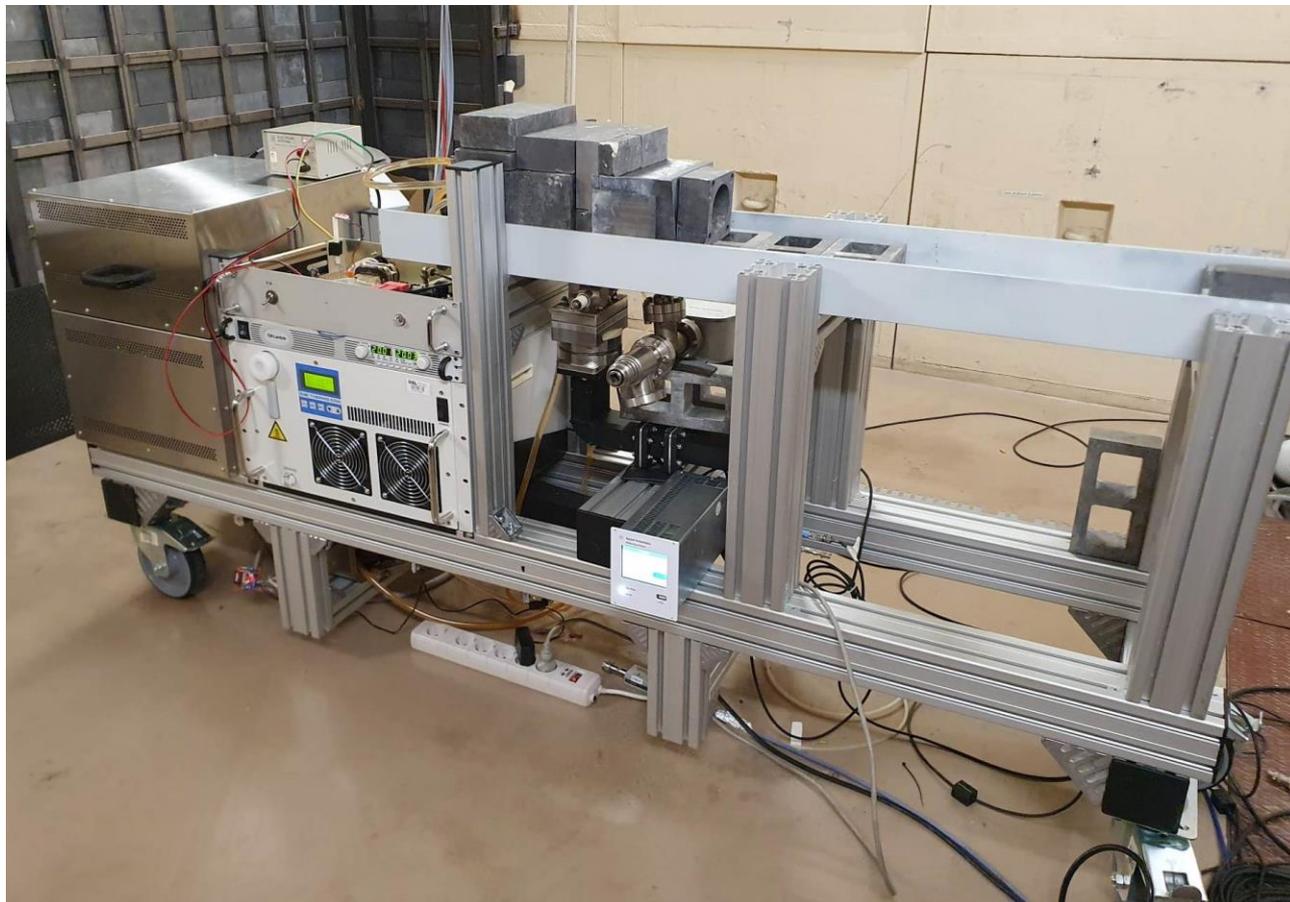
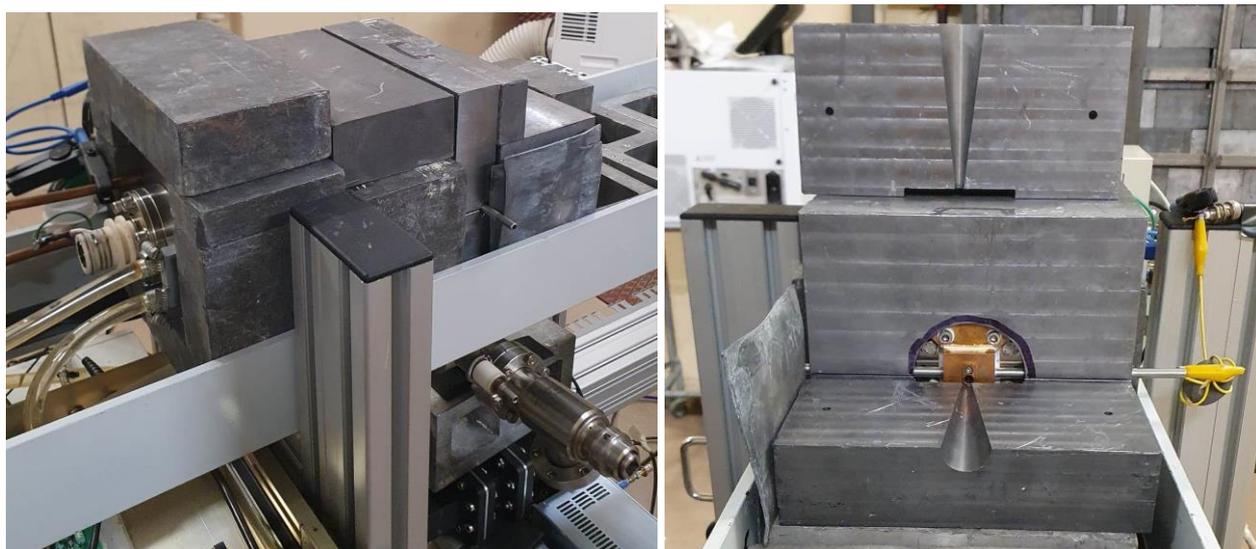


Figura 13 Layout attuale del dispositivo.

Le foto della figura 14 mostrano la zona del linac già completamente schermata.



(a)

(b)

Figura 14 Zona del linac nel layout attuale con schermatura di piombo: (a) schermatura completa chiusa (b) vista con schermatura del convertitore aperta.

Una volta completata la realizzazione e il montaggio della schermatura verranno effettuate misure sistematiche di dosimetria relative alla radiazione prodotta nella zona del target e di radiazione ambientale a cura del dell'IFO (Laboratorio di Fisica Medica e Sistemi Esperti). Nel terzo anno di attività è stata infatti parallelamente svolta tutta la procedura tecnico-amministrativa per l'affidamento da parte di ENEA a IFO del contratto relativo a tale attività.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Koichi Irie, Yoshibumi Minowa and Susumu Sawada, "A compact electron linac using side coupled structure", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 12, No. 2, February 1973
- [2] M. Cazzato " DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION USING MONTE CARLO SIMULATION OF A DEDICATED SYSTEM FOR BREAST RADIOTHERAPY ", Tesi di specializzazione in fisica medica; Co-advisors: Giuseppe Iaccarino e Antonella Soriani (IFO).
- [3] J. Haimson "Some aspects of electron beam optics and x-ray production with the linear accelerator", IEEE Transaction Nuclear Science 1962, p.32.