



Országos Atomenergia Hivatal

A HAZAI ORVOSI CIKLOTRONOK SUGÁRVÉDELMEÉNEK ÁTTEKINTÉSE

Sarkadi Margit, Vincze Árpád

Országos Atomenergia Hivatal, Budapest

Bevezetés

- Hazai orvosi ciklotronok:
 - Debrecen
 - Budapest
 - Kaposvár
- PET radioizotópok előállítására vonatkozó igény egyre nagyobb
- Negyedik orvosi ciklotron (Budapest) telepítése folyamatban

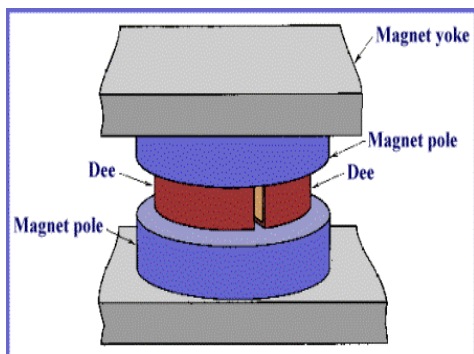
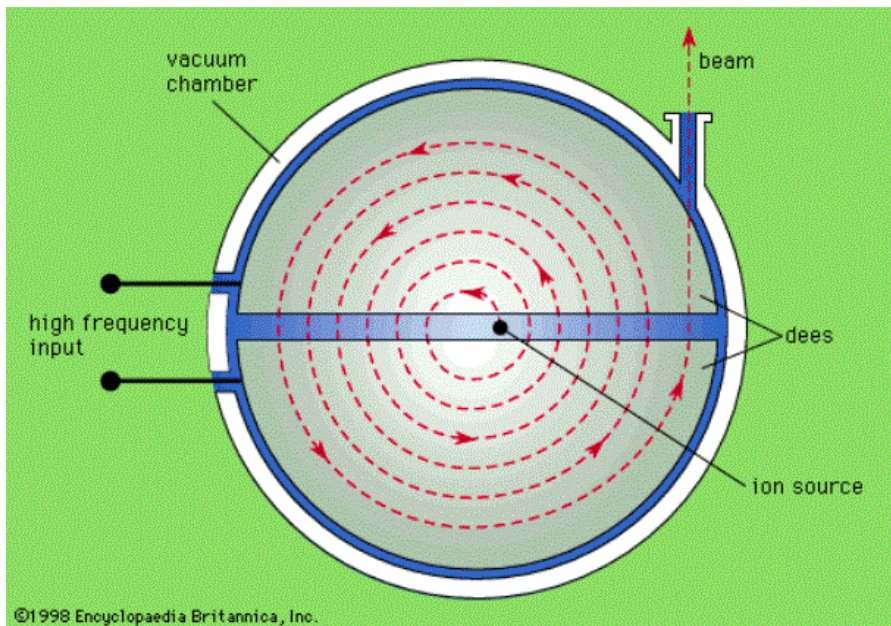
Mesterséges radionuklidok előállítása

- Atomreaktorban, hosszú idejű neutron besugárzással
(pl. $^{59}\text{Co} + n = ^{60}\text{Co}$, $^{98}\text{Mo} + n = ^{99}\text{Mo}$)
- Kiegett U fűtőelemek újra feldolgozásával
(pl. ^{131}I , ^{137}Cs , ^{241}Am)
- Gyorsítóban töltött részecskékkel történő besugárzással

A folyamat alkalmas

- neutronhiányos radioizotópok termelésére,
- orvosi ciklotron PET radioizotópok termelésére

Ciklotron

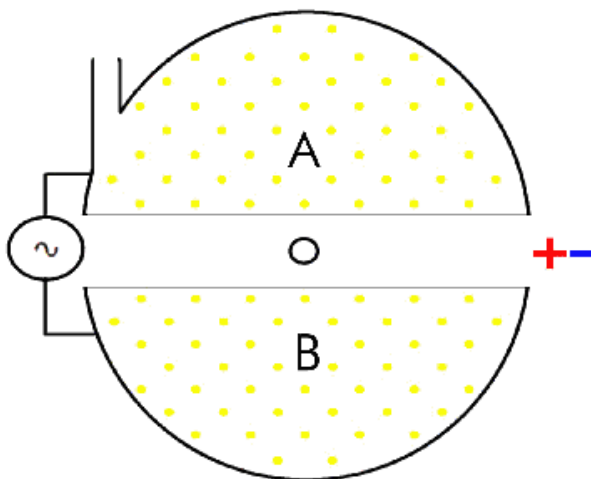


A ciklotron 4 részegysége

- Ionforrás
 - Középről
- Elektródok „Dees”
 - Nagyfrekvenciás váltófeszültség (RF)
- Mágneses tér
 - A gyorsítás síkjára merőleges
- Vákuumtér

Ciklotronok működése

Állandó frekvencia és mágneses tér



„Rezonanciafrekvencia”

– a váltakozó feszültség mindenegyes periódusában indíthatunk egy „részecske-csomagot” – küllőszerűen

- A körpályán való mozgásra bármely pillanatban igaz, hogy a centrifugális erő megegyezik a centripetális (Lorentz) erővel, azaz:

$$- q v B = m v^2 / r, \text{ ahol}$$

- m = részecske tömege
 - q = részecske töltése
 - v = részecske pillanatnyi sebessége
 - r = pillanatnyi távolság a centrumtól
 - B = mágneses tér nagysága
- Ebből a szögsebességre adódik:

$$- \omega = v/r = B q / m$$
 - Illetve a frekvenciára:

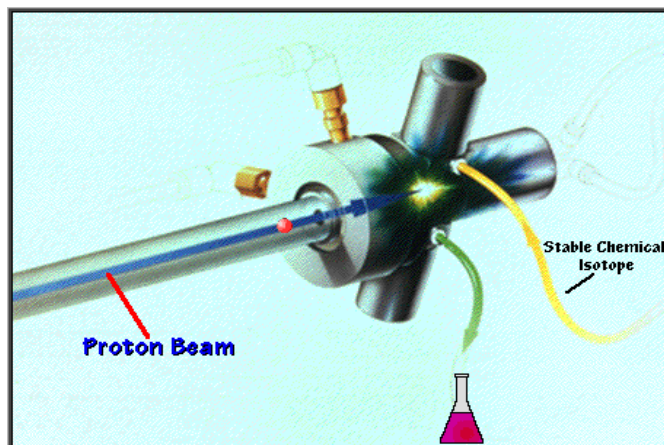
$$- f = \omega / 2\pi = B q / 2 m \pi$$

azaz a váltófeszültség frekvenciája állandó, nem kell hogy változzon a gyorsító sugara mentén!

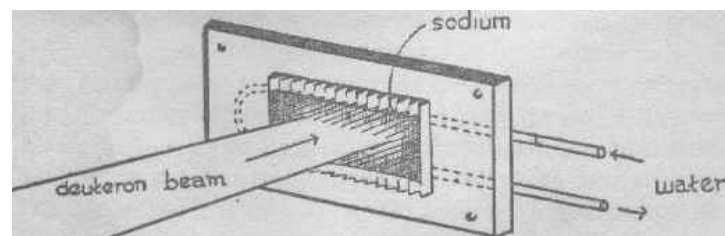
Targetek I.

➤ A hasznos magreakciók keltése itt történik:

- (p,n)
- (p,α)
- $(p,2n)$
- (d,n)



- Belső, vagy külső target
- Intenzív hűtés szükséges
- Jelentős hő fejlődik (~ 1 kW)
- Vékony fémfólián keresztül jut ki a nyaláb a vákuumtérből (külső target)



Targetek II.



■ Szilárd-target

Célizotóp **Célanyag**
 ^{111}In : ^{112}Cd (p,2n)

Kémiai forma
 In^{3+}

■ Folyadék-target

Célizotóp	Célanyag	Kémiai forma
^{18}F :	H_2^{18}O	F^-
^{13}N :	víz	NO_x , NH_4^-



■ Gáz-target

Célizotóp	Célanyag	Kémiai forma
^{18}F :	$^{18}\text{O}_2$ (0.4% F_2)	F_2
^{11}C :	N_2 (2% O_2)	CO_2
^{15}O :	$^{15}\text{N}_2$ (1% O_2)	O_2



PET radioizotópok előállítása és fizikai tulajdonságai

Radio-izotóp	Felezési idő (perc)	Pozitron energia (MeV)	Magreakció	Nyaláb kinetikus energiatartománya (MeV)
O-15	2	1.72	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$, $^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})^{15}\text{O}$	8 - 0 10 - 0
N-13	10	1.19	$^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$	16 - 7
C-11	20.4	0.961	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	13 - 3
F-18	110	0.635 (97%)	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(\text{d},\alpha)^{18}\text{F}$	16 - 3 14 - 0
Ga-68	68.3	1.90 (90%)	$^{69}\text{Ga}(\text{p},2\text{n})^{68}\text{Ge}$ $^{68}\text{Ga}(\text{generátor})$	22 - 13
Rb-82	1.3	3.35 (96%)	$^{85}\text{Rb}(\text{p},4\text{n})^{82}\text{Sr}$ $^{82}\text{Rb}(\text{generátor})$	60 - 40
Cu-64	12.7 (h)	0.653 (61%) ($1.675 \beta^-$)	$^{64}\text{Ni}(\text{p},\text{n})^{64}\text{Cu}$	18 - 8

Orvosi ciklotron PET radioizotóp termelése

Radioizotóp	^{15}O	^{11}C	^{13}N	^{18}F
Felezési idő (perc)	2,05	20,4	9,96	109,8
Magreakció	$^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$
Besugárzási idő	10 perc folyamatos	50 perc	10 perc	120 perc 120perc (dual)
Termék	$^{15}\text{O}_2$ (gáz)	$^{11}\text{CO}_2$ / ^{11}CO (gáz)	$^{13}\text{NH}_3$ (folyadék)	^{18}F (folyadék)
Tipikus targethozam	111 GBq (3 Ci)	74 GBq (2 Ci)	7.4 GBq (200 mCi)	370 GBq (10 Ci)

Hazai ciklotron típusok I.

Eclipse-család

Önárnyékolt típusok

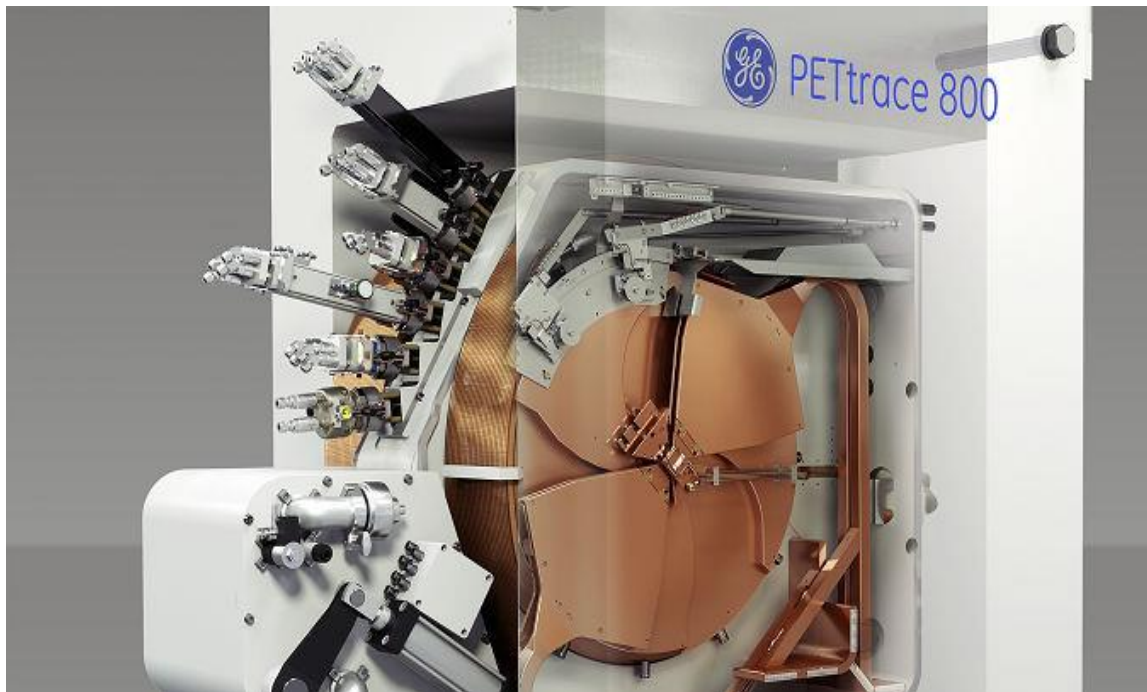


- Eclipse-HP
 - 11 MeV proton
 - 2 x 60 μ A nyalábáram
 - 2 külső nyalábvég (8 target)
 - Önárnyékolt



- Eclipse- RD
 - 11 MeV proton
 - 80 μ A nyalábáram
 - 2 külső nyalábvég (16 target)
 - Önárnyékolt

Hazai ciklotron típusok II.



GE PETtrace 800 ciklotron, Debrecen
16,5 MeV, H^+ és $^2H^+$ nyaláb, önárnyékolás nélkül

Sugárvédelmi tervezés szempontjai

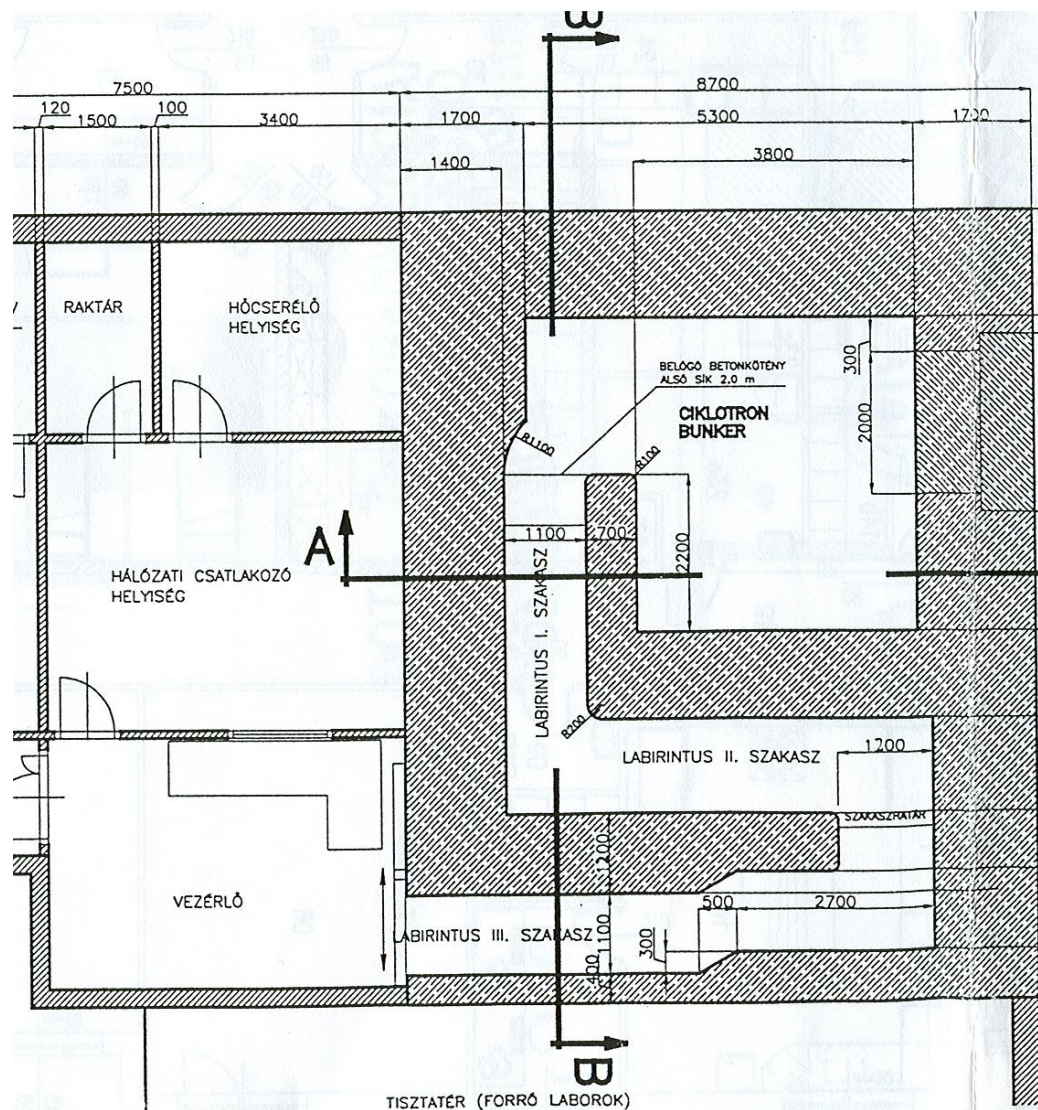
Tervezési dóziscélok:

- foglalkozási kategóriára vonatkozó tervezési dóziscél a dóziskorlát tizedrésze, azaz 2 mSv/év effektív dózis. Időarányos része 40 μ Sv/hét
- lakossági kategóriára vonatkozó tervezési dóziscél a vonatkozó dóziskorlát 3/10 része, azaz 0,3 mSv/év effektív dózis. Időarányos része 6 μ Sv/hét

Sugárvédelmi árnyékolás I.

Önárnyékolás nélküli ciklotron
besugárzó bunkerének
sugárvédelmi kialakítása

170 cm betonfalak
Hosszú, sokfordulós
labirintus



SIEMENS (korábban CTI) ECLIPSE-HP típusú orvosi ciklotron

Az árnyékolásokkal körbevett ciklotron és vezérlőszekrénye



- A berendezés saját árnyékolása annyira hatékony, hogy a ciklotron terembe üzemelés alatt is be lehet lépni.
- A teremben a gamma és a neutron sugárzás dózisteljesítménye átlagosan $10 \mu\text{Sv/h}$, maximum $20 \mu\text{Sv/h}$ körül mérhető.
- Nincs szükség bejárati labirintusra. A betonfalak 40-50 cm vastagok.
- A kisserelt target alkatrészek gamma sugárzása ellen árnyékolással történő védekezés.
- A felaktiválódott alkatrészek tárolása a ciklotron teremben kialakított, padlóba süllyesztett tárolóhelyen.

Kibocsátás

- A ciklotron radiokémia részlegről minden folyadék, ami a technológiai folyamatok miatt radioaktivitással szennyeződhet, a gyűjtő-tároló tartályban történő legalább 1 napig tartó átmeneti tárolás után bocsátható csak ki.
- A leghosszabb felezési idejű F-18 esetében is 1 nap alatt az aktivitás 4 nagyságrendet csökken. A kibocsátott szennyvíz aktivitáskoncentrációját mintavételezéssel ellenőrzik.
- Az eltávolított levegőben jelentkező nagyon alacsony radioaktivitás koncentrációját is folyamatosan ellenőrzik.
- A rendszerben megjelenő aktivitások egy kisebb része zárt körülmények között, a fejlesztő és termelő kamraterében keletkezik. A fülkék légelvezető csővezetékeit a meglevő, a főépület tetőszint fölé kivezető légcsatornájába csatlakoztatják, s azon át engedik ki a szabad külső légtérbe.

Radioaktív anyag gyártás munkafolyamatának sugárvédelmi mérése OAH ellenőrzési jegyzőkönyv alapján

Elvégzett mérések a CIKLOTRON helyiségében:	
• Berendezés megnevezése:	SIEMENS gyártmányú ECLIPSE RD CIKLOTRON
• Mérésre használt, műszerek CIKLOTRON helyiségben	LT405 típusú kijelző egységre telepített BERTHOLD gyártmányú LB6720 típusú ionizációs kamra gamma dózisteljesítménymérő, LB6411 típusú neutron-dózisteljesítménymérő műszer
• Mérésre használt, műszerek CIKLOTRON VEZÉRLŐ helyiségben	LT405 típusú kijelző egységre telepített BERTHOLD gyártmányú LB6360 típusú ionizációs kamra gamma dózisteljesítménymérő műszer
• Mérési körülmények:	gyártás alatt
Háttérsugárzás gamma:	0,1 [$\mu\text{Sv/h}$]
Háttérsugárzás neutron:	0,00 [$\mu\text{Sv/h}$]
1. CIKLOTRON helyiségben védelem mögött 1m távolságban	γ : max.:4,8 [$\mu\text{Sv/h}$]
2. CIKLOTRON helyiségben védelem mögött 1m távolságban	n: max.:4,5 [$\mu\text{Sv/h}$]
3. CIKLOTRON vezérlőben munkaasztalnál	γ : max.: 0,4 [$\mu\text{Sv/h}$]

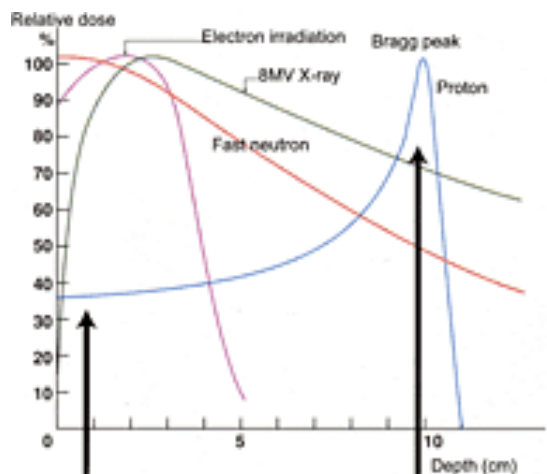
Radioaktív anyag gyártás munkafolyamatának sugárvédelmi mérése GE PETtrace 800 ciklotronban

- F-18 besugárzás közben
 - a Ciklotron vezérlő számítógép előtt: $0,2 \mu\text{Sv/h}$
 - a Ciklotron melletti "Kislabor"-ban: $0,3 \mu\text{Sv/h}$
 - a ciklotron mellett a bunkerben: $150\text{-}180 \text{ mSv/h}$!
- Besugárzás után 1 órával:
 - a Ciklotron vezérlő számítógép előtt: $0,1 \mu\text{Sv/h}$
 - a Ciklotron melletti "Kislabor"-ban: $0,2 \mu\text{Sv/h}$
 - a ciklotron mellett a bunkerben: $600\text{-}700 \mu\text{Sv/h}$
- Háttérsugárzás: $0,1 \mu\text{Sv/h}$

Következtetések

- Megállapítható, hogy a hazai orvosi ciklotronok sugárvédelme megfelelő, ezt az OAH mérési adatai is alátámasztják
- Az orvosi ciklotronok munkahelyeinek sugárvédelmi tervezése és kivitelezése megfelel a sugárvédelmi követelményeknek és a MSZ 62-7:2017 szabványnak
- Az elvégzett munkahelyi sugárvédelmi mérések alapján a tervezési dóziscél alatti értékeket mutatnak.
- Mind a foglalkozási, mind a lakossági kategóriára vonatkozóan megvalósul a tervezési dóziscél

KÖSZÖNÖM A MEGTISZTELŐ FIGYELMET!



Előrevetítve a jövőt (proton és neutron terápia)!