

tatásban. A készülék tulajdonságainak ismeretében nagy jelentőségű sugárfizikai, sugárbiológiai, biofizikai és ipari kutatások végezhetők. Részünkről a mai találkozón egyik legjelentősebb mondanivalónk éppen az, hogy a betatron kutatók nemzedékei számára nyújt kedvező kutatási lehetőséget mind a fundamentális kutatásban, mind a klinikai kutatásokban. Feladatunknak tekintjük azt is, hogy a fundamentális és klinikai kutatások közötti összefüggéseket minél szorosabbra fűzzük.

Nagy energiájú röntgen és elektron sugárzások előállítása

(Bozóky László, Országos Onkológiai Intézet)

A sugárterápia több mint fél évszázados problémája a mélyen fekvő daganatok kellő dózisu besugárzása. Minthogy a röntgen sugárzás keménységének a növelésével a százalékos mélydózis értékek emelkednek, a röntgenológusok kezdettől fogva igényelték az egyre nagyobb és nagyobb csúcsfeszültségű röntgen berendezéseket. Már a 30-as évek során nyilvánvalóvá vált azonban, hogy a leküzdhetetlen szigetelési nehézségek következtében a félmillió voltos feszültség egy olyan határértéknek tekinthető, amelyet a klasszikus röntgencső típusoknál gyakorlatilag nem lehet túllépni.

A Kerst-féle betatron-elv megvalósítással azonban a 40-es években a sugárterápia régi igénye teljesíthetővé vált: körkörös elektron gyorsítás révén a szigetelési nehézségek megkerülésével szinte tetszés szerinti energiájú röntgen sugárforrást sikerült a betegbesugárzások céljaira kifejleszteni. Sőt ezen túlmenően a további kísérletek arra az eredményre vezettek, hogy ugyanebből a készülékből a nagy energiájú elektron nyaláb is kihozható a szabad levegőre és ez sok esetben sokkal előnyösebben használható a daganat besugárzások céljaira, mint az azonos energiájú fékezési röntgen sugárzás.

Amíg ugyanis a röntgen sugárzás esetén az energiától függő testmélységben bekövetkező dózis maximum után a mélydózis görbe csak igen lassan csökken, tehát a daganat mögötti testrészeket is a daganaténál csak alig kisebb dózissal szükség szerint terhelünk kell, addig az elektron sugárnyalábnál a dózis maximum elérése után a mélydózis görbe igen meredeken hirtelen zérusra esik le és a mögöttes testrészeket már csak a testben lefékeződő elektronok által keltett, több nagyságrenddel kisebb intenzitású fékezési röntgen sugárzás terheli.

Az Országos Onkológiai Intézetben 1971-ben kezdődött meg a szovjet gyártmányú 25 MeV-os betatron üzemeltetése, melyet a közgyűlés igen tisztelt résztvevőinek alkalmuk lesz részletesen megnézni.

A betatron működését röviden a következőkben foglalhatjuk össze. A betatron lényegében véve egy olyan röntgen készülék, amelynek két legfontosabb alkotó eleme, a nagyfeszültségű transzformátor és a röntgencső egyetlen egységben van egyesítve oly módon, hogy a transzformátor szekunder tekercse helyébe maga a gyűrű alakú speciális röntgencső kerül. Így a transzformátor primer tekercsére bevezetett váltakozó áram nem a sok menetű szekunder tekercsben indukálja a nagyfeszültségű áramot – amelynek a röntgencsőhöz való vezetése és magának a röntgencsőnek a kiképzése az említett szigetelési problémákat veti fel – hanem bent a gyűrű alakú röntgencső vákuum terében. Ilyen módon a nagyfeszültségű szigetelési problémák egyáltalán fel sem lépnek.

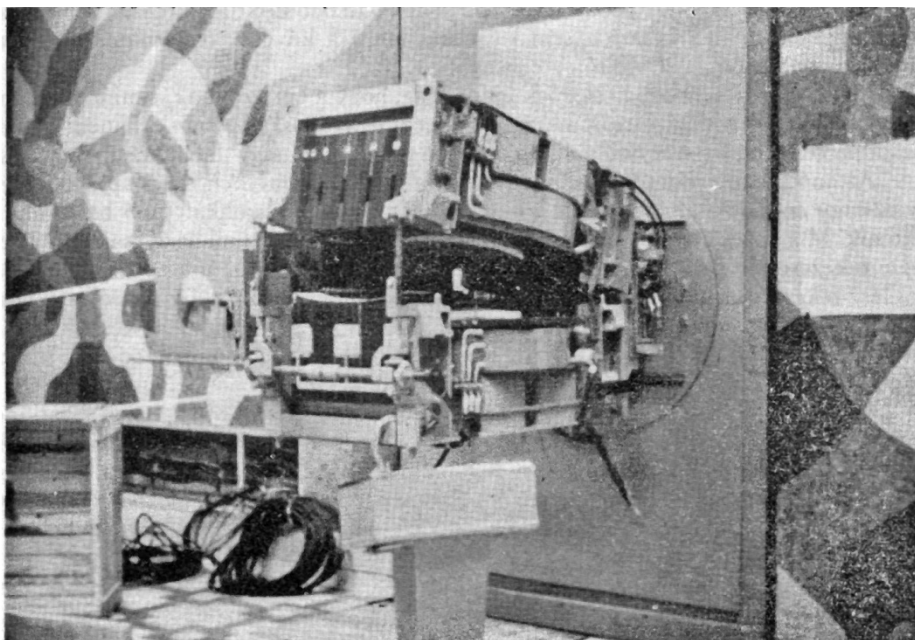


2. ábra. A komplett 25 MeV-es betatron a besugárzó asztallal és beállító pulttal

Betatronunknál a mintegy 60 cm átmérőjű gyűrű alakú röntgencsőbe 60 kV-os feszültséggel tangenciálisan lőjük be a közönséges röntgencsővekhez hasonlóan izzószál által termelt elektronokat. A röntgencső egy nagy elektromágnes sarkai közé van behelyezve úgy, hogy a mágneses erővonalak merőlegesek a gyűrű alakú röntgencső síkjára. A mágneses tér a belövellt elektronokra irányítólag hat és azokat a vákuum gyűrűben körmozgásra kényszeríti. Az e töltésű és v sebességgel repülő elektron a körgyűrű r sugarának megfelelő körpályán kering, ha a ráható centrifugális erőt: mv^2/r a mágneses erő: $e v H$ (H a mágneses térerősség) kompenzálja, azaz a két egymással ellentétes irányú erő abszolút értéke egymással egyenlő

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = e \cdot v \cdot H$$

Ez az elektron gyűrű képezi jelen esetben a transzformátor szekunder tekercsét. Ha bekapcsoljuk a transzformátor primer tekercsébe az 50 periódusos váltakozó áramot,



3. ábra. A 25 MeV-es szovjet betatron szétnyitott mágnes pófái a köztük elhelyezett cirkuláris elektron-gyorsítóval

ez a körgyűrű síkját középen átdöfő vasmagban váltakozó mágneses fluxust létesít, amely a körülötte keringő elektronokra éppúgy gyorsítólag hat, mint a közönséges transzformátor szekunder tekercsében lévő elektronokra.

A váltakozó áram első negyed periódusában a mágneses fluxus folyamatosan nő, ami az igen kis tömegű elektronokat rövid idő alatt igen nagy sebességre, közel fénysebességre gyorsítja fel. Az $1/4$ -ed periódusnak megfelelő $1/200$ másodperc alatt az elektronok több százezerszer körbefutva, sok száz km utat tesznek meg és igen nagy kinetikai energiát nyernek. Természetesen fenti egyenletünknek megfelelően az egyre nagyobb sebességgel száguldó elektronokat csak egyre erősödő mágneses tér tudja ugyanakkora sugarú körpályán megtartani, tehát az irányító mágneses tér tekercsége is ugyanazt a váltakozó áramot kell bevezetnünk: a gyorsító és irányító mágneses térnek egymással összhangban kell változniuk.

A betatron tehát egy olyan transzformátornak is tekinthető, melynek rendkívül nagy menetszámú szekunder tekercse van (a menetszám azonos az elektronok körbefutásának a számával) és amely ennek következtében igen nagy feszültségű, akár több száz millió voltos elektronokat képes szolgáltatni anélkül, hogy szigetelési problémák merülnének fel.

Az első negyed periódus végén az elektronok elérik maximális sebességüket és maximális energiájukat. Ekkor az irányító mágneses tér hirtelen kikapcsolásával az elektron gyűrűből a centrifugális erő hatására az elektronok tangenciálisan kirepülnek és vagy az elektron gyűrű közelében, a gyorsító csőbe beépített arany, ill. wolfrám lemezeknek ütközve fékezési röntgen sugárzást keltenek, vagy egy vékony ablakon át a csőből maguk az elektronok lépnek ki a szabad levegőre. A röntgen, illetve elektron emisszió kb. 4–5 mikroszekundumig tart. Ezután a periódus még hátralévő három-

negyed részében, kereken 4000-szer annyi ideig – 20 000 mikroszekundumig – a csőben nyugalom van, a betatron sem sugárzik, majd a következő periódus elején az egész folyamat kezdődik előlről.

Lényeges momentum az előzőek alapján az, hogy a betatron akár mint röntgen-, akár mint elektron sugárforrást használjuk, nem folytonosan sugárzik, hanem csupán másodpercenként 50-szer szolgáltat egy-egy igen rövid, nagy intenzitású sugárzást.

Az anód lemez hűtésére a röntgen készülékekkel ellentétben nincs szükség, mert ilyen nagy energiáknál a fékezési röntgen sugárzás keltése sokkal jobb hatásfokkal történik. Míg 200 kV-nál az energia több mint 99⁰/₀-a hővé alakul át és csak 1⁰/₀ alatti része fékezési röntgen sugárzássá, addig 20 MeV-nél például már az energia 66⁰/₀-ából lesz fékezési röntgen sugárzás és csak 34⁰/₀-a alakul át hővé. Ez azt jelenti, hogy az egységnyi sugárzási energiára jutó hőenergia a klasszikus röntgen készülékeknél több mint 100-szoros értékről a betatronnál 0,5-re csökken, azaz jó 200-szor kisebb lesz.

A röntgen sugárnyaláb keresztmetszete a dózisintenzitás eloszlása szempontjából erősen inhomogén. A középen jóval nagyobb a dózisintenzitás, mint a széli részeken. Ezért egy szivar alakú szénhidrogén kompenzációs szűrőt szokás alkalmazni és az inhomogenitást ezzel kikompenzálni. A fékezési röntgen sugárzás dózisteljesítménye az energia növekedésével rohamosan nő, 25 MeV-nál 1 m távolságban betatronunknál eléri a 60–70 rad/perc értéket.

A gyorsító csőből kilépő elektronnyaláb keresztmetszete az ablaknál még igen kicsi, de a levegőben bekövetkező szóródás következtében aztán egyre jobban kiszélesedik, úgyhogy terápiás besugárzásokra is alkalmas nyalábbá válik.

A dózisteljesítmény az ablak előtt még rendkívül nagy, 4 mA-es elektron áram belövésénél 30 000 rad/perc. A távolság növekedésével a dózisteljesítmény rohamosan csökken, de még 1 m távolságban is 300 rad/perc körüli értéket mutat. Az elektronok hatótávolsága természetesen levegőben igen nagy, már 5 MeV-nél eléri a 20 métert. Lágy szövetekben 25 MeV-nél mintegy 12 cm-es hatótávolságot kapunk, ami azt jelenti, hogy olyan daganatokat, amelyek a bőrfelülettől 12 cm-nél kisebb mélységben helyezkednek el, alkalmasan megválasztott energiával rendelkező elektron sugárnyalábbal ideálisan tudunk besugározni. A daganatok mögött elhelyezkedő szövetek gyakorlatilag nem kapnak terápiás besugárzást.

A betatronnak legnagyobb jelentősége terápiás szempontból éppen a nagy energiájú elektronsugárzások előállításában rejlik.

A betatronterápia jellegzetességei

(Gyarmathy László és Reischl György, Országos Onkológiai Intézet
és OTKI Onkoradiológiai Tanszék)

A B5M-25 típusú betatron beállításával intézetünk újfajta nagyenergiájú sugárforrással gyarapodott. A készülék 25–28 MV-os fékezési- és 7–26 MeV-os elektronsugárzás előállítására alkalmas.

Újszerű feladat a nagyenergiájú sugárzások ezen fajtáihoz a korszerű dozimetriás alap megvalósítása. Ismeretes, hogy az expozíció fogalma itt már nem használható (ICRU) és csakis az elnyelt dózis közvetlen, vagy közvetett meghatározására lehet