

放射線治療用 1000 キュリーコバルト装置

I. サスカチュワン コバルト 60 装置

1000 Curie cobalt units for radiation therapy

I. The Saskatchewan cobalt 60 unit

Johns HE*, Bates LM, Watson MB. Brit J Radiol 25:296-302, 1952

はじめに

1951年8月、サスカトゥーン(Saskatoon)の大学病院に1,000キュリーコバルト装置が設置された。この装置は、サスカトゥーンのAcme Machine and Electric社が、サスカチュワン(Saskatchewan)癌協会の要請で製作したものである。放射性コバルトは、オンタリオ州チヨークリバーの原子炉^{**}で製造された。本稿は、コバルトの製造、装置の装填、照射ヘッドの設計について述べる。図1に設置された装置の外観を示す。

照射ヘッドの設計

図2、図3に照射ヘッドの設計を示す。ヘッドは1トン以上あり、鉛製シリンダーがスチールで覆われており、円形端は直径20インチ、高さ22インチである。一端にスチール板Eがスチール容器に溶接されており、ここに附属品を取付ける。このプレートおよびヘッド下面から5インチの鉛にテープした孔があいている。スチールで覆われた長さ9インチの可動性シリンダー状鉛プラグSが、この反対側からヘッドにはまり込む。ヘッドの中心部付近には、スチールで被覆した鉛ホイールがある(図2、図3)。2つの重金属製^{***}、直径2インチ、厚さ1/2インチの円筒状構造(図3、L1、L2)が、7×1.5×1.5インチの重金属製直方体バーに銀ろう付けされている。この重金属バーの軸は、ホイールの直径に一致している。ホイールのその他の面はスチール製で、内部は鉛で充填されている。このホイール構造を組みたて、重金属バーの軸に沿って設けられたテープ孔に収める(図7)。ホイールは、図3に示すようにスチール容器内のベアリングが支えるシャフトに装着されている。ホイール装置にトラブルが発生した場合は、図3のように線源は鉛遮蔽内に戻り、ユニット全体がヘッドから外れるようになっている。

ホイールは、小さな2相モーターによって摩擦クラッチを介して回転する。ハンドルを使って手動で回転することもできる。図2、図3は「オン」の位置を示している。装置を「オフ」にするには、図3のモーターを稼動するとホイールが180度回転し、照射路に6インチの重金属(鉛9インチ相当)が挿入される。

可動面の亀裂からの放射線漏洩を防止するため、設計に当たっては相応の配慮がなされている。コバルトがオンの位置にある時、亀裂からの漏洩は室内の散乱線に比較して無視しうる程度である。オフ位置では、いくつかの可能性について考慮が必要である。可動ホイールと静止スチール板との間には1/32インチの間隙があり、これはホイールが固着しないために必要である。ここから直接漏洩することはないが、ある程度の散乱線がありうる。この経路上にある2つの重金属製の突起L1、L2によって、経路に2つの直角が生じる。2回の直角なコンプトン散乱によって、放射線は軟化して容易に吸収されるようになる。同じ理由で、ヘッドの上部にはまっているスチールで被覆されたプラグ

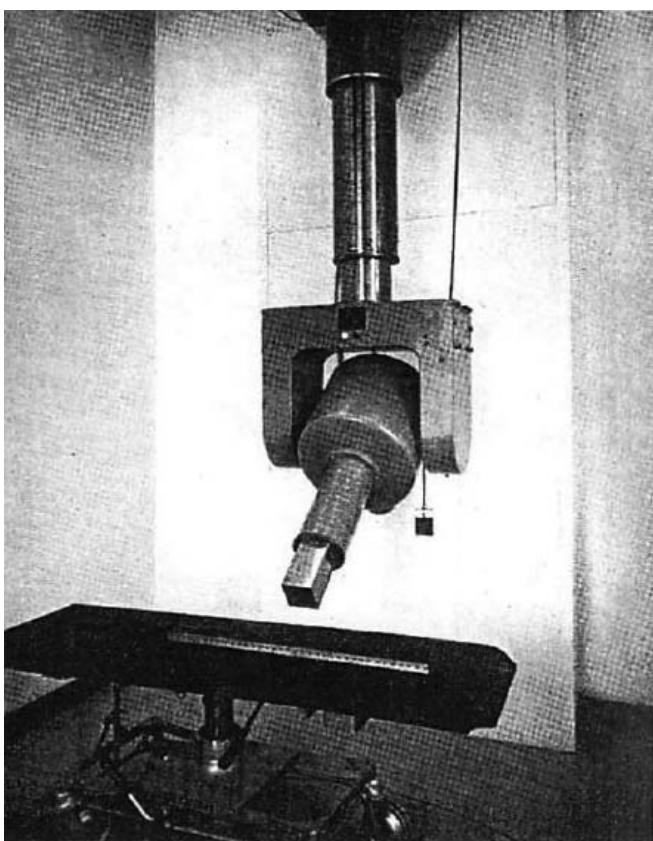


図1. 装置の外観写真

* University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada (訳注: サスカトゥーン(Saskatoon)はカナダ中部のサスカチュワン(Saskatchewan)州の最大都市。州立サスカチュワン大学があり放射線物理学の研究施設を有する)

** 訳注: チヨークリバー研究所。1942年、カナダのオンタリオ州チヨークリバー(Chalk River)に原爆開発を目的として設立された。天然ウランを燃料とし、減速剤に重水を使用するカナダ型重水炉(CANDU炉)を初めて開発、運用し、現在も医療用、科学用放射性物質の供給施設としては世界最大。

*** 重金属は、タンゲステン、ニッケル、銅の合金で、比重約17g/cm³である。

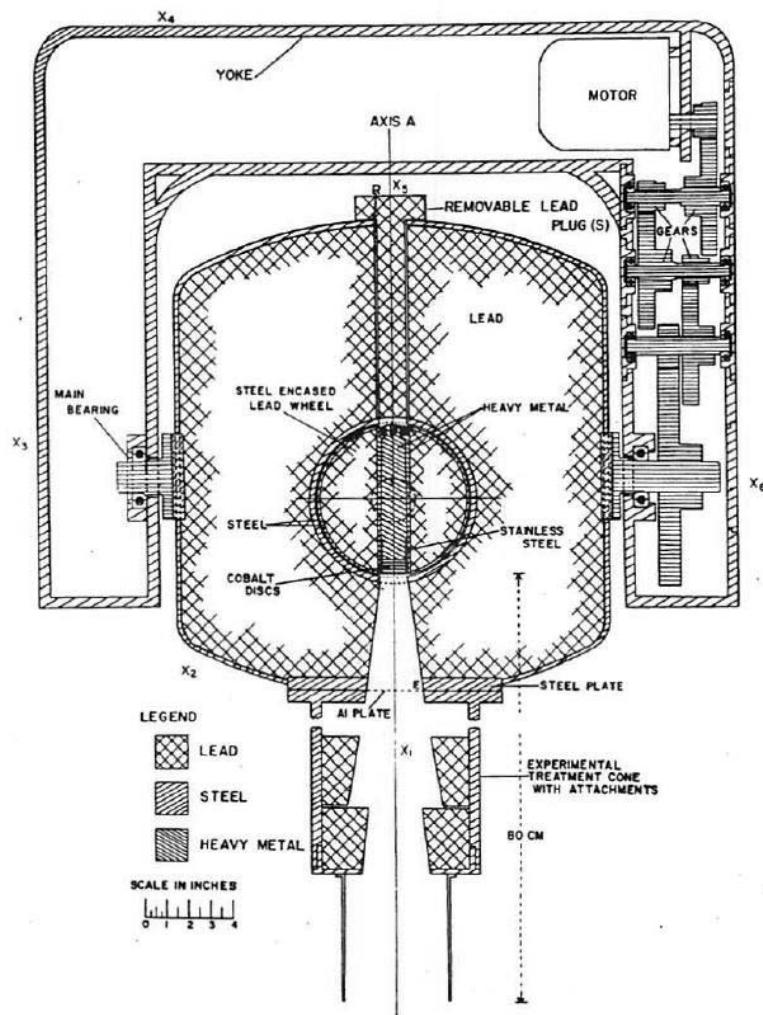


図2. 治療ヘッド. ヨークに支持されており, 線源をいれた回転ホイールと実験的な治療用円錐を示す.

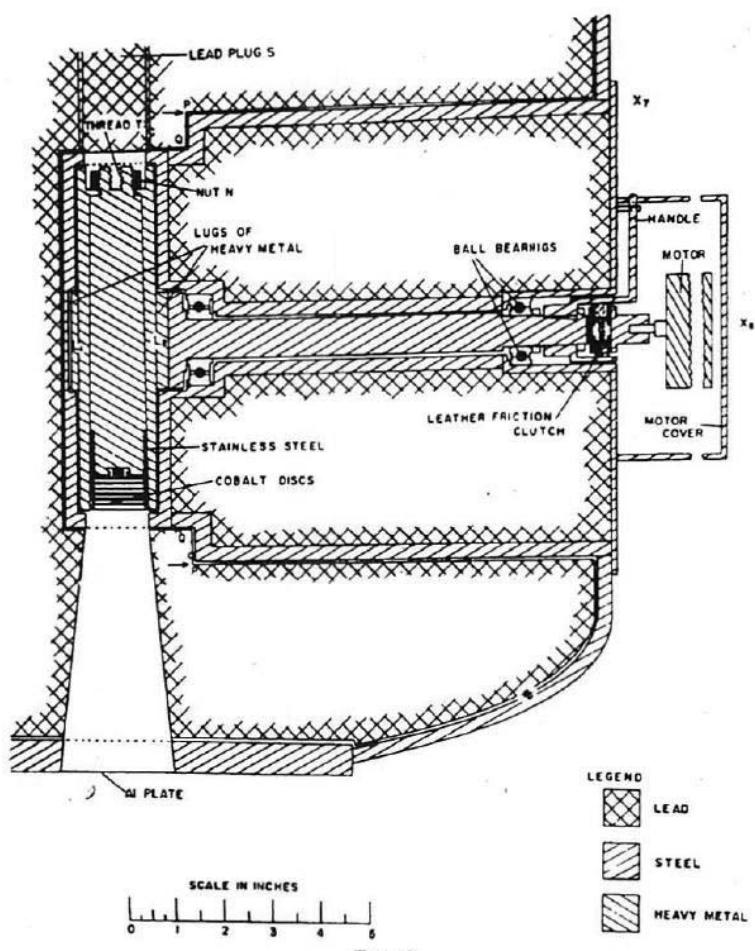


図3. 鉛を充填したスチール製容器. 回転ホイールのペアリングが見える. 図2のヘッドと装置の連結を示す.

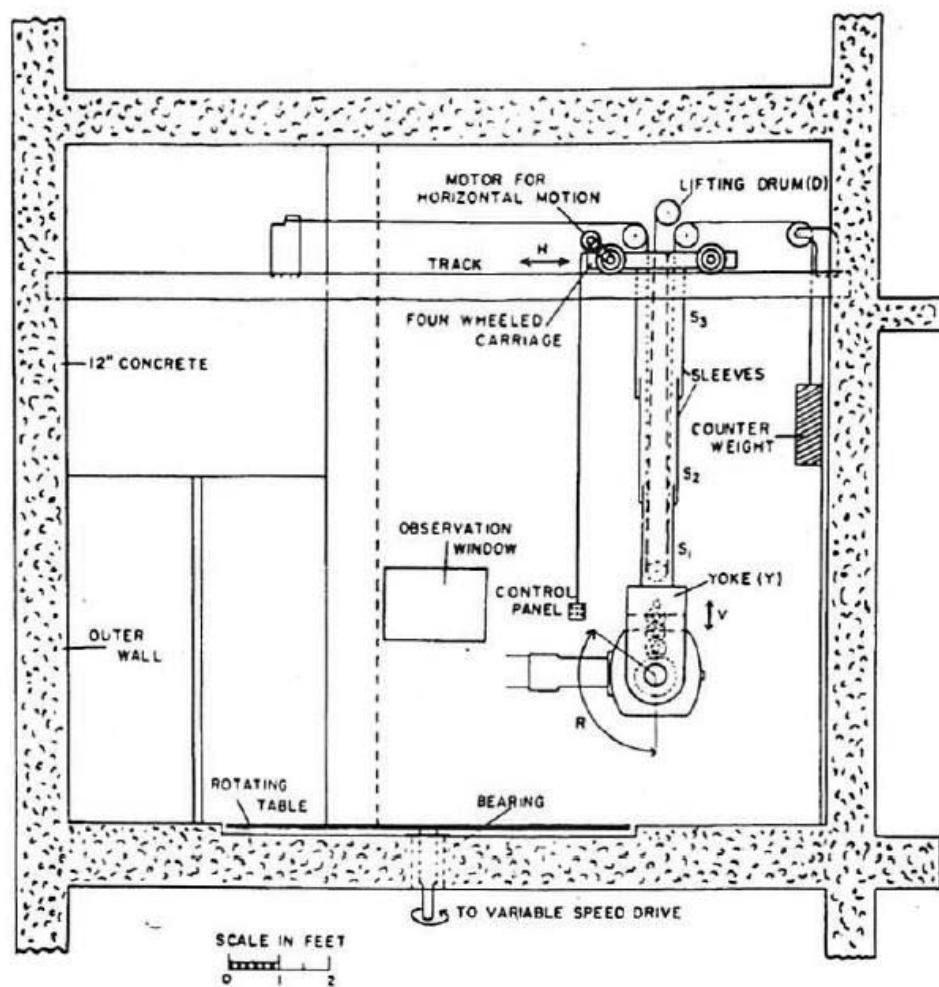


図4. 治療室の立面図. 装置のその移動を示す.

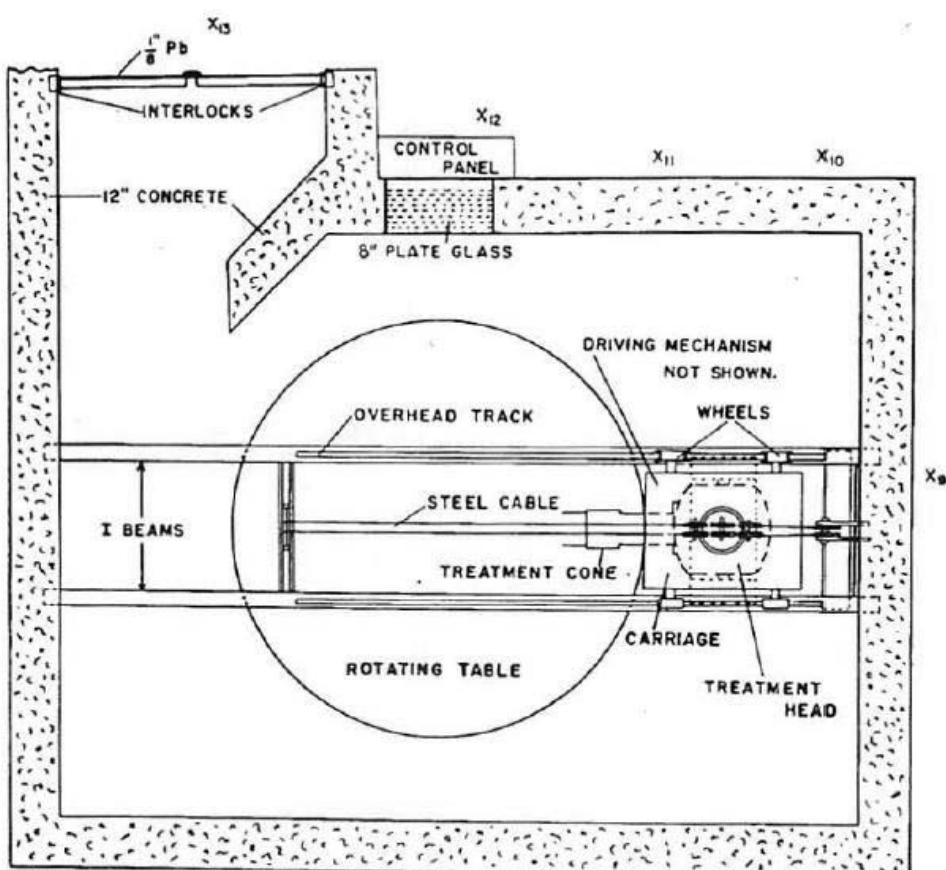


図5. 治療室の平面図.

S(図2)も、線R上の放射線漏洩をカットするためのさらに大きな領域を提供している。線P上の漏洩(図3)は、P, Qの直角で低減される。このような予防策を講じてもなお、厚さ2インチの三日月状の鉛部品(図3には示していない)をX7に加えて、線P上のリークを低減する必要があった。ヘッド外の線量については後述する。

治療室とヘッドの装着

治療ヘッドの指示方法を、図4の立面図に示す。ヘッドの回転(R)は、図2のモーターとギアで行なわれ、図示の範囲内に制限されている。つまり放射線は、下方あるいは病院の外壁に向けて照射される。装置全体は、モーターにつながった巻き上げドラムDで昇降できる。ヘッドの重量の大部分はカウンターウェイトでバランスされている。上下動は5フィートで、スリーブS1, S2, S3内のキー溝によって垂直軸周りの回転を防止している。スリーブS3は、天井トラックを7フィート移動する4輪台車に固定されている。水平運動Hは、車輪の1つにギアを介して連結したモーターによって行なわれる。モーターはすべて、台車から懸架されている制御盤の小さなプッシュボタンによってリレーを介して起動される。

治療室の全体像は図5の通りである。部屋のコンクリート壁は厚さ12インチで、この部屋の地下室は倉庫として使用されているが、その扉が開く場合はインターロック機構でスイッチが切れるようになっている。治療室の扉は厚さ1/8インチの鉛が貼られており、これもインターロックスイッチが備わっている。扉口には、その外側の放射線を許容範囲に低減するためにコンクリート遮蔽が必要である。この遮蔽は高さ7フィートである。観察窓には、1インチの板ガラス8枚がはまっている。装置の下のスチール製ターンテーブルは、回転照射に使用する。ターンテーブルの上面は床面と同高で、回転速度は0.06~0.36/分に調整できる。

制御盤

制御盤には、タイマー、ターンテーブルの速度制御、その電気式回転計、キースイッチがある。キースイッチによって、装置をオン状態にすると、モーター(図3)がホイールを正しい位置のストップまで180度回転する。ストップ上のマイクロスイッチがモーターの電源を切り、同時にタイマーがスタートする。摩擦クラッチによって、モーターはその慣性で電源がオフになった位置よりをやや越えて回転する。治療時間が終わると、モーターが反対位置まで回転し、コバルトはオフ位置に戻る。コバルトは、ひとつの位置から他の位置まで5秒で移動する。治療中にインターロック扉が開くと、装置はただちに停止する。扉および装置上の制御盤の緑と赤のランプがコバルトを載せたホイールの

位置を表示する。

コバルトの放射化

厚さ0.532cm、直径2.55cm、質量2.31gのコバルトディスクを、チョークリバー原子炉で照射した。照射時、ディスクは2枚のアルミニウム板の間に2層として、できる限りオーバラップが最小限になるように配置した。ホルダーは、ディスク総面積の66%が無遮蔽、34%がディスク2枚分の厚さとなるようにした。

コバルト自体による中性子遮蔽の推定には、W. R. Dixonの援助を得た(1951年)。コバルトが厚さt、無限の面積をもつ平板で、等方向性分布した熱中性子の中にいると仮定すると、照射効率Eは、

$$E = \frac{1}{2\mu t} \left\{ 1 - 2 \int_1^{\infty} \frac{e^{-\mu ty}}{y^3} dy \right\} \quad (1)$$

ここでEは、厚さtの試料の総放射能を、遮蔽がなかった場合の放射能に対する比として表したものである。この式で、線形係数 μ は $N_0 \sigma$ に等しい。 N_0 はcm³当りの原子数、 σ は熱中性子の断面積である。 σ は34.2 barnとした(Yaffe, Hawkins, Merritt, Craven, 1951)。式(1)を異なるtに対してプロットしたものが図6である。0.052cm厚のコバルトのEは78%であることがわかる。0.104cm厚の試料では、65%である。この装置の線源とした25枚のディスクの平均効率は0.66(78)+0.34(65)=74%である。中性子遮蔽に関する詳細は、別稿に発表予定である。

原子炉内のコバルトの位置の中性子束および照射時間から、照射効率が100%とすれば比放射能は38.1Ci/gと推定される。照射効率による補正を行なうと、コバルトを原子炉から取りだした1951年6月6日時点では28.2Ci/gとなる。ディスク25枚の総放射能は1,630Ciである。取りだしてから3カ月後に放射能の計測を行なった。1カ月1.1%で減衰して1,580Ciとなる。

コバルトの装荷と運搬

コバルトディスクは、原子炉から図7に示すステンレス製容器に移された。これは底面1/32インチで、重金属製シリンダーをねじ込む溝が切られている。移動は、チョークリバーで専用のリモートコントロール装置を使用して行なわれた。ディスクをステンレス製容器に収めたあとは、重金属シリンダーを固くねじ込んで、酸化コバルトの粉塵が漏れないようにした。

図7の容器を、高さ22インチ、直径22インチの鉛容器にいれてサスカトゥーンに搬送した。容器の表面の線量は、7mr/時間であった。以後すべてのコバルト線源の操作は、図7の容器を一体として扱った。

ヘッドの装荷

コバルトを鉛容器から治療ヘッドに移動するには、図2に示す円錐部を取り外し、ホイールをオンの位置に回転して、鉛プラグSを除去する。これにより、軸A(図2)に沿ってヘッドAまで真っ直ぐな空間が確保できる。ヘッド底部のスチール板を鉛容器にしっかりと固定する。鉛容器とヘッドは、垂直軸に対して20度傾いており、従ってその共通軸Aは図2のヨークを通過しない。ネジ山を刻んだロッドをヘッド頂部からAに沿って、ホイール内のテーパー孔まで挿入し、重金属にしっかりとねじ込む(T, 図7)。線源を鉛容器からテーパー孔内をホイールまで引き上げる。ナットN(図3)で良く固定する。この装荷作業中、作業者はヘッド上にいて、軸Aからの直接線からは線源の重金属部分により、他の方向のからの放射線は22インチの鉛によって遮蔽されている。装荷用ロッドはねじを回して引き抜き、プラグSを元に戻す。線源を収めたホイールはオフの位置に回転する。装荷作業中は、図7の線源外からの汚染を防ぐための留意点については別稿とする。ひとつ、コバルト粉塵の漏洩予防として、テーパー孔の開口部(図2, E)にアルミニウムのシートを張り、ヘッド内の線源を封印した。

装置の出力

線源から1mの位置に、25r用Victreen電離箱を置いて、装置の出力を計測した。コバルトの γ 線については、電子平衡を得るために電離箱周囲に厚さ3~4mmのガラス板が必要である。ガラス板がないと、示度は約75%となる。この方法で、コリメータなしで(照射野径約30cm)計測した出力は、1mの位置で12.7r/分であった。

コバルトの γ 線には ^{60}Co が ^{60}Ni に壊変する過程で放出する1.17MeV, 1.33MeVの同数の2つエネルギー線がある。1.17MeVのエネルギー束3,050 ergs/cm²/r,

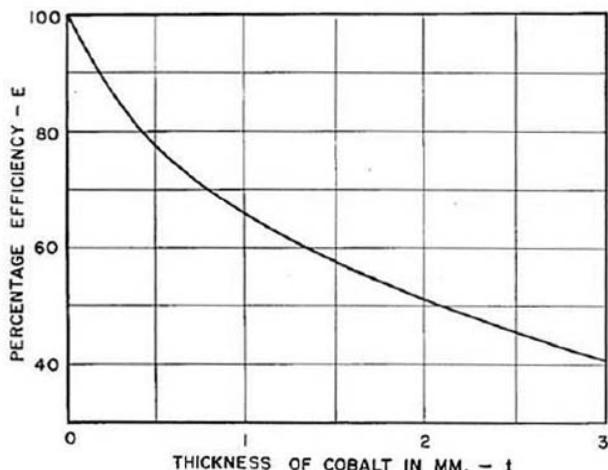


図6. 热中性子の照射効率と遮蔽の厚さの関係。照射効率は、遮蔽がない場合に対する放射能の比である。

1.33MeVについて3130 ergs/cm²/rとすると、1000Ciの線源から1mの位置での線量率は、22.8r/分となる。従って、この装置の実効放射能は952Ciとなる。実際の放射能は、この数字にそれぞれ補正を適用して求められる。線源の出力は、コバルトの背面から放出される放射線が前面により吸収されることにより減弱する。この装置では、一次放射線の75%が放出される。このような自己吸収の補正については、Dixonが報告している(1951)。しかしこの減少分は、線源自体およびヘッドのテーパー開口部からの散乱線によって一部相殺される。計算の詳細は別稿とするが、1回散乱線を含めると出力は90%程度となる。さらにステンレス製容器による減弱の補正も含め、放射能は1,100Ciとなった。一方、原子炉データからの予測では1,580Ciであった。

この大きな差を説明することは難しい。中性子遮蔽の不確定性では、5%以上の差は説明できない。線源の一部が装荷時に粉塵として失われるが、1%以上に及ぶことは考えにくい。原子炉内のコバルト領域の実効中性子束で、コバルトの存在が線束をどの程度低下させるかは未知なので、ある程度の不確定性がある。しかしあそらく最大の不確定性は、原子炉の中性子断面積であろう。中性子線束には高エネルギー中性子が含まれているが、これはコバルトの放射化対策にほとんど寄与しないためである。チヨークリバーの同位体部門では、経験的に放射化断面積を22 barnとすると計測値と予測値に良い一致を見ることが知られており、このような差は珍しいことではない。

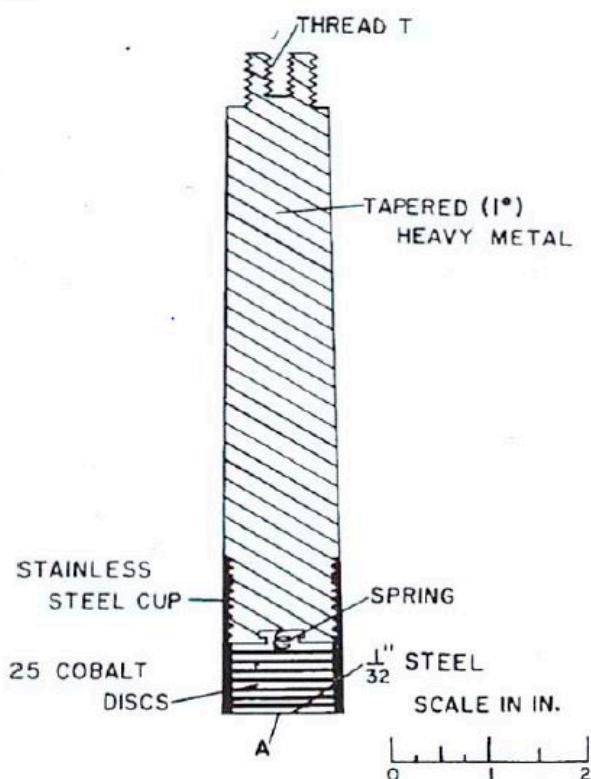


図7. 線源ユニット。重金属のシリンダーがコバルトディスクを入れたステンレス製容器にねじ込まれている。

迷放射線

迷放射線 (stray radiation) は、大きな電離箱を直流アンプに接続して計測した。電離箱は標準ラジウムで較正した。コバルトがオフの位置にある時、ヘッドから 3 インチの距離にある様々な位置で計測した。X1, X2, X3, X4, X5, X6(図 2) における計測値はそれぞれ、8, 1.5, 4.0, 1.5, 13, 2.8 mr/ 時であった。X7, X8(図 3) では 18, 16 mr/ 時であった。最も大きな漏洩は X7(図 3) の位置であった。ヘッドから 1 フィートの位置でも計測し、X7(図 3) 以外では許容線量率 (7mr/ 時間) より小さかった。X7 では、ヘッドから 15 インチの位置で許容線量率となった。患者を位置決めする術者が立つ位置では 1mr/ 時であった。

部屋の壁の遮蔽を試験するために、装置をターンテーブル(図 5) の中心に移動し、最大の線束を大きな散乱物質に向けて水平に照射した。室外の X9, X10, X11, X12, X13(図 5) における計測値は、それぞれ 1, 1.5, 2.5, 4.5, 6 mr/ 時であった。通常の運用状態では、散乱条件はこれほど悪くないので、室外の線量はさらに小さ

いと思われる。図 5 に示す斜めのコンクリート遮蔽は、X13 の線量率を許容範囲 (6mr/ 時) に収めるために必要である。インターロック機構を備えた扉、放射線防護装置があることから、この装置については放射線リスクはないものと考えられる。

照射野の設計については、次論文に述べる。この装置は、線源皮膚距離 80cm、出力 33r/ 分で使用される。

【参考文献】

REFERENCES

- DIXON, W. R., *Private Communication*, 1951.
DIXON, W. R., *Nucleonics*, 1951, viii, 68.
YAFFE, L., HAWKINS, R. C., MERRITT, W. F., and CRAVEN, J. H., *Physical Review*, 1951, lxxxii, 553.