

放射線治療の基礎

2009年度

アウトライン

- インターベンショナルラジオロジー
- 核医学、シンチグラフィ
- 放射線物理
- 放射線治療の基礎
- 放射線治療の対象疾患
- 放射線被爆

インターベンショナルラジオロジー (IVR)

- 経皮的カテーテルを応用してさまざまな治療を行う手技の総称。血管内治療、血管内手術とも呼ばれる。
 - 血管IVR: 血管内にカテーテルを挿入して行う治療。
 - 非血管IVR: 血管以外の経皮的穿刺手技による治療。

血管IVR

- 薬剤動注

- 抗腫瘍薬：肝細胞癌、子宮癌、膀胱癌、肺癌
- 血栓溶解薬：急性期脳梗塞、上腸間膜動脈血栓症

- 血管塞栓術

- 悪性腫瘍：肝細胞癌、子宮癌、膀胱癌、肺癌
- 良性腫瘍：子宮筋腫、血管腫
- 出血性病変：消化性潰瘍、血管外傷
- 動脈瘤：脳動脈瘤、腹部動脈瘤 – コイル留置

血管IVR

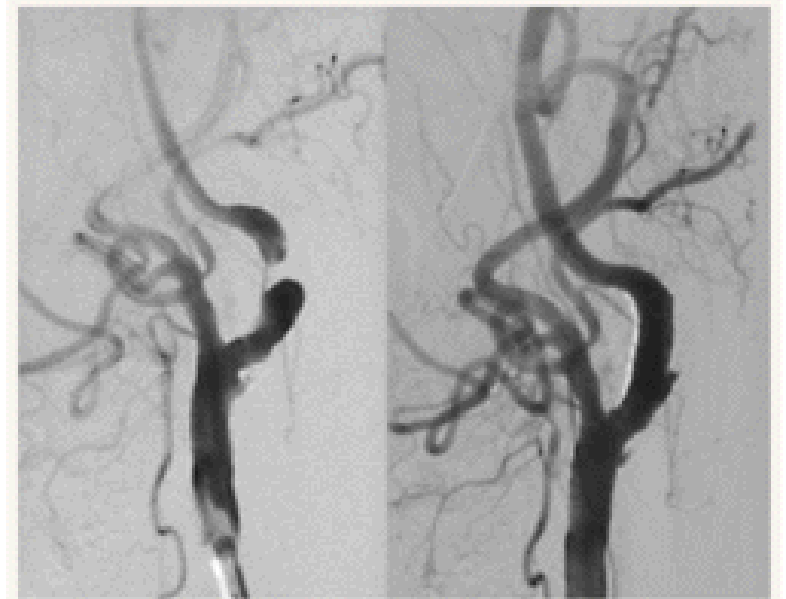
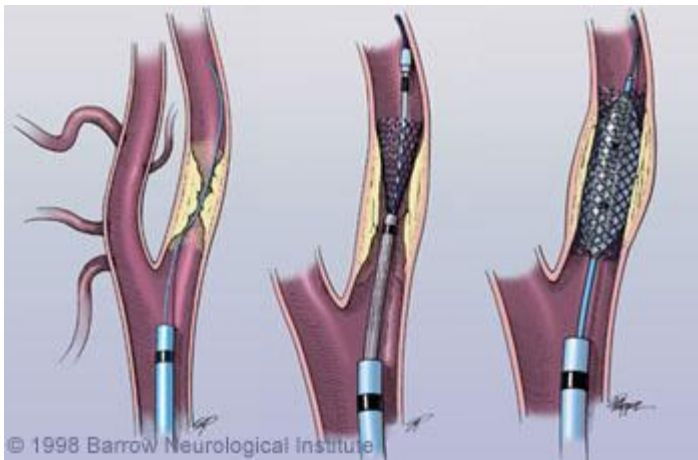
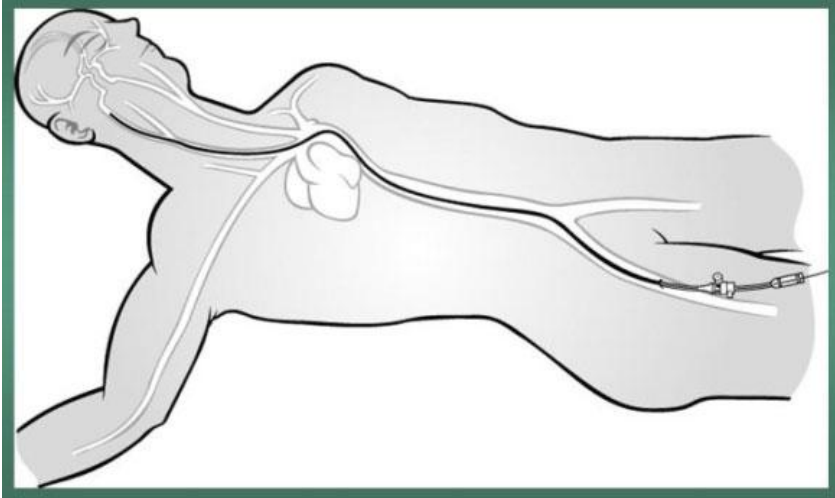
- 血管拡張術

- バルーン拡張術：閉塞性動脈硬化症（下肢動脈、腎動脈）、狭心症
- 血管内膜除去術：閉塞性動脈硬化症（下肢動脈）、内頸動脈狭窄 - 特殊な刃がついたカテーテルでアテロームを削り取る。
- スtent留置術：閉塞性動脈硬化症（下肢動脈、頸動脈）、狭心症、心筋梗塞 - 狭窄部位に円筒状のstentを留置して内腔を確保する。

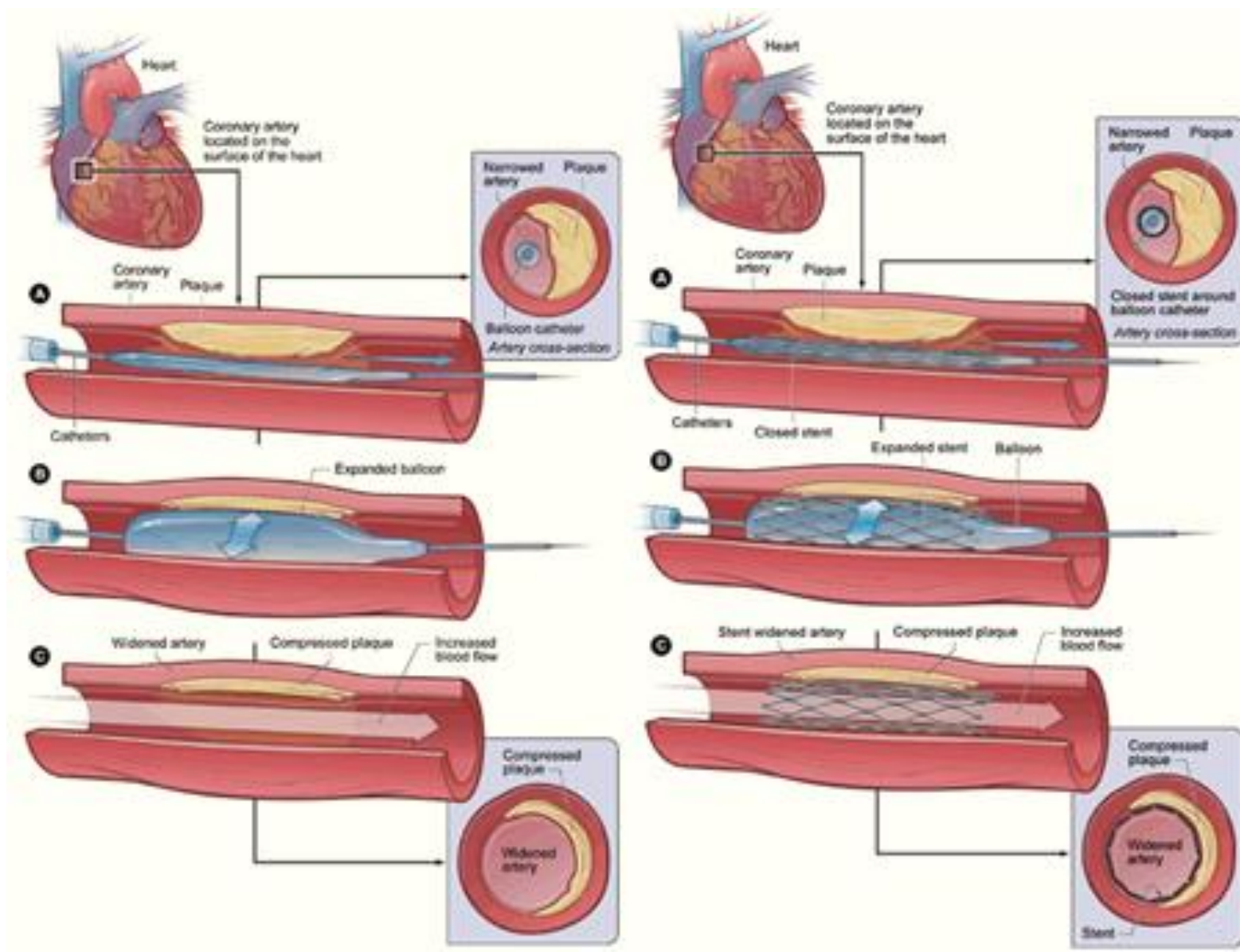
- その他：

- 下大静脈フィルター留置術：下肢静脈血栓症 - 下大静脈にアンブレラフィルターを留置して肺塞栓を予防する。
- 血管内異物除去術：中心静脈栄養カテーテル離断 - スネアカテーテル、バスケットカテーテルなどで異物を把握、除去する。

内頸動脈ステント留置



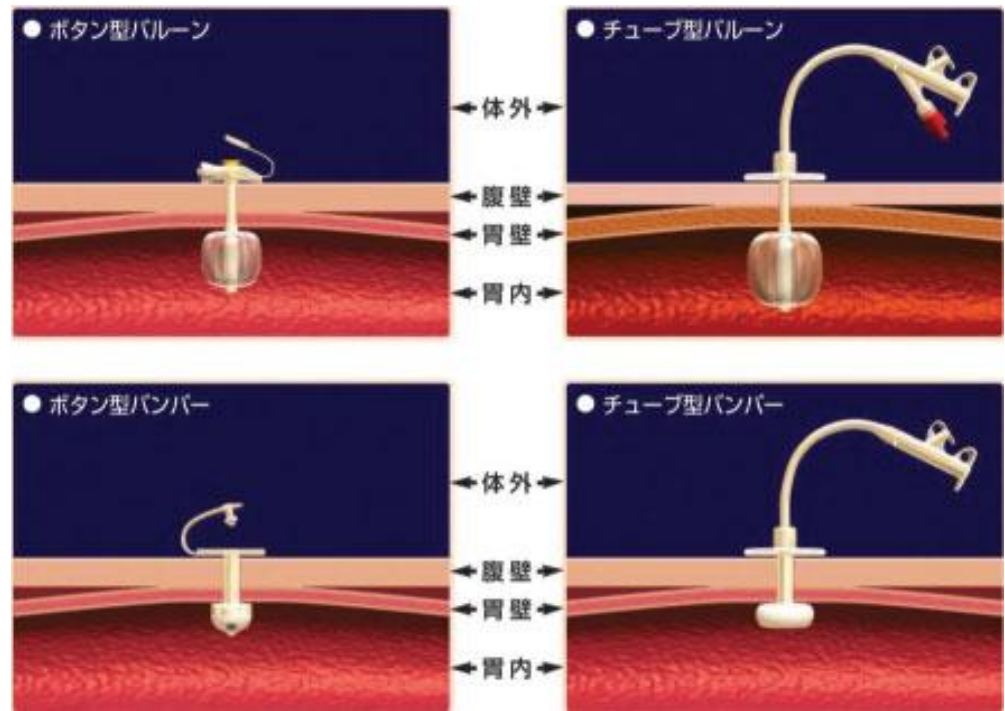
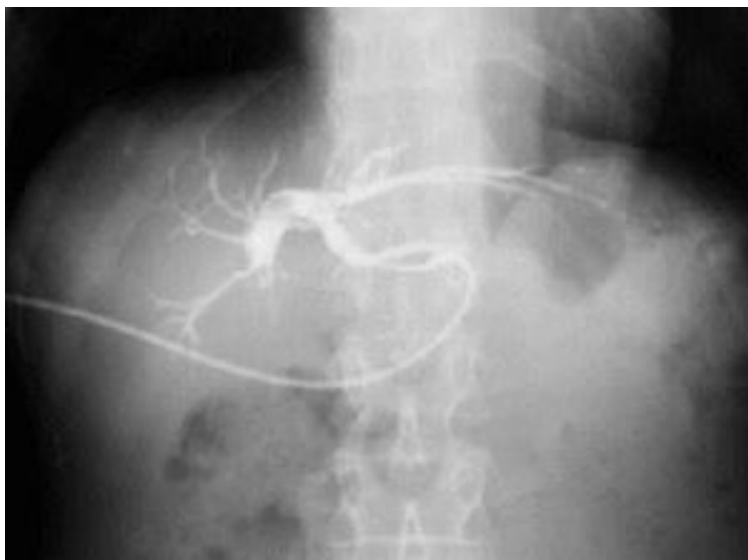
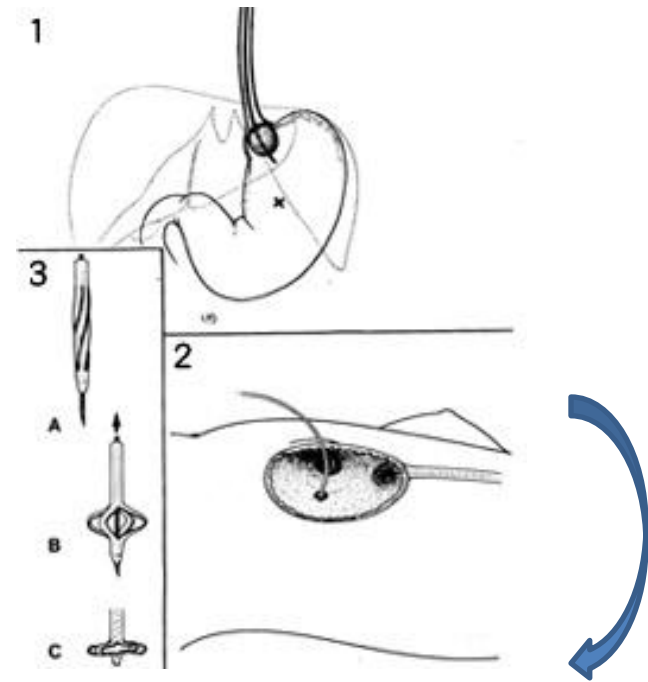
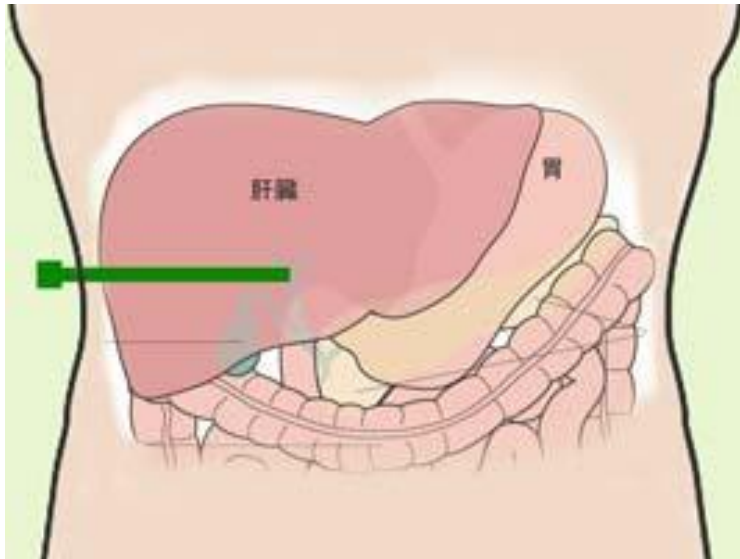
狭心症に対するPTCA: バルーン拡張術、ステント留置



非血管IVR

- ドレナージ
 - 経皮的胆道ドレナージ – 胆管癌、膵頭部癌
 - 経皮的膿瘍ドレナージ – 肝膿瘍、後腹膜膿瘍
- 瘻孔造設術
 - 経皮的腎瘻造設術 – 子宮頸癌などによる尿路閉塞 – 腎盂・腎杯を穿刺して、水腎症を解消する。
 - 経皮的胃瘻造設術 – 食道狭窄など – 経口摂取不可能な際に経腸栄養を可能とする。
- 結石除去術
 - 経皮的胆道結石除去術 – 胆管結石 – 鉗子で結石を除去する。
 - 経皮的尿路結石除去術 – 腎盂結石、尿管結石 – 鉗子で結石を除去。大きいものは、衝撃波破碎も併用する。

PTCD/PEG



核医学

核種	半減期	放射線	用途
^{67}Ga (ガリウム)	78 時間	エックス線 (EC)	腫瘍・炎症シンチグラム
^{123}I (ヨード)	13 時間	エックス線 (EC)	甲状腺シンチグラム(Na^{123}I)
^{201}Tl (タリウム)	74時間	エックス線(EC)	心筋血流シンチグラム($^{201}\text{Tl Cl}$)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6時間	γ 線(β^- , 核異性体転移)	甲状腺($^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$), 骨($^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$) など
^{18}F (フッ素)	110分	γ 線(β^+)、エックス線(EC)	PET、腫瘍シンチグラム($^{18}\text{F-FDG}$)
^{60}Co (コバルト)	5.3年	γ 線(β^-)	ガンマナイフ、遠隔コバルト照射、 RALS
^{125}I (ヨード)	60日	エックス線(EC)	組織内照射(前立腺癌)

*放射線利用技術データベース (RADA) <http://www.rada.or.jp/database/index.html>

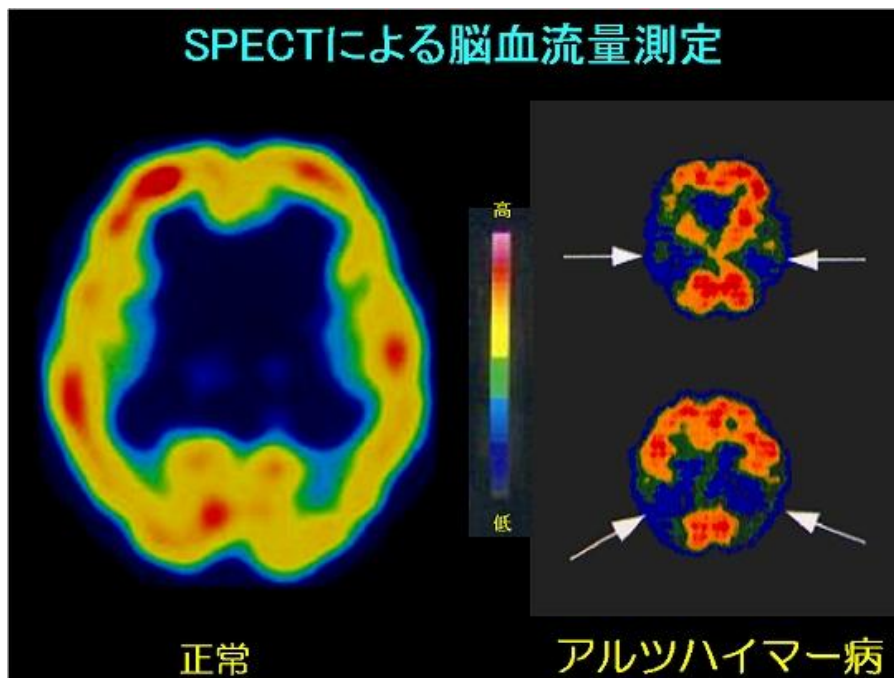
ガンマカメラ



- 放射性同位元素(RI : radioisotope)を含む薬を患者に注射する。
- カメラはその前面に鉛などでできたコリメータ(小さな孔が稠密にあいている厚板)を備えており、人体から出るガンマ線のうちカメラに垂直に飛び込むものだけを測定する。
- コリメータを通過した一個のガンマ線光子は数十cm角のシンチレータ板に当たって数千～数万個の低エネルギー光子に変換される。
- この光を数十個の光電子増倍管で計測する。
- それぞれの光電子増倍管の出力を総合して、シンチレータのどこにガンマ線が当たったかを3mm程度の精度で決定する。
- こうして、薬剤の3次元的な分布を2次元平面に投影した透視画像＝シンチグラムが得られる。
- γ カメラを人体の周りに回転させながら透視画像を多数撮影し、X線CTと同様に画像を再構成して、薬剤の分布を示す断層像が得られる。これがSPECT(single photon emission tomography)である。

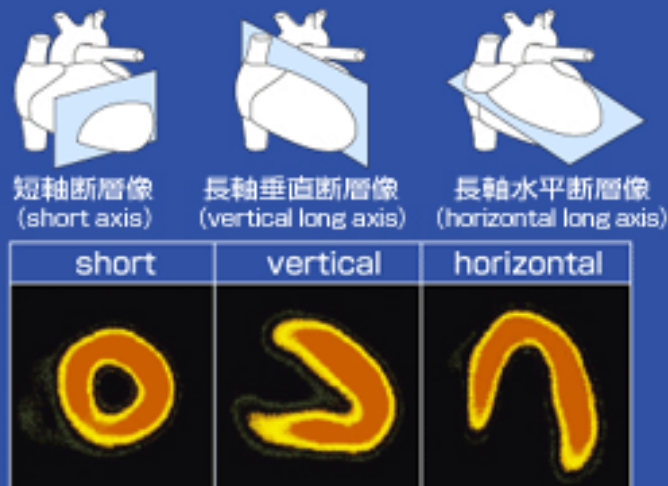
SPECT

SPECTによる脳血流量測定

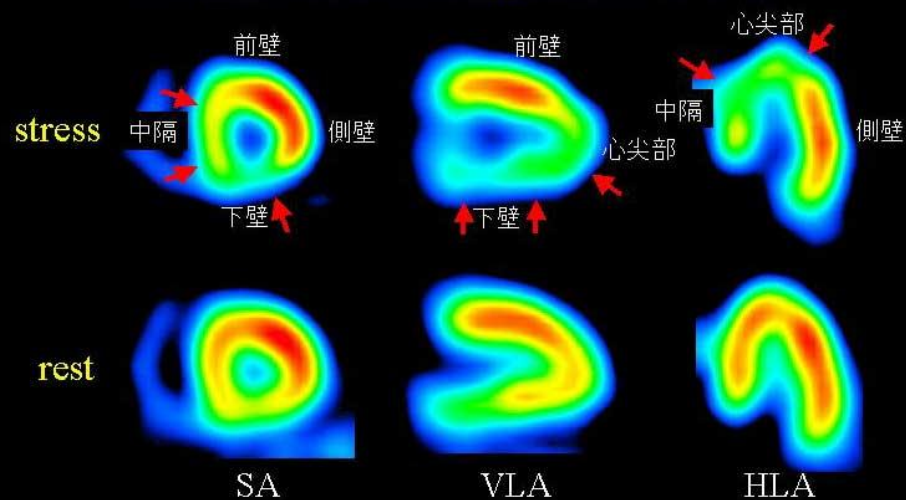


エキサメタジウムテクネチウム(^{99m}Tc)
注射液(^{99m}Tc -HMPAO注射液)

心筋SPECT像(正常)

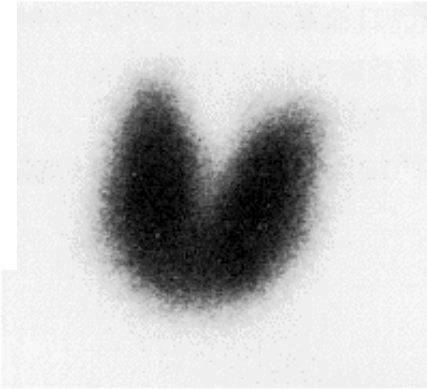


Tc-99m tetrofosmin myocardial SPECT

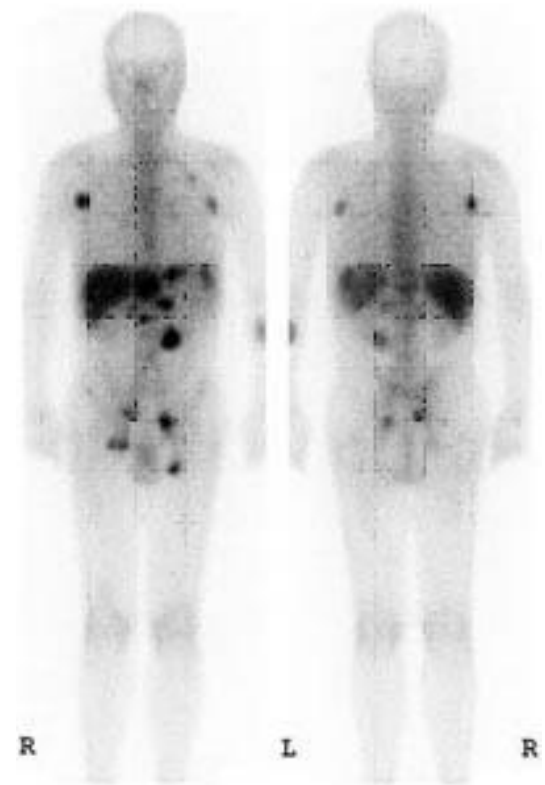
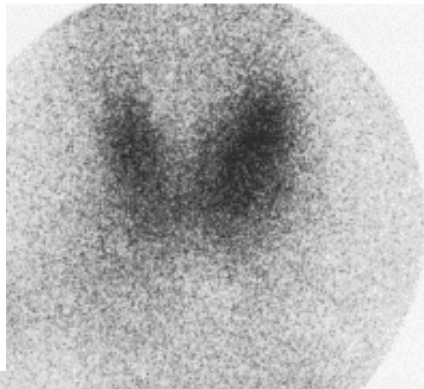


甲状腺シンチグラム、ガリウムシンチグラム

バセドウ病

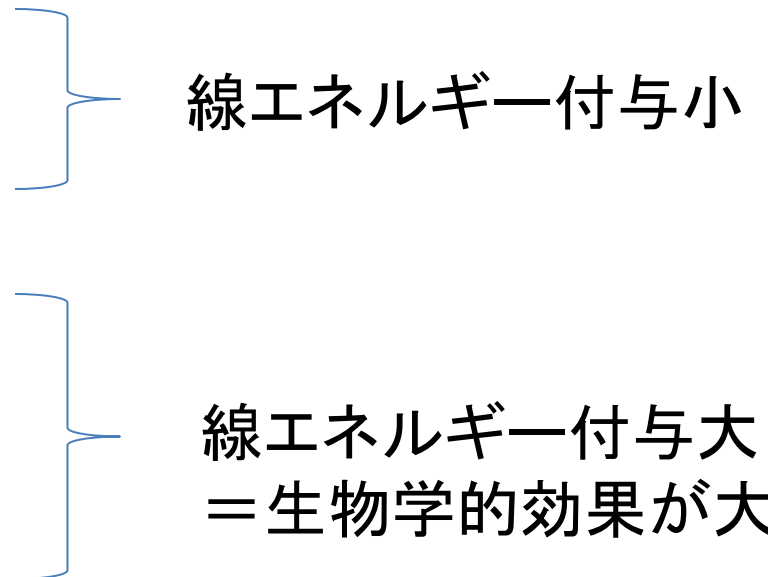


慢性甲状腺炎



悪性リンパ腫

放射線の種類

- 放射線＝空間、物質を通り抜けてエネルギーを伝える性質を持つ。
 - 電離放射線
 - － 電磁波
 - エックス線
 - γ 線
 - － 粒子線
 - β 線(電子)
 - α 線(ヘリウム原子核)
 - 陽子線
 - 中性子線
 - 重粒子線*(炭素線など)
 - 非電離放射線
 - 紫外線、可視光線、赤外線、超音波など
- 
- 線エネルギー付与小
- 線エネルギー付与大
＝生物学的効果が大

*原子核を構成する粒子線

放射線の単位

名称	単位	意味	例
照射線量	クーロン (C/kg)	線源から発生する放射線の総量	Chest X-P (PA)1枚 あたり約 $5\mu\text{C/kg}$
吸収線量	グレイ (Gy)	照射された放射線の内、 被写体に吸収されるエネルギー (1グレイ=1 ジュール/kg)	上記の場合、皮膚は約0.2mGy
等価線量 実効線量	シーベルト (Sv)	吸収線量にそれぞれの放射線の種類に応じた加重係数を掛け算して、放射線の影響を等価したもの	上記の場合 0.05mSv
放射能	ベクレル (Bq)	放射性同位元素の量 (1Bq=1個の核分裂/秒)	骨シンチグラム 99mTc投与量 =740MBq

エックス線の測定

- 電離作用 → ポケット線量計、ガイガーカウンタ(GM計数管)
- 蛍光作用 → ハンド・フット・クロスモニタ、TLD線量計、ガラスバッジ
- 写真作用 → フィルムバッジ

エックス線撮影の条件

- 管電圧(kV): 高圧なほど透過性が高くなる。
- 管電流(mA): 照射線量を決める。
- 曝射時間(ms): 照射線量を決める。
 - 管電流 × 曝射時間 = 総照射線量
- 高圧撮影: 胸部、腹部エックス線撮影 (120~140kV)
- 低圧撮影: 乳腺撮影 (40~60kV)

デジタルラジオグラフィー

- 蛍光増倍管 (image intensifier)
- エックス線平面検出器 (FPD, flat panel detector)



- コンピュータでデータ処理し、画像ファイルを作成保存
- ディスプレー上で読影

放射線の組織への影響

- ベルゴニエ・トリボンドウの法則(Bergonie-Tribondeau's rule): 感受性が高い細胞は....
 - 細胞分裂の頻度が高い細胞
 - 将来細胞分裂を多く行いうる細胞
 - 未分化な細胞
- 細胞周期ではM期に最大、S期に最低
- 扁平上皮癌＞腺癌

組織・細胞の放射線感受性

	正常組織	腫瘍
高感受性	リンパ組織 骨髄 精巣、卵巣 腸管上皮	悪性リンパ腫 未分化癌 胚芽腫 髓芽腫 ウィルムス腫
中等度感受性	結合組織 成長軟骨 食道・胃上皮	扁平上皮癌 基底細胞癌
低感受性	骨、軟骨 肺、腎、肝、膵 神経 筋肉	腺癌 線維肉腫 骨肉腫 黒色腫

放射性感受性修飾因子

- 酸素分圧が高いほど感受性が高い → 腫瘍の中心部は感受性が低くなる
- 40°C以上で感受性が高い
- 放射線増感剤: 抗癌剤の多くは放射線と相乗的に作用する

治療可能比

- Therapeutic ratio, TR = 正常組織の耐容線量 / 腫瘍の致死線量
 - $TR > 1$ でないと治療には使用できない。
- TRを増加させる方法
 - 分割照射
 - 集中照射: 定位照射、IMRTなど
 - 近位照射: 腔内照射、組織内照射、内照射など
 - 高LET放射線の使用

分割照射

- 間欠期に:
 - 腫瘍細胞は再酸素化により感受性増加
 - 正常細胞は障害から回復
- 方法:
 - 1回/日、2Gy/回、5回/週
 - 2回/日、1Gy/回、5回/週
 - 2回/日、2Gy/回、5回/週
 - 1回/日、3～6Gy/回、1～3回/週

単純分割照射

多分割照射

加速分割照射

寡分割照射

Four **R**s: 1.**R**epair 2.**R**eoxygenation 3.**R**edistribution 4.**R**epopulation

組織の回復

再酸素化

細胞周期の再分布

組織の再増殖

放射線治療：外部照射

照射法	方法	適応
直線加速器 (リニアック)	高エネルギー엑스線、電子線照射(1門照射、2門照射、多門照射、接線照射など)	脳腫瘍 肺癌 乳癌 頭頸部癌など
遠隔γ線照射	テレコバルト(^{60}Co 線源)など	脳腫瘍 肺癌 乳癌など (最近はあまり行われない)
定位照射	コンピュータ制御下に、病巣の形状に応じた高精度の照射野を設定(엑스線、γ線[ガンマナイフなど])	脳腫瘍 動静脈奇形 肺癌など
強度変調放射線治療 (IMRT)	複雑な形状の病変に対応して、多方向から異なる照射野の形、強度で照射	脳腫瘍 頭頸部癌 前立腺癌など

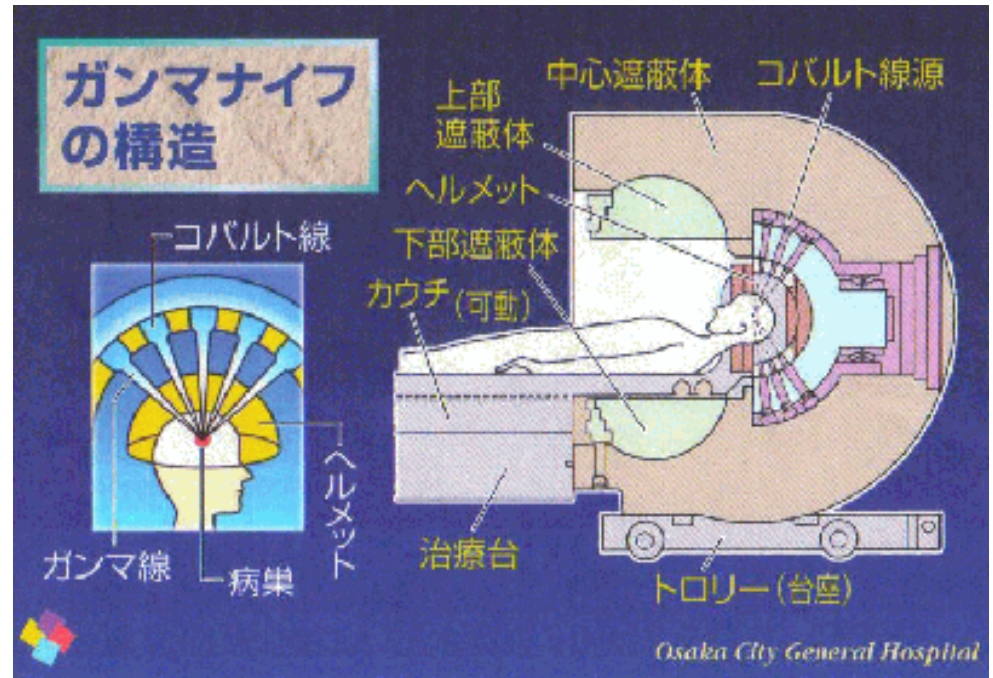
放射線治療：密封小線源

照射法	方法	適応
腔内照射	体腔内に管状の線源 (^{60}Co , ^{137}Cs など) を挿入。 遠隔操作装置を利用 (RALS、アフターローディング)	子宮癌など
組織内照射	シード、グレイン、ワイヤなどの形状の線源 (^{192}Ir , ^{125}I など) を組織に刺入	舌癌 前立腺癌など

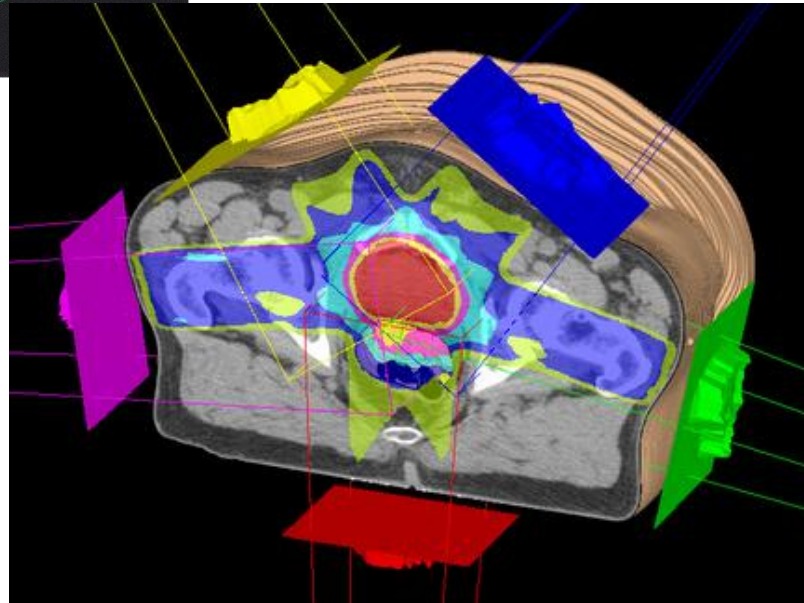
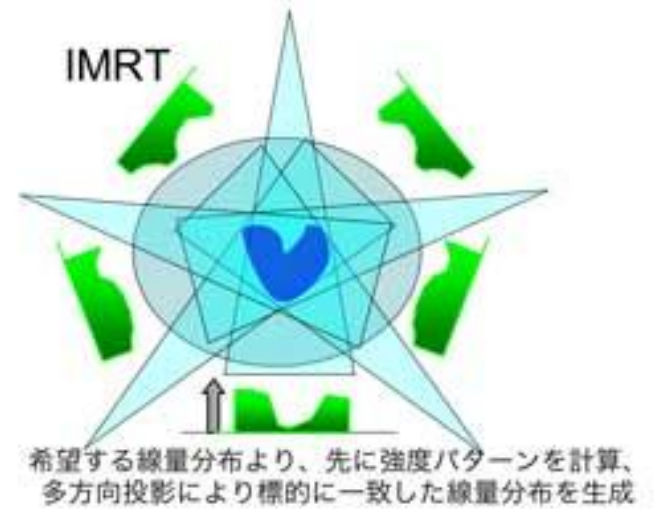
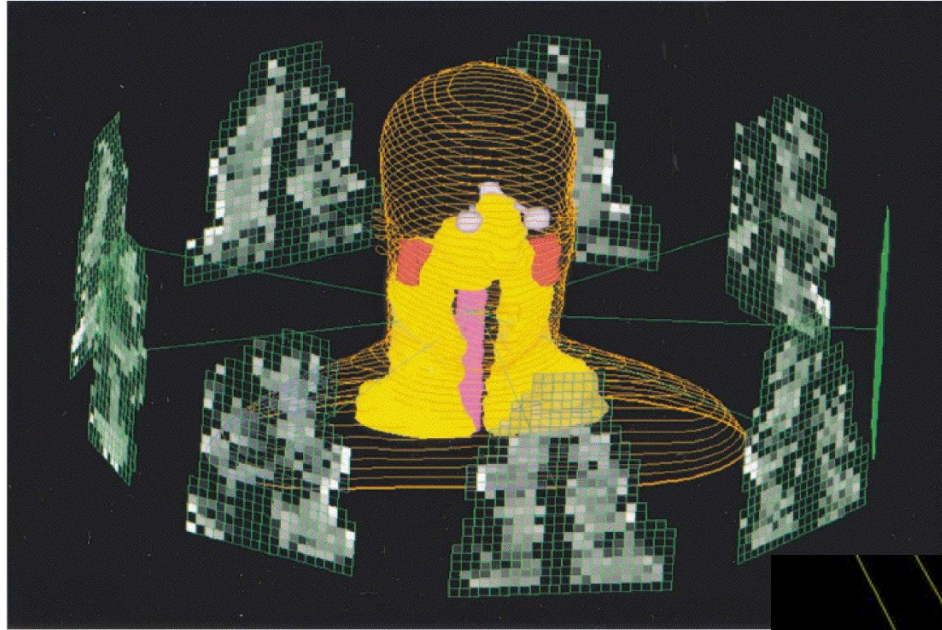
放射性同位元素内用

内照射	特定の腫瘍に集積する放射性同位元素を投与	甲状腺癌 甲状腺機能亢進症 (^{131}I 経口投与)
-----	----------------------	--

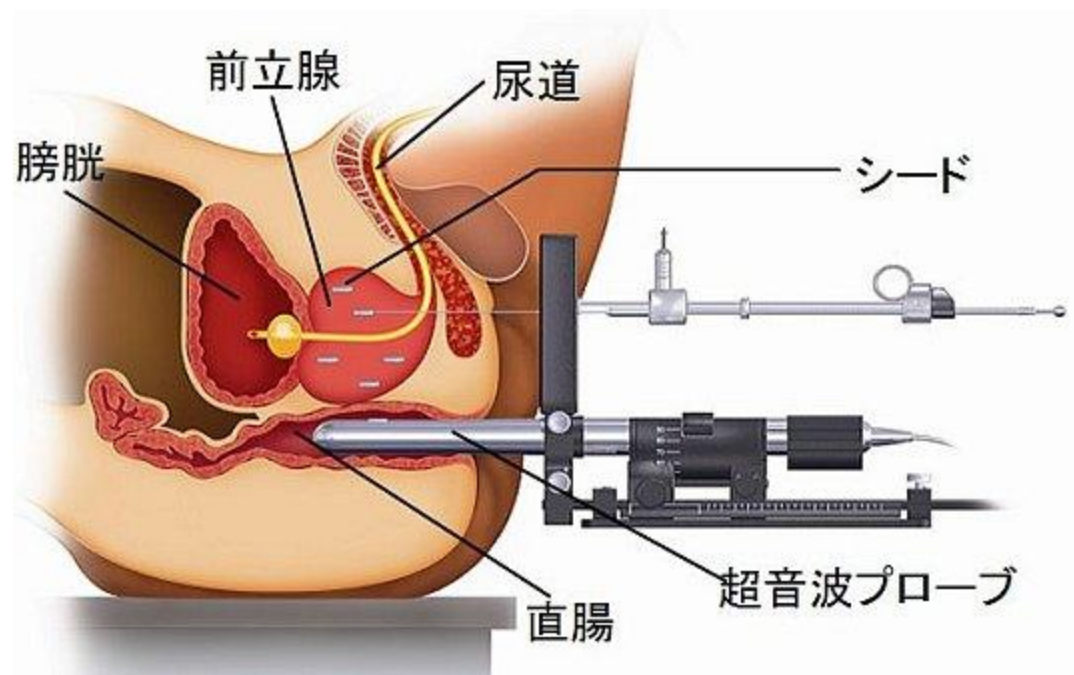
リニアック/ガンマナイフ



強度変調放射線治療(IMRT)



密封小線源組織内照射

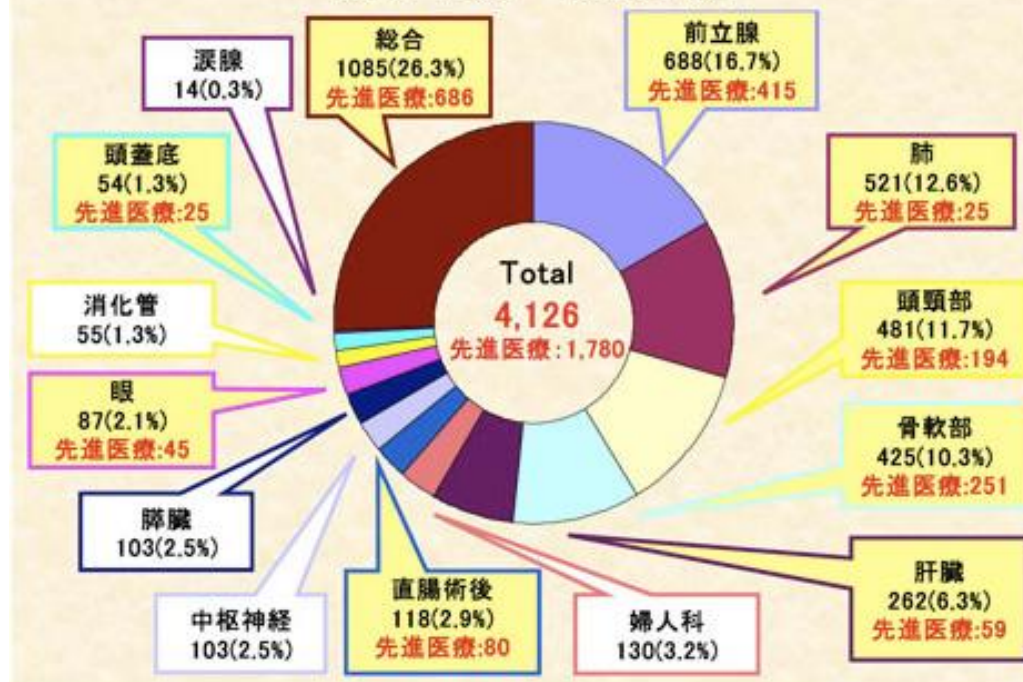


重粒子線照射



図 2-8-9 大型放射光施設 (SPring-8)

放医研における重粒子線治療の登録患者数
1994年6月～2008年8月



「文献：(独)放射線医学総合研究所 資料」



放射線治療の副作用

- 急性反応=一過性
 - － 放射線宿酔：嘔気・嘔吐、倦怠感
 - － 白血球減少：3000以下になることは少ない
 - － 放射線粘膜炎
 - 咽頭炎・喉頭炎：疼痛、味覚低下、唾液分泌障害
 - 胃腸炎：嘔気・嘔吐、下痢
 - － 放射線皮膚炎：紅斑、脱毛、皮膚炎、びらん・水疱
 - － 放射線肺炎：照射野に一致する間質性肺炎

中枢神経系

疾患	放射線治療適応・方法
転移性脳腫瘍	術後：全脳（多発）40～50Gy + 局所10～15Gy 定位照射：34個以下、3cm以下
膠芽腫	術後：全脳 50Gy + 局所 15Gy
髄芽腫	術後：全脳全脊髄25Gy + 局所30Gy
胚芽腫	全脳30Gy + 局所20Gy
悪性リンパ腫	全脳40～50Gy + 局所10～15Gy

頭頸部

疾患	放射線治療適応・方法
上顎洞癌	手術＋放射線療法＋化学療法：40～50Gy（直交2門）
上咽頭癌 中咽頭癌	45Gy（左右対向2門）＋20Gy（頸部リンパ節1門）
舌癌	T1、T2：小線源治療 T3：外部照射＋小線源治療
下咽頭癌	根治照射あるいは術後照射：45Gy（左右対向2門）＋20Gy（頸部リンパ節1門）
喉頭癌	T1、T2の声門癌、T1の声門上部癌は根治照射60Gy（左右対向2門）
甲状腺癌	手術＋必要に応じて外照射（前方1門、50Gy）あるいは ¹³¹ Iによる内照射

胸部/乳腺/消化器

疾患	放射線治療適応・方法
肺癌（小細胞癌）	化学療法＋50～60Gy
肺癌（非小細胞癌）	Stage I, II: 手術、III: 放射線＋化学療法、IV: 姑息的照射（50～60Gy前後対向2門）
胸腺腫	全摘＋40～45Gy
乳癌	
食道癌	

泌尿・生殖器/悪性リンパ腫

疾患	放射線治療適応・方法
精巣腫瘍 (精上皮腫)	高位精巣摘出術＋術後照射(傍大動脈・患側腸骨リンパ節、25Gy) IIA期は追加照射、III～IV期は手術＋化学療法 非精上皮腫は、手術＋化学療法
前立腺癌	外部照射:65～70Gy、最近は組織内照射(¹²⁵ Iシード)も多く行われるI～II:手術、III～IV:全骨盤照射(20～30Gy)＋中央遮蔽照射
子宮頸癌	(20～30Gy)＋腔内照射(Manchester法、50Gy)
Hodgkinリンパ腫	マントル照射＋逆Y型照射野:30～35Gy I、II期:6cm以下、縦隔病変なし、B症状なし、40歳以下:放射線単独 上記以外:放射線(30～40Gy)＋化学療法
非Hodgkinリンパ腫*	原則として化学療法＋放射線30Gy 低悪性度組織型のIA、IIA:放射線単独40～45Gy

*病変局在、組織型、病期により治療方針は異なる。

小児の悪性腫瘍/骨髄移植の術前

疾患	放射線治療適応・方法
神経芽腫	術後照射20～30Gy（IIB、III、IV期、ただしIV Sは除く）
Wilms腫瘍	術後照射：予後良好組織型III期→10Gy、予後不良組織型では年齢に応じて増量
急性白血病	全脳予防照射18～20Gy ALL二次寛解時、AML初回寛解時：全身照射12Gy 中枢神経系、精巣、腎再発時も照射の適応
白血病など	全身照射（TBI, Total body irradiation）10～15Gy

正常臓器の耐容線量

臓器	TD5/5	TD50/5	障害
脳・脊髄	50 (Gy)	60 (Gy)	壊死 梗塞 脊髄炎
水晶体	5	12	白内障
唾液線	50	70	唾液線 分泌障 害
口腔・食 道	60	75	潰瘍 狭窄
小腸・大 腸	45	65	閉塞 穿孔

臓器	TD5/5	TD50/5	障害
肺	40	60	間質性肺 炎
腎	23	28	腎硬化症
膀胱	60	80	間質性膀 胱炎
精巣	5～15	20	不妊
卵巣	2～3	6～12	不妊
皮膚	55	70	潰瘍 線維化

TD5/5 = 5年後に5%に障害
TD50/5= 5年後に50%に障害

全身被曝の影響

全身被曝量	前駆症状(%)	潜伏期	主な死因	主な症状	死亡率(%)
2 Gy	0～50	3時間以上		無症状～ 軽度の血球減少	0～10
2～10	100	0.5～2時間	骨髓死	血球減少 →感染、出血	0～90
10～20	100	0.5時間	消化管死	嘔吐・下痢、 吐血・下血、 脱水	90～100
50～	100	数分	中枢神経死	脳浮腫→ けいれん、 意識障害	100

前駆症状：被曝後に、悪心・嘔吐、めまい、全身倦怠感、発熱など出現。

胎児被曝

- 0.1Gy以下では、胎児に明らかな身体的影響はない。
- 通常の放射線検査では0.1Gyを超えることはない。
- 妊娠中絶の適応は0.5Gy以上。0.1～0.5Gyの場合は状況に応じて考慮。
- 胎生2週以降、1Svあたり、白血病のリスクが10から15倍、固形癌のリスクが3から4.5倍。(成人はそれぞれ5倍、1.5倍)。

放射線検査による被曝

	皮膚(mGy)	胎児(mGy)	実効線量(mSv)
胸部エックス線撮影(正面)	0.2	<0.01	0.05
腹部エックス線撮影	1.2	2.6	1.4
上部消化管撮影	3.8	0.48	1.5
注腸造影	21.5	16	7
胸部CT		0.06	7.8
骨盤CT		26	7.1
骨シンチグラム		4.5	5.9