

問題 1 放射線の致死作用において、標的分子が DNA であることを証明する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ウイルスでは DNA 量が多いほど感受性が高い。
- B 細胞に大量の ^3H チミジンを取り込ませると細胞分裂が促進される。
- C 細胞照射後の染色体異常発現頻度とコロニー形成能との間に密接な関係がある。
- D 細胞に取り込ませた場合に、同じ崩壊数で最も致死効果が大いと考えられる ^3H 標識化合物は、アラニン、チミジン、グルコース、ウリジン、メチオニン、ヒスチジン、ロイシンのうち、メチオニンである。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

解説 A 正：DNA 量と放射線感受性の関係が調べられている。B 誤：DNA に取り込まれ、分裂能は抑えられる。C 正：不安定型染色体異常が生じ、細胞分裂が阻害されるとコロニー形成能が低下する。その結果、染色体異常発現頻度とコロニー形成能との間には負の比例関係が生じる。D 誤：致死効果が最も大きいのは DNA 前駆物質である ^3H チミジンである。DNA に取り込まれた ^3H が ^3He に元素変換するため、DNA が ^3H からの β 線を被ばくするための両方による。

【解答】2

問題 1 確定的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 確定的影響はすべて身体的影響である。
- 2 全身被ばくで起こるが、局所被ばくでは起こらない。
- 3 短期の被ばくでは起こるが、長期の被ばくでは起こらない。
- 4 線量率を低くしても障害の程度は変わらない。

解説 1 正：細胞死が確定的影響のベースである。確定的影響には遺伝的影響は含まれない。2 誤：白内障・皮膚障害・不妊のように局所被ばくで発生する確定的影響もある。3 誤：再生不良性貧血・白内障などは長期の被ばくによっても発生する。4 誤：線量率が低くなれば、一般に、確定的影響の重篤度は低くなる。

【解答】1

問題 2 放射線による確率的影響に関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 放射線により体細胞に生じた突然変異が発がんの原因となる。
- 2 しきい線量は存在しないと仮定されている。
- 3 線量率を低くしても発生頻度は変わらない。
- 4 放射線による発がん率は線量とともに増加し、高線量域では低下することが多い。

解説 1 正：DNA 損傷が誘発され突然変異として固定されると、体細胞でも生殖細胞でもがんの原因になりうる。2 正：確率的影響は突然変異をベースにしており、放射線防護上はしきい線量が存在しないと仮定している。3 誤：確率的影響は線量率依存性で、線量率を低くすると発生頻度は低くなる。4 正：高線量域になると骨髄死などで死ぬ個体が増えて、発がん率は低下する。

【解答】3

問題 3 放射線による確定的影響と確率的影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 しきい線量は、同じ障害であれば、放射線の種類によらず一定である。
- 2 しきい線量は、発生・成長の時期によって大きく変動する。
- 3 しきい線量は線量率が異なっても変動しない。
- 4 確率的影響には寿命短縮が含まれる。

解 説

1 誤：しきい線量は確定的影響にだけ存在する。しきい線量は線質によって異なる。2 正：特に胎児・幼児での放射線感受性は高い。3 誤：確定的影響では亜致死損傷からの回復が認められ、線量率が低くなると、一般的に、しきい線量は高くなる。4 誤：急性死（確定的影響）やがん（確率的影響）による死亡など、特定の原因による死亡はヒトで認められているが、いわゆる老化の促進による寿命短縮（非特異的な寿命短縮）は、ヒトでは認められていないとされている。

【解答】2

問題 1 放射線の直接作用に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 直接作用の1つに、細胞内 DNA による放射線のエネルギー吸収がある。
- 2 直接作用により DNA が切断される部位はエネルギーを吸収した場所に限局される。
- 3 低 LET 放射線で生じる生物作用では、直接作用の寄与が大きい。
- 4 細胞の致死は、その高分子成分に生じたラジカルだけによる。

解 説

1 正：直接作用では、放射線のエネルギーが標的分子（DNA）に吸収されて電離や励起が起こり、その分子にラジカルが生成され、生物作用が発現する。X 線や γ 線では二次電子が電離や励起を引き起こしている。2 誤：放射線の標的は、直接作用であれ間接作用であれ DNA である。直接作用では、吸収されたエネルギーの一部が DNA 内を移動し、結合が弱い場所が損傷する場合もある。3 誤：低 LET 放射線では間接作用の寄与が大きい。4 誤：直接作用によって高分子成分に生じた有機ラジカルだけでなく、水分子との反応により細胞内に生じたラジカル・水和電子などによる間接作用も重要である。

【解答】1

問題 2 放射線の間接作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 放射線の間接作用は、主に水分子から生じたフリーラジカルによる。
 - B 水の放射線分解では OH ラジカル・H ラジカル・水和電子などが生じる。
 - C スーパーオキシド、過酸化水素、OH ラジカルは活性酸素である。
 - D 過酸化水素 (H_2O_2) は活性酸素種であるがフリーラジカルではない。
- 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ
5 ABCD すべて

解 説

A 正：原子核の周りをまわっている電子は、通常は 1 つの軌道に 2 個ずつ対をなしている。しかし、1 つの軌道に電子が 1 個しかない場合もある。このような「不対電子」を持つ原子・分子をフリーラジカル（ラジカル）と呼んでいる。水分子の電離・励起により生じるラジカルには OH ラジカル、H ラジカルなどがある。酸素分子も不対電子を持つラジカルである。フリーラジカルは極めて不安定で、他の原子・分子から電子を奪い取って安定になろうとして安定分子やラジカル同士と反応する。B 正：低 LET 放射線の生物作用の大部分は放射線により生じるラジカルによる。放射線の間接作用の媒体は主に水分子で、水の放射線分解産物である OH ラジカルによる作用が主となる。C 正：酸素呼吸に際して酸素分子は 4 つの電子を受け取って還元されて水になる。途中に 1 電子還元のスーパージオキシド、2 電子還元の前酸化水素、3 電子還元の前ラジカルが生じる。これらは反応性が高く活性酸素と呼ばれている。呼吸により取り込まれた酸素の約 1～2% は活性酸素になる。老化の一因である活性酸素が、放射線によっても生成されている。D 正： H_2O_2 は OH ラジカル同士の結合などにより生じる。不対電子を持たないのでラジカルではないが、活性酸素である。生物作用は OH ラジカルより弱い。スーパージオキシドとの共存や、鉄 (II) イオンなどの触媒効果により、OH ラジカルを生成する。 H_2O_2 はカタラーゼ処理により水分子と酸素分子に分解されるが、スーパージオキシドジスムターゼ (SOD) によっては分解されない。

【解答】 5

問題 3 放射線による DNA 損傷などに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A DNA 損傷には、塩基損傷、1 本鎖切断、2 本鎖切断などがある。
 - B DNA 損傷は必ず染色体異常となる。
 - C 低 LET 放射線では、低酸素条件下に置かれると DNA 損傷は減少する。
 - D 紫外線と γ 線は、同じ種類の DNA 損傷を生成する。
- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

解 説

A 正：この 3 種の損傷のうちでは、塩基損傷が最も高い頻度で発生し、2 本鎖切断の発生頻度が一番低い。ほかに糖やリン酸の損傷、架橋形成などもある。B 誤：DNA 損傷の結果は、①修復されて元に戻る、②修復できずに細胞に死をもたらす、③細胞に突然変異（遺伝子突然変異・染色体異常）をもたらす、のいずれかである。細胞死と突然変異では放射線の生物影響として検出される。しかし、DNA 損傷は修復される。DNA 損傷が必ず染色体異常になるわけではない。C 正：酸素は放射線増感作用を持つ。低酸素状態では低 LET 放射線の生物作用は軽減する。D 誤：紫外線には励起作用はあるが電離作用はない。紫外線では鎖切断は生じないが、塩基損傷・架橋は生じる。

【解答】 2

問題 4 放射線による DNA の塩基損傷・鎖切断に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 塩基損傷の場合には、放射線の DNA への直接作用が主要な原因である。
- 2 突然変異の原因となるのは塩基損傷だけである。
- 3 DNA の 2 重鎖切断は、放射線以外に通常の代謝過程でも生成される。
- 4 1 本鎖切断と 2 本鎖切断の数の割合は、放射線の種類によらず 10 : 1 である。
- 5 細胞死の原因として最も重要なのは 2 本鎖切断である。
- 6 細胞周期によって鎖切断の効率が大きく変動する。

解説と解答

1 ×：塩基損傷は直接作用でも生じるが、間接作用の方が起こしやすい。2 ×：突然変異は、塩基損傷よりも鎖切断によって起こりやすい。3 ○：通常の代謝で発生した活性酸素によっても 2 重鎖切断は発生する。放射線による鎖切断は、塩基の損傷によっても糖やリン酸の損傷によっても発生する。4 ×：2 本鎖切断発生には、1 本鎖切断発生の約 10 ～ 20 倍のエネルギーが必要で、1 本鎖切断の方が 2 本鎖切断より起こりやすい。1 本鎖切断と 2 本鎖切断の割合は LET によって異なり、低 LET 放射線では 1 本鎖切断は 2 本鎖切断の 10 倍程度生成される。速中性子線のような高 LET 放射線では、1 本鎖切断に対する 2 本鎖切断の割合が増えるが、2 本鎖切断が 1 本鎖切断より増えることはない。5 ○：1 本鎖切断に比べ 2 本鎖切断の修復は難しく、細胞死の原因として最も重要である。一方、塩基損傷も細胞死の原因となる。この場合、塩基損傷そのものも細胞死の原因にもなるし、塩基損傷が引き起こした鎖切断が細胞死の原因となる場合もある。6 ×：細胞周期によって放射線感受性は異なるが、これは主に修復能の差によるものである。細胞周期によって鎖切断の効率が大きく変動することはない。また、低 LET 放射線の低酸素条件下では切断数は減る。

問題 5 放射線による DNA 損傷とその修復に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A DNA 修復は細胞周期のどの時期でも同じ程度に起こる。
 - B G_1 期と G_2 期に起こる DNA 合成を、修復（不定期）DNA 合成と呼ぶ。
 - C システアミンは DNA 鎖切断の修復に効果的に効く。
 - D 光回復は紫外線による DNA 損傷の修復にのみ有効である。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D

解説

A 誤：細胞の放射線感受性は細胞周期により異なるが、DNA 修復の程度も細胞周期により異なっている。例えば、相同組換え修復は DNA が複製された後の S 期後期から G_2 期で作動し、非同源末端結合修復は G_1 期と G_0 期で活発に作動する。B 正：DNA は通常は S 期に合成され、 G_1 期、 G_2 期では合成されない。しかし紫外線などにより DNA に損傷が生じると、修復のために G_1 期と G_2 期においても DNA が合成される。これを修復（不定期）DNA 合成と呼んでいる。C 誤：ラジカルスカベンジャーであるシステアミンは間接作用を抑制するので、DNA 鎖切断の発生を抑える。しかし、DNA 修復には関与しない。D 正。

【解答】 4

問題 1 分裂死・間期死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 分裂死は M 期で照射された細胞に特異的に見られる現象である。
 - B 繊維芽細胞と固形がんの細胞死は、主に増殖死による。
 - C リンパ球系細胞では、低線量で間期死が起こりやすい。
 - D 神経細胞の細胞死は、主に間期死による。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説

A 誤：分裂死は細胞周期のいかなる時期でも発生する。B 正：増殖死と分裂死はほぼ同義語である。C 正：リンパ球・胸腺細胞・卵母細胞では低線量で間期死が認められ、高感受性間期死と呼ばれている。D 正：神経細胞は成人では分化を終えた非分裂系の細胞で、放射線感受性が極めて低く、分裂死は認められない。しかし大線量では被ばくした細胞そのものが死ぬ間期死が起こりうる。これを低感受性間期死といい、筋肉細胞などでも認められる。

【解答】 4

問題 2 アポトーシスに関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 リンパ球や胸腺細胞では γ 線 20 Gy 以上の大線量を照射した場合に見られる。
- 2 アポトーシスは損傷を受けた細胞を積極的に殺し、個体を保護する機構である。
- 3 M 期で照射された細胞に特異的に見られる。
- 4 被ばく後 24 時間以上経過してから起こる。

解説

1 誤：リンパ球や胸腺細胞では 0.05 ~ 0.1 Gy でアポトーシスが起こる。アポトーシスを起こす胸腺細胞やリンパ球では核濃縮や DNA の断片化が起こるが、これは染色体異常ではない。2 正：アポトーシスは低線量照射における間期死であり、細胞分裂を待たずに速やかに死に至る。生体の自己防御機構の 1 つで、細胞が死ぬことで奇形や発がんが防がれる場合がある。3 誤：細胞周期の特定時期だけで生じるわけではない。4 誤：例えば放射線誘発リンパ腫から樹立した細胞株では、照射 4 時間で 90 % 以上の細胞がアポトーシスを起こす。

【解答】 2

問題 3 放射線照射した後の哺乳動物培養細胞の生存率曲線（線量を線形目盛で横軸に、生存率を対数目盛で縦軸にプロットしたもの）に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 ほとんどの生存率曲線では、肩をもち、外挿値が 1 より大きくなる。
- 2 酸素の存在下で照射すると傾きが急になる。
- 3 線量率を低くすると傾きが急になる。
- 4 ラジカルスカベンジャーの存在下で照射すると傾きが急になる。
- 5 同じ線量率で照射した場合、速中性子線では、 γ 線よりも傾きが急である。
- 6 同じ線量で与えるとき、その分割回数を増やしていくと、生存率曲線は片対数グラフ上で直線に近づく。

解説と解答

1 ○：培養細胞では多重標的 1 ヒットモデルに相当し、肩のある外挿値が 1 より大きな曲線となる。2 ○：酸素は放射線増感剤である。酸素存在下では生存率は小さくなり、生存率曲線の傾きは急になる。3 ×：線量率を低くすると亜致死損傷からの回復が起こり、線量-生存率曲線の傾きは緩やかになる。4 ×：ラジカルが減少するので、間接作用による DNA 損傷が少なくなり、線量-生存率曲線の傾きは緩やかになる。5 ○：高 LET 放射線の速中性子線は生物効果が強く、亜致死損傷からの回復が少ない。低 LET 放射線の γ 線よりも線量-生存率曲線の傾きは急になる。6 ○：分割回数を増やすと亜致死損傷からの回復がその度に起こり、生存率曲線は肩がなくなり直線に近づく。

問題 4 細胞周期と放射線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 末梢リンパ球および成人の神経細胞は、 G_0 期の細胞である。
 - B 放射線照射により、直ちに細胞周期の進行が停止する。
 - C 照射により細胞周期の進行が停止する細胞はすべて死に至る。
 - D 細胞の生存率を指標にした場合、細胞周期のうち放射線に最も抵抗性なのは S 期後半で、最も高感受性なのは G_2 期～M 期である。
 - E 増殖期にある細胞では、X 線感受性の細胞周期依存性が低い。
- 1 AB のみ 2 AD のみ 3 BC のみ 4 CD のみ 5 DE のみ

解説 A 正： G_1 期の細胞には細胞分裂を行わずに G_1 期に長く留まっているものがある。このような細胞では G_1 期を G_0 期と呼んで G_1 期と区別している。
 B 誤：放射線による分裂死では直ちに細胞周期が停止するのではなく、数回の分裂を経てから進行が停止し死に至る。C 誤：照射により細胞周期の進行が停止した細胞でも停止中に DNA 修復がなされ、分裂を再開する細胞がある。D 正：感受性がとくに低い時期は S 期後半で、 G_1 期の初めも低い。 G_2 期後期～M 期、とくに M 期は感受性が高く、 G_1 期の終わりから S 期初期にかけても高感受性である。E 誤：増殖期の細胞では細胞周期がよく進行しており、細胞周期による放射線感受性の差が見られやすい。【解答】2

問題 5 放射線による分裂遅延に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 照射後、細胞周期の進行は S 期と G_2 期の 2 カ所で停止する。
- 2 がん抑制遺伝子産物の 1 つである p53 タンパク質は、細胞周期の停止に関与する因子の 1 つでもある。
- 3 照射による細胞周期進行の停止は分裂指数の低下として観察される。
- 4 分裂遅延の持続時間は、線量と無関係である。
- 5 分裂遅延は DNA 損傷をもった細胞を除去する機構の 1 つである。
- 6 DNA 複製が遅れた時には、細胞周期チェックポイントの仕組みが働き、細胞周期を一時停止して DNA 複製の完了を待つことがある。

解説と解答 1 ×：細胞分裂の遅延には、 G_1 ブロックと G_2 ブロックがある。細胞周期チェックポイントは G_1 期・S 期・ G_2 期で見られる。DNA の障害が細胞周期停止の主な原因である。2 ○：p53 遺伝子はがん抑制遺伝子の 1 つであり、遺伝子産物として p53 タンパク質をつくる。この p53 タンパク質は細胞周期を調節し、DNA が修復不可能な損傷を受けた場合には細胞の自殺でもあるアポトーシスを誘導する。3 ○：全細胞の中での細胞分裂を行っている細胞の割合、すなわち M 期の細胞の割合が分裂指数である。分裂遅延後の分裂指数は線量が高いほど低下する。4 ×：分裂遅延の持続時間は一般に線量に依存し、線量が多ければ分裂遅延の持続時間は長くなる。5 ×：分裂遅延の間に DNA 損傷が修復され細胞が死から免れる場合がある。分裂遅延は細胞を除去するためのものではなく、細胞死を回避する仕組みの 1 つである。6 ○：細胞周期チェックポイントは細胞周期の進行状況や DNA 損傷の有無をチェックする自己診断機構で、個体維持のための必要な仕組みとなっている。

問題 6 照射後の亜致死損傷からの回復（SLD 回復：エルカインド回復）に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 分割照射は亜致死損傷を回復させる。
 - B 細胞周期のどの時期に照射されても、亜致死損傷からの回復は同じ程度に起こる。
 - C 亜致死損傷回復では平均致死線量 (D_0) は変化しない。
 - D 亜致死損傷からの回復は通常 1 時間以内で完了する。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解 説

A 正： n 個のヒットが標的に当たった場合に細胞が死ぬと想定した場合、分割照射や低線量率照射では $(n-1)$ 個以下のヒットしか受けない細胞が増える。これらの細胞は亜致死損傷を受けた細胞と呼ばれ、次のヒットがなければすべての細胞が元に戻る。これが亜致死損傷からの回復である（図 3.2）。急照射の場合でも低線量であれば亜致死損傷からの回復は起こりうる。正常分裂細胞でもがん細胞でも認められる。亜致死損傷からの回復は DNA 合成に依存する。B 誤：細胞致死に対して高感受性の M 期の細胞は、他の時期の細胞に比べて亜致死損傷からの回復は小さい。C 正：亜致死損傷からの回復は生存率曲線の肩 (D_q) の大小で表され、平均致死線量は変化しない。D 誤：培養細胞では生存率の上昇は、例えば分割照射の照射間隔 30 分から認められ、照射間隔 4 時間ではほぼ最大になる。一方、組織の晩発障害では、6 時間以上の照射間隔が必要とされている。

【解答】 2

問題 7 照射後の潜在的致死損傷からの回復（PLD 回復）に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 潜在的致死損傷とは照射後細胞をどのような条件においても致死に至らない潜在的な損傷をいう。
- 2 細胞分裂遅延が関連すると推定されている。
- 3 潜在的致死損傷回復は、細胞の生存率曲線の肩として観察される。
- 4 潜在的致死損傷からの回復は通常 2 時間以内で完了する。

解 説

1 誤：照射後の細胞培養の環境条件によって生存率の上昇が見られることがあり、潜在的致死損傷からの回復という。例えば照射後に増殖に不適当な条件におかれた細胞（低栄養・低酸素・低 pH 状態などに置かれた細胞）やプラトー期の細胞では PLD 回復が起こる。対数増殖期の細胞では潜在的致死損傷からの回復は通常は見られない。生体内の腫瘍を構成する細胞でも密に接触し緩やかに分裂している細胞があり、この細胞が照射されると PLD 回復が起こる。2 正：本来であれば、 n 個以上のヒットを受けた細胞は分裂死により細胞分裂能を失う。PLD 回復では、 n 個以上のヒットを受けても、細胞環境が増殖に不適当で分裂が遅延している間に、致死的な損傷を修復する時間が与えられ、回復が起こると考えられている。3 誤：生存率曲線の肩の大小として観察されるのは、亜致死損傷からの回復である。4 誤：傷の修復に必要な時間は、1 時間以内のもの、2～6 時間以内のもの、8 時間以上のものなどが報告されている。

【解答】 2

問題 8 放射線誘発突然変異に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A DNA に生じた変化が、何回かの細胞分裂を経て突然変異として固定される。
 - B 精原細胞は、精子よりも突然変異感受性が低い。
 - C 受精後の卵細胞では放射線による突然変異は発生しにくい。
 - D 生殖細胞での誘発率には性差がある。
 - E 特定座位法は、親の生殖細胞に起こった突然変異を次の世代で検出する方法である。
- 1 ABC のみ 2 ABE のみ 3 ACE のみ 4 BCD のみ
5 ABDE のみ

解説

A 正：突然変異は細胞死を免れた細胞で問題となる。DNA 損傷が正しく修復されないで遺伝情報の誤りとして固定されたものが突然変異である。突然変異は、核内の DNA の障害が原因である。突然変異は、直接作用でも間接作用でも誘発される。体細胞に生じた突然変異はがんを誘発する可能性がある。生殖細胞に生じた突然変異は遺伝的影響を引き起こす可能性がある。

B 正：突然変異率は、精子形成過程（精原細胞→精母細胞→精細胞→精子と分化する）を通して変動する。突然変異での放射線感受性は、精細胞と精母細胞で高く、精子がこれに続き、精原細胞では低い。致死感受性の順番とは異なっていることに注意しよう。マウスの精原細胞では線量率効果がみられる。これは精原細胞には修復機構が存在するためである。精子は成熟した細胞であり、DNA 損傷修復能を失っている。

C 誤：受精後の卵分割の時には感受性が特に高い。また卵子形成過程では、卵原細胞から初期の卵母細胞よりも、後期の卵母細胞で突然変異率が高くなる。突然変異の中には、受精卵の発生過程で淘汰されるものもある。

D 正：動物実験では雄は雌より誘発率が高いとされている。しかし放射線防護上の観点からは性差はないものとしている。

E 正：遺伝子突然変異は DNA 損傷が固定された状態であり、照射直後に検出できるわけではない。培養細胞や実験動物を使って調べることになる。特定座位法では、正常な雄（AA）に放射線照射した後にテスト系の雌（ホモの変異体：aa）と交配させ、生まれてきた子供が見かけ上正常なヘテロ（Aa）になれば放射線による変異はなし、子供にホモの変異体（aa）が出現した場合は雄の生殖細胞に突然変異（A→a）が起こったと判断する。

【解答】5

問題 9 倍加線量に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 倍加線量とは総突然変異を自然突然変異率の2倍にする線量である。
- 2 倍加線量は生物種が異なっても変わらない。
- 3 倍加線量が大きいほど遺伝的影響は起こりにくい。

解説と解答

1 ○：突然変異は自然界に発生している。そこで放射線による遺伝的リスクを推定する指標として、倍加線量がある。

2 ×：倍加線量は生物種によって異なるが、ヒトでは実験することができない。ヒトでの遺伝的影響を推定する場合には、マウスの倍加線量を参考にしている。

3 ○：倍加線量が大きければ、自然突然変異率を2倍にする線量が大きくなるということである。倍加線量が大きいほど、突然変異誘発での放射線感受性は低くなる。

問題 10 染色体に対する放射線の作用に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 血液中のリンパ球を培養して検査することができる。
 - B 構造の異常を分子生物学的手法で検出することが可能である。
 - C 数の異常と構造の異常は、同じ程度で起こる。
 - D G_1 期細胞の染色体異常は M 期細胞と融合することにより観察できる。
- 1 ABD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ
5 ABCD すべて

解 説

A 正：染色体分析には末梢リンパ球が最も適している。染色体異常は細胞周期のどの時期に被ばくしても発生するが、染色体異常発生の放射線感受性は分裂期で高いことが知られている。染色体異常が観察できるのは分裂期の細胞のみである。B 正：FISH (fluorescence in situ hybridization) 法では、蛍光物質で標識された DNA を用いて蛍光顕微鏡で安定型染色体異常を検出できる。C 誤：数の異常は放射線では発生しないといわれている。構造の異常には、二動原体・環状・動原体のない断片などのほか、欠失・逆位・転座などがある。X 線では鎖切断が起こり、自然突然変異に比べ、欠失型が多い。D 正：細胞周期チェックポイントにより、 G_1 期細胞の染色体異常は細胞周期の進行を止める。M 期の細胞とこの細胞とを融合させると、DNA の再合成が始まり細胞周期が進行し、次の M 期では染色体異常が観察できる。

【解答】 1

問題 11 染色体に対する放射線の作用に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 線量の違いにより、染色体型異常または染色分体型異常が生じる。
 - B 染色体異常には、安定型と不安定型がある。
 - C 環状染色体・二動原体染色体は不安定型異常で、正常な細胞分裂ができない。
 - D 直線-2 次曲線モデルは、低線量域では線量に比例し、高線量域では線量の二乗に比例して効果が生じることを示している。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解 説

A 誤：被ばく時期の違いにより、染色体型と染色分体型に分類される。B 正：安定型の染色体異常には端部欠失・逆位・転座・姉妹染色分体交換などがあり、これらの異常は細胞分裂によって引き継がれるため、がんの原因となりうる。C 正：不安定型は環状染色体や二動原体染色体などで、染色体が両極に分かれることができないので正常な細胞分裂が行われない。不安定型は細胞死に進展し、早期に消滅してしまうため、がんの原因にはならない。D 正：末端欠失は染色体の一端の切断で生じ、その頻度は線量に比例する。また、中間欠失は染色体の中間部分 2 カ所が切られて生じるもので、2 ヒット型の染色体異常である。

【解答】 4

問題 1 放射線と細胞再生系に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 ヒトのからだは、細胞再生系だけでできている。
- 2 細胞再生系に属するすべての細胞が、同じ程度の分裂能を持つ。
- 3 幹細胞の感受性が高いことが、細胞再生系の高感受性の原因である。
- 4 中枢神経死には幹細胞の障害が関与している。

解説

1 誤。2 誤：細胞再生系では細胞は、幹細胞→幼若細胞（移行細胞）→成熟細胞（機能細胞）へと分裂・分化する。細胞再生系細胞の分裂能は細胞の種類や分化の程度により異なる。3 正：幹細胞は一番未分化な細胞で放射線感受性が高い。幹細胞の細胞分裂が抑えられると細胞の供給が途絶え、組織では細胞が欠損し確定的影響が発生する。感受性の高い幼若細胞でも分裂死は起こる。4 誤：中枢神経系には幹細胞はほとんど存在しない。

【解答】 3

問題 2 細胞の放射線感受性（致死感受性）に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 増殖系細胞は、放射線感受性が高い。
- B 分裂死に伴い観察される巨大細胞は、放射線感受性が高い。
- C リンパ球・卵細胞・腸腺窩細胞は放射線高感受性細胞で、肺胞上皮細胞・肝細胞・赤血球・筋細胞・神経細胞は放射線抵抗性の細胞である。
- D 神経細胞・筋肉細胞は細胞非再生系に属し放射線感受性は低く、精原細胞・骨髄細胞・腸腺窩細胞は細胞再生系に属し放射線感受性が高い。

- 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ
- 5 ABCD すべて

解説

A 正：増殖系細胞は細胞分裂の頻度が高く、将来行う細胞分裂の数も大きいので、放射線感受性が高い。一方、非増殖系細胞は放射線の影響を受けにくい。B 誤：放射線により細胞分裂が止まっても、DNA合成やタンパク質合成が続けられると巨大細胞が生じる。巨大細胞は通常は細胞死へと進展するが、放射線感受性が高いわけではない。C 正：上記のうち一番放射線感受性が高い細胞はリンパ球である。卵母細胞はリンパ球と同程度の放射線感受性を示すが、卵母細胞より分化した卵細胞では感受性は低くなる。D 正。

【解答】 1

問題 3 放射線全身被ばくによる造血障害に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 血球数の変動は、個人差を無視できる。
- 2 末梢血液の検査では、細胞再生系である骨髄への放射線影響は評価できない。
- 3 半致死線量照射後のすべての末梢血液細胞は、それぞれ本来の細胞寿命に従って数が減る。
- 4 脊椎骨だけを防護すれば、血球減少を防ぐことができる。

解説と解答

1 ×：白血球数では個人差が大きく、とくに異常がなくても正常範囲から外れるヒトもいる。平常からの各個人の正常値を把握しておく必要がある。2 ×：末梢血液中の各種血球細胞の消長は、骨髄の放射線影響を反映している。3 ×：アポトーシスが起こるリンパ球では、本来の寿命を全うしないで細胞死に至る。4 ×：血液細胞をつくる赤色骨髄は脊椎骨だけでなく、肋骨・胸骨・骨盤などにも存在する。そこで脊椎骨だけを防護しても血球減少を防ぐことはできない。

問題 4 放射線全身被ばくによる造血障害に関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 リンパ球は血液細胞の中でも感受性が極めて高く、亜致死線量程度の被ばくで最初に減少する。
- 2 3 Gy の X 線全身被ばく後 48 時間以内に、末梢血リンパ球は正常の 1/10 に減少した。
- 3 各種リンパ球の放射線感受性を比較すると、B 細胞は T 細胞より感受性が高い。
- 4 リンパ球が減少すると出血しやすくなる。
- 5 被ばく後 24 時間以内に一過性の好中球の増加が認められることがある。

解説

1 正：成熟リンパ球はアポトーシスにより死亡し、各種成熟血球細胞の中では放射線感受性が最も高い。さらに成熟リンパ球の寿命は短い。そこで照射後に末梢血液において最初に減少する血球はリンパ球で、被ばく後 4 時間以内にも減少する。減少した後も比較的長く減少状態が続き、リンパ球の回復は早くはない。2 正。3 正：リンパ球には B 細胞（B リンパ球）と T 細胞（T リンパ球）がある。B 細胞は骨髄（Bone marrow）で形成される。T 細胞の幹細胞も骨髄に存在するが胸腺（Thymus）に移り、そこで分化成熟して T 細胞となる。マウスでは、B 細胞の生存率曲線は肩のない指数関数である。一方、T 細胞の生存率曲線には肩があり、T 細胞には一部放射線抵抗性の集団もある。また、白血球の 1 種であるマクロファージは T 細胞よりも放射線抵抗性である。4 誤：被ばくによりリンパ球数が減ると免疫機能低下が起こる。被ばく後の出血は血小板の減少によって起こる。5 正：白血球は大きく分けるとリンパ球と顆粒球からなっている。顆粒球には好酸球、好中球および好塩基球が存在するが、これら顆粒球の放射線感受性はほぼ等しい。顆粒球の減少はリンパ球減少について発生する。照射直後に一時的に好中球が増加する場合がある。これは脾臓などの貯蔵プールから放出されたもので、初期白血球増多と呼んでいる。

【解答】4

問題 5 放射線全身被ばくによる造血障害に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 末梢血液細胞の中で放射線感受性が最も高いのは血小板である。
 - B 放射線被ばく後の血小板の減少および回復は、いずれも顆粒球よりも遅い。
 - C 数 Gy の全身急性被ばくにより、末梢血液中でも最も遅く減少するのは、赤血球である。
 - D 顆粒球、赤血球は放射線に抵抗性で、15 日以上ほとんど変化しない。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解説

A 誤：末梢血液細胞の放射線感受性は高い順から、リンパ球、顆粒球、血小板、赤血球である。B 正：成熟血小板の寿命は 9 日程度で、血小板は被ばく後 3～8 日で減少し始め、被ばく後 2～4 週間後で最低値を示した後、回復に向かう。C 正：2Gy 以上の被ばくにより末梢赤血球数は減少する。照射後の末梢血液細胞の消長を考えるには、a) 各血球細胞の幹細胞から成熟細胞になるまでに要する時間、各成熟血球の寿命、b) 各血球細胞（幹細胞から成熟細胞まで）の放射線感受性が重要である。被ばく後の末梢血液中の細胞は、リンパ球→顆粒球→血小板→赤血球の順に減少し、顆粒球→血小板→赤血球→リンパ球の順で回復していく。赤血球の減少は一番遅れて始まる。D 誤：成熟赤血球は、寿命が 120 日程度と長く放射線抵抗性でもあり、照射 2 週間から 20 日前後に緩やかに減少し始める。一方、成熟顆粒球は寿命が 10～12 日程度で高感受性でもあり、被ばく 3～4 日後で最低となる。

【解答】3

問題 6 放射線被ばくと骨髄移植に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 造血器系障害は骨髄移植により回復できる可能性がある。
 - B 約 10 Gy の放射線を照射されたマウスへ、系統が異なるマウスの骨髄を移植すると、骨髄キメラが成立する。
 - C 骨髄移植での全身照射は免疫担当細胞の除去を目的としている。
 - D 事故被ばく者への骨髄移植法は、常に有効である。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説

A 正：骨髄移植では、造血幹細胞を移植して失われた造血機能の回復を図る。成功すると、骨髄死を逃れて延命されることになる。X線を照射されたマウスに骨髄移植を行うとき、同じ系統の間では移植は成功の確率が高い。一方、異系統間での骨髄移植では、拒否反応のため移植は難しくなる。
B 正：キメラとはギリシャ神話に登場するライオンの頭にヤギの胴体、ヘビの尻尾を持つ生物である。全致死線量に相当する線量を宿主に照射すると拒否反応が抑えられて、宿主で遺伝子型の異なる骨髄細胞が共存可能となる。これを骨髄キメラと呼ぶ。
C 正：ただし亜致死線量程度の全身照射では宿主の免疫担当細胞は除去されないため拒否反応を抑えることはできず、放射線キメラは成立しない。
D 誤：拒否反応の問題があり、チェルノブイリ事故やJCO事故では、骨髄移植による延命効果は必ずしも有効ではなかった。

【解答】1

問題 7 皮膚の放射線障害に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 脱毛のしきい線量は 2 Gy、紅斑のしきい線量は 3 Gy、水疱のしきい線量は 5 Gy、潰瘍のしきい線量は 30 Gy である。
 - B 皮膚に局所的に ^{60}Co - γ 線 5 Gy の急性被ばくを受けたときに見られる可能性のある症状は、脱毛・紅斑・色素沈着である。水泡形成、潰瘍形成は認められない。
 - C 25 Gy の被ばくで、一時的な潰瘍が早期障害として現れるが、慢性的影響は認めない。
 - D 50 Gy の被ばくでは、慢性潰瘍となり、発がんの危険性が高くなる。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解説

A 誤：皮膚でのしきい線量は 110 ページを参照のこと。B 正：5 Gy 以下の被ばくで見られる脱毛は被ばく 1～2 週間程度の後に始まるが、これは一時的で通常は元どおりに回復する。C 誤：萎縮・血管拡張・色素沈着・慢性潰瘍などの慢性的影響が現れる。D 正：慢性潰瘍のしきい線量は 20 Gy 以上である。皮膚における致死がんの発生確率は $0.02 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ であり、50 Gy の被ばくでは発がんの危険性は高くなる。

【解答】4

問題 8 生殖腺に対する放射線の影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 精子に比べ精原細胞の方が致死感受性は高い。
 - B 男性の一時的不妊は被ばく直後から起こる。
 - C 性的成熟期には、卵巢中のすべての卵子がすでに成熟しているので、すべての卵子の放射線感受性は同じである。
 - D 卵巣が 1.5 ～ 2Gy 程度被ばくすると一時的な不妊が起こる。
- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と D 5 C と D

解説

A 正：精子形成過程では、幹細胞である精原細胞 A から精原細胞 B → 第一次精母細胞 → 第二次精母細胞 → 精細胞を経て精子となる。このうち最も致死感受性が高いのは精原細胞 B で、0.15 Gy 程度で分裂死が認められる。それ以降は、分化するに従って致死感受性は低くなる。B 誤：男性の不妊は幹細胞である精原細胞の分裂死が原因である。精原細胞が分化して成熟した精子になるのには約 70 日かかり、成熟した精子の寿命は 40 日ほどである。成熟精子は比較的放射線抵抗性である。そこで、生殖腺の被ばくにより精子数が減少して不妊になるのは被ばく 2 ヶ月以降である。C 誤：卵子の形成過程は、卵原細胞（幹細胞）→ 第 1 次卵母細胞 → 第 2 次卵母細胞 → 卵子である。ヒトの卵子形成では、幹細胞である卵原細胞は胎児期にのみに存在する。出生後の卵巣には分裂可能な細胞は存在しないので、出生後の卵巣は細胞非再生系である。しかし、分化を再開した卵母細胞は放射線感受性が極めて高く、すべての卵子が同じ感受性ではない。D 正：不妊に関するしきい線量は p110 を参照のこと。

【解答】 3

問題 1 γ 線や X 線の急性全身被ばくなどに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 急性障害の発症までの期間は線量によらず一定である。
 - B 0.1 Gy の急性全身被ばくでは、染色体異常が見つかる可能性がある。
 - C 0.2 Gy 程度の全身被ばくでも、精子数の減少が観察されうる。
 - D 1 Gy の被ばくでは全身症状は見られない。
 - E γ 線の急性被ばくの場合に、しきい線量が 1 Gy よりも小さいとされている身体的影響は、脱毛、女性の永久不妊、白内障、リンパ球の減少のうち、白内障だけである。
- 1 AB のみ 2 AE のみ 3 BC のみ 4 CD のみ 5 DE のみ

解説

A 誤：潜伏期は線量だけでなく、障害の種類によっても変わる。B 正：時間を掛けて精密検査を行うと、0.05 Gy 程度の全身被ばくでも染色体異常の増加が観察できる。C 正。D 誤：1Gy の全身被ばくでは、全身症状として放射線宿酔などの前駆症状が発現する可能性がある。E 誤：それぞれのしきい線量は p110 を参照のこと。白内障は晩発障害である。

【解答】 3

問題 2 γ 線や X 線の急性全身被ばくなどに関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 5 Gy の被ばくでは救命が可能である。
- 2 ヒトの半致死線量は 7 Gy 程度とされている。
- 3 γ 線 10 Gy の全身被ばくを受けた場合、急性障害が発生する組織は、骨髄、皮膚、小腸、生殖腺、水晶体などである。
- 4 100 Gy の被ばくでは 2 週間以上生存するが、救命の方法はない。

解説 1 正：5 Gy 被ばくでの死因は造血器障害であり、治療しなければ 50 % 程度のヒトが 60 日以内に死亡する。しかし、無菌室の利用・抗生物質投与・輸血・サイトカイン投与・放射線皮膚炎の治療などにより、救命が可能である。2 誤：7 Gy は従来からは全致死線量に近い線量とされてきたが、医療の進歩により救命の可能性がかなりある。3 誤：この線量で水晶体が問題となるのは混濁・白内障であるが、これらは晩発障害であり急性障害ではない。この線量では治療により延命できる可能性はかなり低い。しかし、10 Gy の γ 線全身被ばくでも治療により延命できないわけではない。4 誤：中枢神経死の領域で被ばく後数時間～5 日の間に死亡し、延命の可能性はない。

【解答】1

問題 3 放射線による骨髓死（造血死）に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 骨髓死は放射線による造血幹細胞の死滅が原因である。
 - B マウスに $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を全身 1 回照射し、その後の経過を観察したところ、1 日当たりの個体死亡率は 10 日前後が最も高かった。この場合の考えられる吸収線量は 5～8 Gy 程度であり、個体死亡の原因となった主な臓器は骨髓である。
 - C 被ばく線量が高いほど、骨髓死の起こる時期が早まる。
 - D これまでのヒトの事故被ばく例から、正確な骨髓死線量が推定されている。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ

解説 A 正：その結果、白血球数減少による免疫機能低下・細菌感染と、血小板減少による出血が、骨髓死の原因となる。B 正：ただしマウスとヒトでは同じ時間経過をたどるわけではない。C 正：線量が高いほど白血球・血小板の減少は激しく、死亡時期も早まる。10 Gy 以下での平均生存期間の低下は主に骨髓死が原因である。D 誤：線量推定には多少なりとも不確かさが存在する。また、個人差が存在する上に、被ばく後の医療処置によっても骨髓死の線量は異なり、厳密な意味では、正確な骨髓死線量が推定されているわけではない。

【解答】1

問題 4 半致死線量などに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 2～10 Gy の γ 線 1 回照射を受けた哺乳動物の約半数は、30 日以内に骨髓死する。
 - B 動物種により致死感受性が異なる。
 - C 半致死線量程度の被ばくで骨髓死が起こる。
 - D 実験動物の骨髓死を起こす線量の一般的な目安として $\text{LD}_{50(30)}$ を使うことは妥当である。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説 A 正：この線量域では、例えば動物実験が良く行われるマウスでは、およそ半数が被ばく後 30 日以内に骨髓死により死亡する。B 正：致死感受性を示す半致死線量・全致死線量は動物種によって異なる。C 正。D 正： $\text{LD}_{50(30)}$ の線量では骨髓死が生じる。

【解答】5

問題 5 放射線による腸死（消化管死）に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 腸死の原因は、腸の腺窩部での細胞分裂が止まる結果、腸上皮への細胞の供給が停止することにある。
 B マウスを 10～数十 Gy で全身照射すると、この線量の範囲では線量に関係なく死ぬまでの平均日数が 3.5 日である。
 C 消化管死は骨髓死より潜伏期間が長い。
 D 高 LET 放射線でも、低 LET 放射線でも同程度の吸収線量で見られる。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解説

A 正：8～数十 Gy 程度の被ばくでの平均生存期間を決定する要因は主に消化管系障害である。確定的影響での消化管の放射線感受性は高い順から、小腸＞大腸＞胃＞食道＝口腔である。B 正：腸死の線量域では生存日数は線量にかかわらず動物種に応じて一定となる。例えばマウスでの生存日数は被ばく後 3～5 日程度である。腸の吸収上皮細胞の供給が途絶える中で、既に存在している吸収上皮細胞の寿命がつきる期間に生存日数が対応するためである。この腸死の線量域を線量不依存域と呼んでいる。生存時間が線量に依存しない線量不依存域では、消化管障害が主な死因である。C 誤：マウスでは、腸死での生存日数は 3～5 日程度、骨髓死での生存日数は 30 日以内である。ヒトでは、腸死での生存日数は 10～20 日程度、骨髓死での生存日数は 30～60 日程度である。消化管障害が起こる線量では、造血障害も起きている。D 誤：線質効果が認められ、高 LET 放射線ではより少ない吸収線量でも腸死が起こる。また、腸死においても線量率効果が存在する。

【解答】 1

問題 6 放射線による中枢神経死・分子死などに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 100 Gy 程度の被ばくでは、平均生存期間を決定する要因は肺および肝機能の障害である。
 B 中枢神経死は、分裂中の神経細胞の細胞死が原因である。
 C 中枢神経死は被ばく後数時間～数日で発生する。
 D 数百 Gy 以上の全身急性被ばくでタンパク分子などが変性し、照射中から数時間以内に死亡することを分子死と呼んでいる。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解説

A 誤：この線量では中枢神経系の障害が問題となる。B 誤：細胞非再生系である神経細胞は極めて放射線抵抗性で、中枢神経死の線量域でも細胞死が起こるわけではない。中枢神経死の原因は、脳の血管透過性上昇による脳浮腫と考えられている。C 正：線量が多いと被ばく後数時間でも認められる。D 正：分子死では酵素の不活性化やタンパク質の変性により死亡する。

【解答】 5

問題 7 放射線の被ばくによって起こる障害に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 白内障の重症度は線量に比例するが、潜伏期と被ばく線量との相関はない。
- 2 白内障の発生頻度は線量率とは関係しない。
- 3 速中性子線の白内障発生に関する RBE は 0.01 Gy 以下の低線量域では小さくなる。
- 4 晩発障害の発症は治療により容易に抑制できる。

解説と解答

1 ×：白内障は水晶体上皮細胞の障害により発生する。白内障では線量が多いほど障害の程度が強くなり、潜伏期も短くなる。2 ×：白内障では発生頻度・しきい線量で線量率効果が認められている。X線の場合のしきい線量は、分割照射では 8 Gy、慢性被ばくでは 0.15 Gy/年程度である。3 ×：速中性子線は白内障を起こしやすく、しきい値は 0.6 Gy 程度ともされている。0.01 Gy 以下の線量では白内障は発生しないため、RBE は求められない。4 ×：その発症を治療により防ぐことは難しい。

問題 8 放射線による発がんに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 身体的影響に分類され、発生率には線量率効果がある。
- 2 外部被ばくによってのみ引き起こされる。
- 3 放射線発がんは、被ばく時の年齢が若い方がリスクは高い。
- 4 ヒトでは、甲状腺がん・骨髄性白血病・肺がん・乳癌は放射線による発生が認められているが、前立腺がん・子宮がんは放射線による発生は認められていない。
- 5 悪性リンパ腫は悪性黒色腫より放射線感受性が高い。

解説

1 正：放射線により誘発されるがんには理論的にはあらゆるがんがありうる。潜伏期が長く、自然発生のがんとは区別がつかない、しきい線量がないなどの特徴がある。放射線誘発がんでは線量率は発生頻度に影響し、低線量率では高線量率の 1/2 の発生確率とされている。2 誤：内部被ばくでもヒトにがんが発生した。3 正：年齢が若いほど放射線誘発がんへの感受性が高い、年齢が若いほど被ばく後の余命が長い、の 2 つの理由が考えられる。4 正：ヒトの疫学調査では、前立腺がん・子宮がんが放射線被ばくによって有意に増加したとの報告はない。5 正：各種腫瘍細胞の間でも放射線感受性に差異がある。低分化型がんの方が高分化型がんよりも放射線感受性が高い。悪性黒色腫は亜致死損傷からの回復が大きく、放射線低感受性腫瘍である。

【解答】 2

問題 9 放射線被ばくによる白血病の発生に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 骨髄が被ばくすると、数年の潜伏期のあと白血病を発症する可能性がある。
 - B 慢性リンパ性白血病は、放射線被ばくにより増加するという明らかな証拠はない。
 - C 放射線誘発白血病の発生率は被ばく線量に依存して増加する。
 - D 放射線誘発白血病では、同じ被ばく線量では、小児より成人の方が発生しやすい。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説 A 正：白血病の主要な標的臓器は赤色骨髄である。放射線誘発白血病の潜伏期は被ばく線量が多い方が短い。B 正：白血病は、急性と慢性、リンパ性と骨髄性へと分類される。疫学調査では放射線による慢性リンパ性白血病の増加は報告されていない。C 正：実際のヒトの疫学調査では、200 mSv 以上の被ばく集団で有意に白血病が増加していることが報告されている。悪性度・症状は線量に依存しない。D 誤：放射線発がんは一般に、被ばく時の年齢が若い方がリスクは高い。 【解答】 1

問題 10 放射線による発がんに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 発がんの原因として自然放射線の寄与は、喫煙より小さい。
- 2 ICRP（1990 年）勧告での全集団に対する致死がんに関する組織・臓器別名目確率係数を比較すると、胃＞結腸＝肺＞骨髄＞膀胱＝食道＞乳房＞肝臓＞卵巣＞甲状腺＞骨表面＞皮膚の順となる。
- 3 広島・長崎の原爆被ばく生存者のデータでは、白血病発生の線量効果関係は LQ モデルに適合する。
- 4 リスク予測モデルは、発がんによる生涯リスクの推定に用いられる。
- 5 絶対リスク予測モデルでは、放射線による過剰リスクは年齢と共に増加する。

解説 1 正：発がん原因としての寄与は、紫外線を含めた電磁波で 3%，喫煙で 30% との報告もある。2 正：がんに関する名目確率係数は、単位線量当たりの致死がんの発生確率を臓器別に示したものである。確率係数の順番をたずねる出題がある。全身での致死がんに関わる名目確率係数は $5 \times 10^{-2} \text{Sv}$ ，すなわち 1Sv 当たり 0.05 とされている。3 正：白血病では LQ モデルがよくフィットし、乳がんのような固形がんの場合は L モデルが当てはまる。低い線量域（1Sv 以下）での発がん率を L モデルに従い推定した場合には、LQ モデルでの推定値よりも高くなり、安全側に評価することになる（図 3.3 参照）。確率係数の算定に当たっては、すべてのがんにしきい値のない直線モデルを採用している。4 正：放射線誘発白血病は被ばく 2～3 年後から被ばく 30 年後の間に発生する。一方、固形がんはいわゆるがん好発年齢になってから多発する。発がんのリスクは全生涯にわたって評価する必要がある。将来の発生数を予測するためのモデルが考えられている。5 誤：絶対リスク予測モデルでは、一定量の放射線に被ばくした後の過剰リスクは年齢にかかわらず一定であると仮定している。過剰リスクは線量により、年齢増加に伴う自然発生率（または死亡率）の増加とは関係がないとするモデルである。 【解答】 5

問題 11 原爆被爆者における、がんの発生と死亡に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 甲状腺がんのリスクは男性の方が高い。
 - B 胃がんの発生に関する過剰絶対リスクは、白血病と比較して高い。
 - C 胃がんの発生に関する過剰相対リスクは、白血病と比較して低い。
 - D 甲状腺がんによる死亡に関する過剰相対リスクは、白血病と比較して高い。
- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ
5 ABCDすべて

解説

A 誤：女性の方が男性より2～3倍高い。B 正：がんのリスクは発生率や死亡率を指標に表されるが、ここでは発生率を例に解説する。過剰絶対リスクは、被ばく集団の発生率から対照集団（非被ばく集団）の発生率を差し引いたもので、年・単位線量・単位集団当たりなどを基準に、通常％で表される。例えば、がんの名目確率係数がこれに相当する。胃での名目確率係数は骨髓よりも大きい。C 正：相対リスクは、被ばく集団と対照集団での発生率の比であり単位ではない。例えば単位線量当たりでの、被ばく集団での発生率が対照群の発生率の何倍になるかという比で表現される。この比より自然発生分である1を差し引いた値が過剰相対リスクとなる。白血病の自然発生数は胃がんに比べて極めて少なく、過剰相対リスクは白血病の方が高い。D 誤：固形がんの過剰相対リスクは、0.1～1.8程度で、白血病での過剰相対リスク（3.2～5.5）よりも小さい。

【解答】3

問題 12 胎内被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 受精後胚が子宮壁に着床するまでの期間に被ばくすると、出生前死亡の頻度が高まる。
 - B 着床前期に被ばくして死亡しなかった場合には、奇形が発生する。
 - C 着床前期には、障害が重篤となり、小頭症、発がん、遺伝的影響などの放射線障害が起こる。
 - D 着床前期での被ばくによる胚死亡は、被害としては実感されない。
- 1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

解説

A 正：着床前期は受精から8日目までの時期で、致死感受性が最も高く、しきい線量を超えると出生前死亡（胚死亡）する場合がある。B 誤：着床前期での障害は胚死亡である。生き延びた胎児は正常に発育し、この時期の被ばくで奇形が発生することはないとされている。C 誤：着床前期の被ばくでは小頭症などの奇形は起こらない。D 正：この時期は本人も妊娠に気がついてはいない。仮に胚死亡が発生したとしても、それを認識することはない。

【解答】3

問題 13 胎内被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ヒトの胎内被ばくで奇形が最も生じやすい時期は、受胎後 3 週間から 3 カ月である。
 - B 器官形成期に被ばくした場合に奇形が生じるしきい線量は 10 mGy 程度である。
 - C 受精して 40 日後に腹部に 0.5 Gy の被ばくをすると奇形発生の可能性がある。
 - D 小頭症は、胎児期（受精後 8 週以降）の被ばくに特徴的な障害である。
 - E 器官形成期の被ばくでは、遺伝的影響を考慮する必要がある。
- 1 ABC のみ 2 ABE のみ 3 ACE のみ 4 BCD のみ
5 CDE のみ

解説 A 正：器官形成期は受精後 9 日～8 週の時期で、この時期に各臓器の原基が形成される。この時期の被ばくでは種々の奇形が生じる可能性がある。しかし、この時期より後の被ばくでは奇形は生じない。B 誤：奇形発生のしきい線量は 150 mGy である。C 正：この時期は器官形成期であり、被ばく線量も奇形発生のしきい線量を超えている。また、受精 15 日後から内部被ばくがあり、妊娠期間中の胎児への集積線量が 0.5 Gy の場合にも奇形発生の危険性はある。一方、月経開始後 5 日目での 1 Gy の全身被ばくは、妊娠していない時期での被ばくであり奇形は発生しえない。受精して 90 日後に腹部に 1 Gy の被ばくをした場合には胎児期に入ってから被ばくで、奇形が発生する危険性は少ない。D 誤：小頭症は奇形の 1 種で、器官形成期の被ばくで発生する。E 正：原始生殖細胞の形成は器官形成期に始まる。しかし理論的には、胎生期のどの時期に被ばくしても、確率的影響（遺伝的影響とがん）発生の可能性は存在する。

【解答】 3

問題 14 胎内被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 胎児期は受精後 8 週から出生までの時期で、この時期の被ばくでは、发育遅延の恐れが高い。
 - B 胎児期の被ばくによる発がんのリスクは、新生児期と同程度と推定されている。
 - C 分化した神経細胞の死が精神遅滞の原因となる場合がある。
 - D 精神発達遅滞の発生は、受精後 25 週を過ぎると少なくなる。
 - E 精神発達遅滞のしきい線量は 20 mGy 程度と推定されている。
- 1 ABD のみ 2 ABE のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ
5 CDE のみ

解説 A 正：胎児期の被ばくでは、发育遅延・精神発達遅滞などが生じる危険性がある。確率的影響の危険性もある。B 正：また、胎児での致死がんに関する名目確率係数は成人の値に比べて 2～3 倍大きい。C 誤：精神遅滞は胎児期に被ばくした場合に発生する。神経細胞の増殖・分化・組織構築が妨げられ、精神遅滞となる。D 正：精神発達遅滞（知能の発達遅滞）は胎児期の被ばくで発生しうる。妊娠 8～25 週の被ばくで発生し、特に 8～15 週では感受性が高い。E 誤：精神発達遅滞のしきい線量は 200～400 mGy 程度である。

【解答】 1

問題 1 自然放射線による被ばくに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 日本平均では年間 1.5 mSv 程度である。
- 2 自然放射線からの被ばくには、外部被ばくと内部被ばくがある。
- 3 外部被ばくについては大地放射線と宇宙線の寄与が大部分である。
- 4 大地からの自然放射線量には、地域差がない。

解説

1 正：自然放射線からの被ばく線量は、世界平均では年間 2.42 mSv 程度、日本平均では年間 1.48 mSv 程度である。ちなみに日本での医療被ばくは一人当たり平均すると年間 2.25 mSv 程度である。2 正：世界平均の 2.42 mSv/年の内訳は、内部被ばくで 1.55 mSv、外部被ばくで 0.86 mSv となっている。宇宙線で 2 次的に生成される ^3H 、 ^{14}C および ^{22}Na などによるわずかな寄与 (0.01 mSv) もある。3 正：外部被ばくの世界平均では、宇宙線と大地からの放射線はほぼ同程度で、大地からは 0.48 mSv、宇宙線からは 0.38 mSv 程度の被ばくが年間にある。宇宙線は中性子成分より電離性成分による線量の方が多い。4 誤：ウラン系列核種 (^{222}Rn ：ラドンなど)、トリウム系列核種 (^{220}Rn ：トロンなど) と ^{40}K からの放射線が主な大地放射線として、内部被ばくと外部被ばくをもたらす。これらには大地に含まれている放射性核種の関係で地域差がある。

【解答】 4

問題 2 自然放射線による被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部被ばくについては ^{40}K の寄与が大部分である。
 - B ^{222}Rn は肺に吸入されるが、そのまま排泄されて内部被ばくにはほとんど影響しない。
 - C ^{238}U 系列による被ばくの場合、外部被ばくより内部被ばくの線量が大さい。
 - D ラドンによるものを除くと、内部被ばくより外部被ばくの方が大さい。
- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

解説

A 誤：内部被ばくとしてはラドン・トロンおよびその娘核種から 1.38 mSv/年、 ^{40}K から 0.17 mSv/年が主である。B 誤：ラドン (^{222}Rn) はウラン系列に属し、親核種である ^{226}Ra の崩壊により生成される。 α 線を出す希ガスである。 ^{222}Rn の娘核種も α 線や β^- 線を放出する。ラドンの大部分は空気中では塵に沈着し放射性浮遊塵となる。これを吸入すると気管支や肺胞に集積して、肺での線量は 1.15 mSv/年程度となる。ラドンは大地と建材から希ガスとして出てくるので、気密性のよいコンクリートの建物ではラドンによる内部被ばくが問題視されている。C 正： ^{238}U 系列 (ウラン系列) には ^{222}Rn とその娘核種が存在し、内部被ばくの最大の原因となっている。D 正：ラドンとその娘核種による内部被ばくを除くと、自然放射線は外部被ばくが 0.86 mSv/年、内部被ばくが 0.27 mSv/年程度である。

【解答】 5

問題 3 内部被ばくの特徴などに関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 内部被ばくの経路としては、経口、吸入、経皮の3経路がある。
- 2 胎児への放射性物質の主な侵入路は、母体から羊水を経て入る経路である。
- 3 飛程の短い α 線や β 線よりも、エネルギーの高い γ 線による影響が大きい。
- 4 臓器親和性は、核種によって決まり、その化学形によらない。

解説

1 正：管理区域での飲食・化粧・喫煙は経口・経皮・吸入摂取の可能性を高めるので禁止されている。非密封の放射性物質を取り扱う際にはゴム手袋を着用する。吸入の可能性は揮発性の標識化合物のほかに、放射性粉塵による摂取もある。経皮吸収では皮膚に傷がある場合には侵入の可能性が高くなる。2 誤：母体から胎児への物質の移行経路は胎盤、臍帯である。3 誤：内部被ばくの場合には、 α 線や飛程の短い β 線ではエネルギーのすべてを体内に付与するので、影響は大きい。一方、 γ 線は透過力が強く、 γ 線放出核種が体内に沈着してもすべてのエネルギーを体内に付与するわけではなく、透過してしまうエネルギーもある。4 誤：体内に取り込まれた放射性核種は、その化学的性状・物理的性状・進入経路によって集積する臓器が異なる。核種の臓器への集積のされやすさを臓器親和性と呼んでいる。放射性核種が特定の臓器に集積し、その臓器での障害が人体に重大な影響を与える場合、その臓器を決定臓器と呼ぶ場合がある。主な放射性核種の性質（放射線の種類・半減期・体内への進入経路・集積臓器・起こりうる障害など）について勉強しておく必要がある。

【解答】1

問題 4 放射性核種の集積部位などに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 ^3H (HTO), ^{24}Na , ^{40}K , ^{137}Cs は全身に分布する。
- 2 ^{32}P , ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{239}Pu , ^{241}Am などは骨に沈着し向骨性核種 (bone seeker) と呼ばれている。
- 3 ^{60}Co , ^{65}Zn は肝臓に集積する。
- 4 ^{85}Kr と ^{133}Xe では外部被ばくが、 ^{90}Sr ・ ^{137}Cs ・ ^{131}I では内部被ばくが問題となる。
- 5 $^{137}\text{CsCl}$ を経口摂取すると ^{137}Cs は骨に集積する。

解説

1 正：HTO は全身に分布する。2 正：向骨性核種は骨親和性核種とも呼ばれ、核種によっては造血障害（白血病を含む）や骨障害（骨壊死・骨肉腫など）を引き起こす可能性がある。3 正：いずれもコロイド（粒子）をつくり、粒子を処理する臓器である肝臓・脾臓・骨髄などに沈着する。4 正：核分裂に伴い原子力発電所で生成される核種である。 ^{85}Kr と ^{133}Xe は希ガスで外部被ばくが主な問題となる。5 誤： ^{137}Cs は全身の筋肉に分布する。 γ 線を放出し、全身が被ばくするので、放射線高感受性の造血臓器・生殖腺などでの障害が問題になりうる。

【解答】5

問題 5 生物学的半減期・有効半減期に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 生物学的半減期は物理学的半減期とは無関係である。
 - B 有効半減期は生物学的半減期と物理学的半減期の短い方と一致する。
 - C 摂取された標識化合物による被ばく線量は、その物理学的半減期で決まる。
 - D ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{226}Ra のうち、有効半減期が生物学的半減期にほぼ等しいものは、 ^3H , ^{14}C , ^{137}Cs , ^{226}Ra である。
 - E ^{90}Sr は骨に親和性の高い放射性核種で、物理学的半減期は 28.8 年であるが、生物学的半減期は約 1 週間なので放射線影響はほとんど問題にならない。
- 1 AB のみ 2 AD のみ 3 BC のみ 4 CD のみ 5 DE のみ

解説

A 正：両者の間に一定の傾向があるわけではない。生物学的半減期は核種によって一義的に決まるものではなく、核種が同じでも化学的性状・物理学的性状や進入経路によっても違ってくる。B 誤：有効半減期 (T_e) と物理学的半減期 (T_p) および生物学的半減期 (T_b) の関係は、 $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b = (T_p + T_b)/(T_p T_b)$ である。有効半減期は、物理学的半減期および生物学的半減期のいずれよりも短いものとなる。C 誤：体内に摂取された放射性物質による被ばく線量は、それらの物質が有効半減期に従って減衰するとして算定される。D 正： ^3H ・ ^{14}C ・ ^{137}Cs ・ ^{226}Ra の物理学的半減期は長く、最短の ^3H でも 12.3 年である。そこで $1/T_p$ は 0 に近くなり、有効半減期は生物学的半減期にほぼ等しくなる。同じ原理で、生物学的半減期が非常に長い核種では $1/T_b$ は 0 に近くなり、有効半減期は物理学的半減期とほぼ等しくなる。E 誤：骨に沈着した ^{90}Sr の生物学的半減期は極めて長く、線量推定上は無限大とされており、なかなか排泄されにくい。物理学的半減期も 28.8 年と長い。白血病を含む造血機能障害や骨肉腫の危険性がある。

【解答】 2

問題 6 内部被ばくでの影響に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい

- 1 哺乳動物培養細胞へ [^3H] チミジンを取り込ませた場合には、突然変異や致死を引き起こす可能性がある。
- 2 ^{59}Fe の内部被ばくでは再生不良性貧血、 ^{90}Sr の内部被ばくでは白血病、 ^{131}I の内部被ばくでは甲状腺機能低下症、 ^{137}Cs の内部被ばくでは不妊、 ^{222}Rn の内部被ばくでは肺がんの可能性が増す。
- 3 トロトラスト (二酸化トリウム) を血管造影剤として注入された患者に 20 ~ 30 年後に現れる可能性のある障害は白血病と肝臓がんである。
- 4 夜光塗料として使われていたラジウムの内部被ばくにより、時計文字盤塗装工に白血球減少・貧血・骨折・骨肉腫が発生した。
- 5 ウラン鉱山の鉱夫に発生した肺がんはラドンとその娘核種による内部被ばくが原因と考えられている。

解説と解答

1 ○：生殖細胞に [^3H] チミジンが取り込まれると、突然変異が引き起こされて遺伝的影響の発生する恐れもある。2 ○： ^{131}I は経口・吸入により摂取され甲状腺に沈着する。バセドウ病 (甲状腺機能亢進症) 治療のために ^{131}I を投与された患者では、甲状腺機能の低下が報告されている。また、チェルノブイリ原発事故で多発した小児甲状腺がんは、 ^{131}I の内部被ばくによるものであると考えられている。3 ○：トロトラスト ($^{232}\text{ThO}_2$) による障害は我が国でも発生している。4 ○： α 線放出核種である ^{226}Ra の経口摂取による内部被ばくである。5 ○： ^{226}Ra の娘核種である ^{222}Rn (気体) とその壊変生成物による内部被ばくである。

問題 1 放射線による遺伝的影響とそのリスクに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 遺伝的障害の発現は次代・次次代に限定できる。
- B 生殖年齢以前の被ばくも、考慮しなければならない。
- C 放射線により生殖細胞に生じた DNA 損傷のすべてが遺伝的影響として現れる。
- D 遺伝病を持つ子供がいた場合、それが放射線によって起こったのか自然に起こったのかの区別ができる。
- E 線量率が低くなるにつれ、その発生頻度も低くなる。

1 AB のみ 2 AE のみ 3 BE のみ 4 CD のみ 5 DE のみ

解説

A 誤：次次代以降でも遺伝的影響のリスクは存在する。B 正：被ばくによる遺伝的影響のリスクは胎児の全時期から子供をつくる時期まで存在する。C 誤：生殖細胞に生じた DNA 損傷のすべてが遺伝的影響として現れるわけではない。DNA 損傷は修復される場合がある。また、DNA 損傷を持った生殖細胞が受精をしないと遺伝的影響は伝わらない。さらに、仮に受精したとしても発生の途中で淘汰されることもありうる。D 誤：放射線に限った遺伝的影響があるわけではないので、区別はつかない。E 正：遺伝的影響にも線量率効果は存在する。

【解答】 3

問題 2 放射線によるヒトでの遺伝的影響とそのリスクに関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 20 歳の女性が妊娠中に腹部に被ばくした場合や、5 歳の男の子が下腹部に被ばくした場合には、遺伝的影響を考慮する必要がある。
- 2 高齢になるほど、遺伝的影響のリスクは低下する。
- 3 原爆被ばく者の疫学調査では、多くの継世代的遺伝疾患が明らかとなった。

解説と解答

1 ○：遺伝的影響は、子供を産む可能性のあるヒトの生殖腺が被ばくした場合に考慮する必要がある。2 ○：年齢が増加すると子供期待数が減少するので、リスクは減少する。さらに女性では閉経後は子供が生まれないので、リスクはゼロとなる。3 ×：原爆被ばく者などの人類集団での疫学調査では、遺伝的影響の有意な増加は認められていない。

問題 3 放射線の遺伝的リスクの推定に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 高線量率・高線量を使ったマウス実験から得られた生殖細胞の突然変異誘発率を、そのまま低線量率・低線量域へ当てはめて推定する。
- B ヒトでの倍加線量は 4Gy 程度と推定されている。
- C 遺伝的影響の発生確率は、1Sv の被ばく当たり 0.01 程度と推定されている。
- D 多因子（性）疾患のリスク評価には、遺伝的要因に加えて環境要因を考慮する必要がある。

1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 C と D

解説

A 誤：ICRP では線量・線量率効果係数として 2 を採用している。B 誤：低線量率でのヒトの倍加線量は、マウスの実験結果と線量・線量率効果を考慮して、1Gy 程度と推定されている。C 正：遺伝的影響のリスクは単位線量当たりでの発生確率で示される。ICRP1990 年勧告では名目確率係数を、全集団に対して $1 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ 、すなわち 1Sv 当たり 0.01 としている。D 正：多因子性疾患で環境要因がどの程度のウェイトを占めるかを評価することは容易ではない。

【解答】 5

問題 4 遺伝有意線量に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 遺伝有意線量は、放射線被ばくを伴うある行為が、その集団から将来生まれてくるであろう子供 1 人あたりに、平均してどの程度の遺伝的負荷をもたらすかを示す指標（線量）である。
 B 女性の被ばくのみを考慮すればよい。
 C 16 歳以上の集団の被ばくのみを考慮すればよい。
 D 線量としては、生殖腺線量のみを考慮すればよい。
 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

解 説

A 正：集団での遺伝的影響を考える上では、生殖腺が被ばくした線量以外に、被ばくした集団から何人の子供が生まれてくるのか（子供期待数）が問題となる。B 誤：男性の被ばくも対象としなければいけない。C 誤：子供をもうける可能性のある集団の被ばくのみを考慮すればよい。ヒトは平均して 30 歳までに子供を持つので、30 歳以下の集団での被ばくが対象となる。D 正：線量としては、生殖腺以外の部位の被ばく線量を合算する必要はない。

【解答】3

問題 1 放射線の LET などに関連する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A LET は、放射線の飛跡に沿った単位長さ当たりでのエネルギー損失と定義される。
 B 低 LET 放射線はすべて電磁波である。
 C LET の違いが、放射線の生物学的作用に大きな影響を与える。
 D 1 MeV の γ 線の生物作用は、表面よりやや深い位置で最大となる。
 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
 5 ABCD

解 説

A 正：線質の違いを表す LET は、本来は荷電粒子に対して使用される。単位は $\text{eV}/\mu\text{m}$ で示され、放射線の電離密度を表している。B 誤：LET による生物効果の違いなどから放射線を便宜的に低 LET 放射線と高 LET 放射線とに区別している。X 線・ γ 線・ β 線は低 LET 放射線であり、中性子線・ α 線・陽子線・重粒子線は高 LET 放射線である。低 LET 放射線には粒子線の β 線が含まれている。C 正：同じエネルギーが吸収されても、電離分布の相違により、生物効果が異なってくる。D 正：電磁波である γ 線は間接電離放射線であり、生成された 2 次電子が生体高分子や水分子にエネルギーを付与する。表面で生成された 2 次電子はさらに進んで電離や励起を起こすため、その生物作用は表面よりやや深い位置で最大となる。

【解答】3

問題 2 放射線の線質効果などに関連する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 同じ線量・線量率で X 線を照射した場合、500 keV の X 線では 10 keV の X 線に比べ、骨髓障害の程度が大きい。
 - B 100 keV の X 線は ^{60}Co - γ 線に比較し、骨組織に吸収されやすい。
 - C α 線は深部に到達しにくい。
 - D 同じ線量 (Gy) が吸収されても、放射線の種類によって生物学的効果は異なる。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解 説

A 正：X 線のエネルギーによっても放射線影響は異なる。皮膚障害は透過力の小さい 10 keV の X 線のほうが大きく、骨髓障害は透過力の大きい 500 keV の X 線のほうが大きい。B 正： ^{60}Co - γ 線の平均エネルギーは 1.25 MeV で、骨でのエネルギー吸収は 100 keV の X 線のほうが多い。C 正： α 線は外部被ばくでは問題にならない。D 正：例えば X 線の 1 Gy と中性子線の 1 Gy では、同じ吸収線量でも生物効果は異なる。細胞内での電離の分布が異なるためである。

【解答】 5

問題 3 RBE に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 線質の異なる放射線の生物効果の違いを表す指標である。
 - B 比較する生物学的効果によって異なる。
 - C LET が大きくなればなるほど、RBE は大きくなる。
 - D 線量率が変化してもその値は変わらない。
 - E 照射時の酸素濃度が変化してもその値は変わらない。
- 1 AB のみ 2 AE のみ 3 BC のみ 4 CD のみ 5 DE のみ

解 説

A 正：RBE は次の式で表せる。

$$\text{RBE} = \frac{\text{ある効果を得るのに必要な基準放射線の吸収線量 [Gy]}}{\text{同じ効果を得るのに必要な試験放射線の吸収線量 [Gy]}}$$

基準放射線には X 線や γ 線が用いられるので、X 線や γ 線の RBE は 1 となり、電子線の RBE も 1 である。B 正：細胞致死、遺伝子突然変異誘発、染色体異常誘発、発がんなど指標によってその値が異なる。C 誤：LET の値が 10 keV/ μm 程度から 100 keV/ μm 程度までは、LET の増加に伴って RBE も増加する。しかし、LET が 100 keV/ μm 程度以上になると逆に RBE の値は減少する (図 3.4 参照)。これは、電離密度が大きくなりすぎると、細胞を殺すのに必要以上のエネルギーが与えられて、無駄なエネルギー付与が多くなるためであり、これを over kill と呼んでいる。D 誤：線量率が変化すると RBE は異なる値を示す。E 誤：酸素効果は低 LET 放射線では大きく、高 LET 放射線では小さく、線質によって異なっている。そこで照射時の酸素濃度によって RBE は異なる値を示す。さらには、防護剤や増感剤が存在すると RBE 値は変わる。

【解答】 1

問題 4 線量率効果に関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 一般に総線量が同じであれば、低線量率被ばくに比べて高線量率被ばくでは影響の程度が強く現れる。
- 2 線量率効果は、細胞死に関してのみ見られる現象である。
- 3 培養細胞を 4℃で照射すると、37℃の場合に比べて生存率の線量率効果が低下する。
- 4 高線量・高線量率被ばくの影響から低線量・低線量率被ばくの影響を推定するときに線量・線量率効果係数が用いられる。

解説

1 正：低 LET 放射線では線量率効果が認められる。例えば、低 LET 放射線照射における培養細胞生存率では、線量率を下げる了一般に D_0 が大きくなる。2 誤：線量率効果は、例えば、がんや遺伝的影響についても認められている。3 正：温度効果のため、4℃で照射した場合には線量率効果は低下する。4 正：線量・線量率効果係数として、ICRP1990 年勧告では、線量が 0.2 Gy 以下で、線量率が 0.1 Gy/h 以下の時、2 という値を採用している。そこで、急性大線量被ばくから得られた名目確率係数を 2 で割った値が、低線量・低線量率被ばくでの名目確率係数として採用されている。【解答】2

問題 5 放射線の酸素効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 照射中の系内での酸素分圧が、放射線の生物作用に影響を与える場合、酸素効果が働いているという。
 - B OER とは同一線量において酸素存在下および非存在下での生物効果の比をいう。
 - C 照射前に培養液の酸素分圧を、100 mHg から 300 mHg に上昇させて照射すると酸素効果が認められる。
 - D 正常組織中にも放射線生物学的低酸素細胞が存在する。
- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

解説

A 正：酸素効果は、間接作用の発現に際して、酸素が存在することにより、スーパーオキシドなどのより反応性に富んだラジカルが生成されたり、DNA の過酸化ラジカルや過酸化物などが生成されるために生じる事象であると考えられている。B 誤：OER（酸素増感比）は酸素存在下および非存在下での同じ生物効果を引き起こす吸収線量 [Gy] の比である。各細胞周期で酸素効果比（酸素増感比）に大きな変化はない。C 誤：酸素効果は照射時点で酸素が存在していることが必要である。また、培養液の酸素分圧が 40 mHg 程度以上では酸素効果は既に飽和に達しており、酸素分圧を 100 mHg から 300 mHg に上昇させても酸素効果は期待できない。照射前に培養液の酸素分圧を 5 mHg から 50 mHg に上昇させて照射した場合には酸素効果が期待できる。放射線感受性は酸素濃度が 0 の時を 1 とすると大気中の酸素濃度においては約 3 倍になる。酸素濃度の変化に伴う放射線感受性の大きな変化は、酸素濃度が空気中の濃度に比べて非常に低い領域で現れる。D

正：全身の各組織・臓器における酸素濃度は一定ではない。酸素濃度が低い正常組織では、酸素効果により低 LET 放射線に対する放射線感受性は低下する。さらにはがん組織の中心部は低酸素性で、低 LET 放射線に対して抵抗性である。腫瘍の放射線治療では分割照射を行うことにより外側のがん細胞を殺し、中心部の細胞が再酸素化されるのを待って、分割照射を実施している。

【解答】3

問題 6 放射線感受性を修飾する放射線防護剤・放射線増感剤などに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 還元型グルタチオンによる防護効果は酸素の存在下で低下する。
- 2 放射線の細胞致死作用に関する現象のうち、OH ラジカルスカベンジャーによる防護作用の影響を強く受けるものは酸素効果である。
- 3 線量低減係数 (DRF) とは、放射線防護剤を投与した条件下である一定の放射線生物効果を得るのに必要な線量を、放射線防護剤を投与しない条件下で、同一の効果を得るために必要な線量で割った値である。
- 4 放射線防護剤の副作用は、ほとんど無視できる。
- 5 酸素、プロモデオキシウリジン (BUdR)、ミソニダゾールはいずれも放射線増感剤である。
- 6 低酸素細胞増感剤は、電子親和性を有する。

解説

1 正：グルタチオンはグルタミン酸・システイン・グリシン（いずれもアミノ酸）から成るトリペプチドで、システインに SH 基を持つ。細胞内の酸化還元状態を調節しており、還元型と酸化型に分けられる。還元型グルタチオンの還元反応により、標的分子ラジカルの一部は化学的修復される。しかし酸素の存在下では、酸素と還元型グルタチオンが競合的に働いて、酸素の方が標的分子ラジカルと反応し、標的分子の損傷を固定してしまうため、還元型グルタチオンによる防護効果は低下する。2 正：酸素はより有害なラジカルを生成し、間接作用を増大する。ラジカルスカベンジャーはラジカルを除去することにより、酸素効果に影響を与える。3 正：DRF は放射線防護剤の効果を表す指標である。4 誤：ラジカルスカベンジャーを主とする放射線防護剤は培養細胞に対して有効である。生体に投与した場合には毒性が強く実用的な放射線防護剤（ラジカルスカベンジャー）は見つかっていない。5 正：プロモデオキシウリジン (BUdR) やヨードデオキシウリジン (IUdR) はチミジン類似物質で、細胞内の DNA に取り込まれる。これらを取り込んだ DNA 鎖は放射線に対して感受性が高まり、切れやすくなる。2-ニトロイミダゾール誘導体のミソニダゾールは放射線抵抗性の低酸素細胞を特異的に増感させる低酸素細胞増感剤である。また、抗がん剤である 5-フルオロウラシル (5-FU) にも放射線増感効果がある。6 正：低酸素細胞増感剤であるメトロニダゾールやミソニダゾールは高電子親和性物質で、ラジカルによって生じた損傷を固定することにより増感するが、照射後に与えても有効ではない。増感効果はその電子親和性に比例する。

【解答】 4

問題 7 放射線・紫外線などに対する感受性を修飾する生物学的な要因に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 遺伝的背景により感受性が異なる。
 - B 毛細血管拡張性運動失調症は X 線に対して高感受性を示す遺伝性疾患である。
 - C 色素性乾皮症とブルーム症候群は紫外線に対して高感受性を示す疾患である。
 - D 年齢が高くなるほど感受性が高くなる。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説 A 正：ヒトには、DNA に生じた損傷を修復できないため、発がん率が極めて高くなる遺伝病がある。修復欠損遺伝症候群と呼ばれ、例えば、色素性乾皮症、毛細血管拡張性失調症、ブルーム症候群などがある。B 正：この疾患の細胞では、放射線照射後に細胞分裂遅延が認められずに死んでしまう。細胞周期チェックポイントを調節し細胞の増殖をコントロールしている ATM という遺伝子に異常があるためで、放射線に対して高い致死感受性の遺伝病である。幼少期の小脳性失調症・白血病・悪性リンパ腫・乳がんなどの発生率が増加する。皮膚がんは多発しない。C 正：色素性乾皮症という遺伝病では、紫外線によって DNA に生じたピリミジン 2 量体に対する除去修復酵素が欠損するため、紫外線に高感受性で日光過敏症となり、皮膚がんの増加や早期老化をもたらす。ブルーム症候群は染色体不安定性を示す遺伝性疾患で、紫外線に対して高感受性を示し、発育不全・免疫不全・日光過敏症・がんなどが発生しやすくなる。D 誤：一般には高齢になると放射線感受性は低くなる。ただし女性での急性被ばくによる永久不妊では、閉経期に近いほうが感受性が高い。

【解答】 1

問題 8 速中性子線・高 LET 放射線などに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 速中性子線の生物効果が大きいのは、反跳陽子が生成されるためである。
 - B 速中性子線は電荷をもたないため、体内での透過力が小さい。
 - C 高 LET 放射線の生物作用は主に放射線により生じる H_2O_2 が原因である。
 - D 直接作用の寄与が大きい。
- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

解説 A 正：速中性子線が生体に照射されると、水素原子核（陽子）に衝突し、そのエネルギーの多くを陽子に与え反跳陽子が生成される。中性子線の生物作用はこの反跳陽子と核反応によっている。B 誤：速中性子線は電荷がなく、主に原子核との衝突によりエネルギーを失う。原子核の大きさは非常に小さいので衝突する確率が小さく、荷電粒子よりも透過力は大きい。C 誤：高 LET 放射線の場合、水の電離と励起により生成されるラジカルは密に分布する。そこで生じたラジカルの一部同士が結合し、 $H_2 \cdot H_2O \cdot H_2O_2$ が生成される。このうち活性酸素である H_2O_2 は生体にとって有害であるが、 H_2O_2 の細胞傷害性は OH ラジカルよりも弱い。高 LET 放射線では電離密度が高く、直接作用が主となる。D 正：しかし、間接作用を無視することはできない。

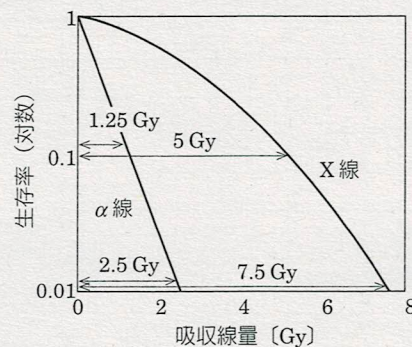
【解答】 3

問題 9 低 LET 放射線と比較した高 LET 放射線の放射線生物作用に関する次の記述のうち、誤っているものどれか。

- 1 γ 線に比べて修復されにくい DNA 損傷を引き起す。
- 2 同じ線量で比較すると γ 線に比べて生物作用が大きく、RBE が大きい。
- 3 高 LET 放射線の作用は、X 線に比べて回復が小さい。
- 4 線量率効果は、高 LET 放射線と低 LET 放射線で同程度である。
- 5 高 LET 放射線の RBE は大きい。分割照射をしたり、線量率を下げて照射した場合、高 LET 放射線の RBE はさらに大きくなる。

解説

1 正：低 LET 放射線よりも電離密度が高く、2 本鎖切断が多発し致死作用が大きい。高 LET 放射線照射による細胞の線量-生存率曲線は、低 LET 放射線に比べて D_0 、 D_q ともに小さく直線に近い。2 正：一般に高 LET 放射線は低 LET 放射線に比べて生物作用が強く RBE が大きい。例えば、中性子線では白内障発生のしきい線量は γ 線よりも小さい。高 LET 放射線は、細胞致死効果だけでなく突然変異誘発効果について比較しても、低 LET 放射線よりも効果大きい。同じ線量 [Gy] での外部被ばくの場合、低 LET 放射線よりも高 LET 放射線のほうが発がん率が高い。3 正：高 LET 放射線では DNA の 2 本鎖切断の割合が高く、修復不可能な細胞損傷が多い。そこで高 LET 放射線では、低 LET 放射線に比べて、重致死損傷からの回復も潜在的致死損傷からの回復も小さい。4 誤：低 LET 放射線では重致死損傷からの回復が認められ、線量率効果が存在する。一方高 LET 放射線では致死効果が強いので重致死損傷からの回復は少なくなり、線量率効果は小さくなるが、全くなくなるわけではない。5 正：ポイントは、低 LET 放射線では高 LET 放射線に比べて回復が大きいことである。同様に、生存率のより高いレベルでの照射や（図 3.5）、低酸素状態で照射した場合など、放射線の効果があまり大きくはない場合の方が、回復の関係から、RBE は大きくなる。例えば、図 3.5 では、生存率 0.01 %での RBE は 7.5Gy/2.5Gy で 3、一方、生存率 0.1 %での RBE は 5Gy/1.25Gy で 4 となっている。



▶ 図 3.5 生存率の異なる場合での RBE

出典：日本放射線技術学会 監修、江島洋介・木村 博 共著「放射線技術学シリーズ 放射線生物学」、オーム社、2002 年

【解答】 4

問題 10 低 LET 放射線と比較した高 LET 放射線の放射線生物作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A X 線と α 線による放射線効果の差は照射の分割回数が増えるに従い大きくなり、したがって RBE は大きくなる。
 - B γ 線に比べて、中性子線は酸素濃度の影響を受けやすい。
 - C 高 LET 放射線では、SH 化合物などのラジカルスカベンジャーによる防護作用は小さい。
 - D 高 LET 放射線では、X 線に比べて放射線感受性の細胞周期依存性が小さい。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ
5 ABCD すべて

解説

A 正：分割照射による回復は、X 線では起こりやすく α 線では起こりにくい。そこで X 線では分割回数が増えるほど回復が大きく、生物効果は小さくなり、ある効果を引き起こす線量は大きくなる。一方、 α 線の場合には、分割回数が増えても回復が少なく、それほど違いのない線量で同じ効果をもたらすことになる。その結果として分割回数が増えると RBE が大きくなる。
B 誤：低 LET 放射線である γ 線では間接作用の寄与が大きく、酸素の有無が生物作用に大きく影響を与え、酸素効果が大きい。一方、高 LET 放射線である中性子線では直接作用の寄与が大きく、酸素の有無は低 LET 放射線ほどは生物効果に影響を与えず、酸素効果が小さい。OER は LET の増加に伴い減少し、低 LET 放射線よりも高 LET 放射線の方が小さい値となる。LET が $100\text{keV}/\mu\text{m}$ 程度以上では OER は 1 に近づく (図 3.4 参照)。酸素効果がない場合には、OER の値は最小値の 1 となる。高 LET 放射線では低酸素細胞増感剤の効果は小さくなる。
C 正：ラジカルスカベンジャーは間接作用で発生したラジカルを除去するので、低 LET 放射線に対してより大きな効果を持つ。高 LET 放射線は直接作用の寄与が大きく、防護剤の影響を受けにくい。また、直接作用の寄与が高くラジカル生成の寄与が小さい高 LET 放射線の場合には、温度効果は顕著には見られない。
D 正：高 LET 放射線では修復しにくい損傷が多く、修飾要因による影響を受けにくく、細胞周期依存性は小さい。

【解答】 3

問題 1 生物学的線量推定に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 被ばく直後の末梢血中のリンパ球数の測定は線量推定に有用である。
 - B 放射線宿酔などの前駆症状は、外部全身被ばくでの線量推定に役立つ。
 - C 皮膚の変化は局所被ばく線量推定に有用である。
 - D 染色体の不安定型異常を分析する方法は線量推定には適当ではない。
 - E 末梢リンパ球染色体の安定型異常では被ばく線量の推定は困難である。
- 1 ABC のみ 2 ABE のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ
5 CDE のみ

解説

A 正：被ばく当日から 6 日後までのリンパ球数の算定は、外部全身被ばくでの線量推定に役立つ。B 正：発現時期・頻度・重篤度は線量評価に有用である。また、放射線宿酔では、症状の種類は被ばく線量によって変わり、例えば、より高線量では消化管症状が現れ、さらに非常に高線量では神経学的症状が発現する。C 正：症状の発現時期や症状の重篤度・変化は、皮膚の局所被ばく線量推定に有用である。D 誤：全身被ばく線量はリンパ球染色体異常の発現頻度から推定できる。二動原体染色体や環状染色体などの不安定型染色体異常のある細胞は観察が容易ではあるが、分裂できないので被ばく後比較的早期に消滅する。全身急性被ばくの初期には、これらの出現頻度は被ばく線量を反映し、線量推定に有用となる。E 誤：被ばく後時間が経過した場合には、細胞分裂によって引き継がれる安定型異常の頻度を分析することにより、被ばく線量を推定することも可能である。

【解答】 1

問題 2 放射線荷重係数・等価線量に関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 放射線荷重係数は、等価線量を求める際に用いられる係数である。
- 2 放射線荷重係数は、 β 線、X線、 γ 線については同一の値が与えられている。
- 3 放射線荷重係数は、中性子線の場合、そのエネルギーにより 5、10 または 20 である。
- 4 放射線荷重係数は、陽子線の場合、X線の2倍である。
- 5 等価線量は異なる放射線の影響を比較するのに有用である。

解 説

1 正：放射線荷重係数は放射線防護の目的で導入された係数である。放射線の種類やエネルギーにより生物効果が異なることを表した係数で、低線量・低線量率における確率的影響の誘発に関する RBE を代表するように決められている。放射線荷重係数は、確率的影響評価に際して等価線量を求める時に使用する係数である。放射線荷重係数は、放射線の線質に関わる係数で、被ばくする組織や線量率に関わらず値が定められている。2 正：エネルギーに関わらず、どれも 1 である。電子線の場合もエネルギーに関わらずに 1 である。3 正：中性子線の放射線荷重係数は、X線より大きい。100 keV ~ 2 MeV のエネルギー域では最大値の 20 であり、その外側のエネルギー域では小さくなり 10 ~ 5 の値をとる。新 ICRP 勧告（2008 年）での中性子線の放射線荷重係数は、エネルギーに応じて連続的に変化する値が与えられている。4 誤：反跳陽子以外の陽子、エネルギーが 2 MeV を越える陽子の場合には、放射線荷重係数は 5 である。一方、重粒子線の放射線荷重係数は、その質量に関係なく、20 である。5 正：等価線量 [Sv] は吸収線量 [Gy] に放射線荷重係数を掛けて求められ、基本的には、低線量被ばくによる確率的影響の評価に用いる概念である。異なる種類の放射線影響を比較する際に用いられる。等価線量限度は、各組織での等価線量について定められた一定期間における線量限度であるが、確定的影響の線量限度としても用いられる。放射線防護の目的の一つは、確定的影響の発生を完全に防止することにある。

【解答】 4

問題 3 組織荷重係数・実効線量などに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 組織荷重係数とは、各組織における単位線量当たりのがん発生率のことである。
 - B 組織荷重係数（ICRP1990 年勧告）の値は以下の通りである。
生殖腺＝0.20＞骨髄（赤色）・結腸（大腸下部）・胃・肺＝0.12＞膀胱・乳房・肝臓・食道・甲状腺＝0.05＞皮膚・骨表面＝0.01、残りの組織・器官：0.05
 - C 組織荷重係数は等価線量〔Sv〕から実効線量〔Sv〕を求める際に使用される。
 - D 実効線量〔Sv〕は、確率的影響を評価するために用いられる。
 - E 実効線量限度〔Sv〕は確定的影響に関わる線量限度である。
- 1 ABC のみ 2 ABE のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 CDE のみ

解説

A 誤：設問の記述はがんの確率係数についての記述である。組織荷重係数は放射線防護の目的で、低線量被ばくにおける確率的影響に対する個々の組織の感受性を示した係数である。致死がん・非致死がん・相対的寿命損失・重篤な遺伝的影響に注目している。組織ごとにこれらの障害の起こる確率の合計を求め、全身での確率の総和に対する、個々の組織での確率の比を計算したものである。全身での合計の値が1になるように丸めた数値となっている。その意味合いは、各組織の確率的影響に対する感受性の違いを、全身に対する割合として表したものである。組織荷重係数は、職業人と一般公衆では同一の係数が用いられている。B 正：本試験では、組織荷重係数の値そのものを質す問題はない。しかし組織間における組織荷重係数の大きさを質す問題が出題されている。2008 年には、新たな組織荷重係数が国際放射線防護委員会から提示された。C 正：実効線量〔Sv〕は、等価線量〔Sv〕に組織荷重係数を掛け合わせ、問題となるべき全組織について加算したものである。組織荷重係数は確率的影響に関する係数なので、確率的影響を評価する際に使われる。D 正：実効線量〔Sv〕は個人の全身での確率的影響を評価するために、防護量として考え出された線量で、放射線の確率的影響を個人間で比較するために便利な線量である。E 誤：実効線量限度（Sv）は確率的影響（がんと遺伝的影響）に関わる線量限度である。放射線による損害の程度（死亡の生涯確率や平均余命の損失など）や年間死亡率が 10^{-3} を超えない線量などから総合的に定められた値である。

【解答】4

問題 1 標識化合物の利用法に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 標識化合物の比放射能が高いと分離を受けやすい。
- 2 ミクロオートラジオグラフィには、 ^{32}P 標識化合物がよく用いられる。
- 3 ^{14}C 二酸化炭素は光合成量を調べるのに使われる。
- 4 ^{125}I 標識化合物は、 ^{131}I 標識化合物に比べて長期にわたって使用することができる。

解説と解答

1 ○：比放射能の高い標識化合物では、①放射性壊変に伴う元素変換効果による分解、②自らの放射線照射による分解、に注意する必要がある。2 ×：解像度の関係から、超ミクロオートラジオグラフィでは ^3H と ^{125}I 、ミクロオートラジオグラフィでは ^3H と ^{14}C 、マクロオートラジオグラフィでは ^{14}C 以上のエネルギーを出す β 核種が主に使われる。 ^{32}P は解像度の関係でミクロオートラジオグラフィでは使用されない。マクロオートラジオグラフィでは、 ^3H の β 線は X 線フィルムの保護膜を通過しないので、 ^3H は使用されない。3 ○：他に、グルコース・チミジン・ウリジン・ロイシン・グリシン・ヒスチジン・メチオニンなどの標識化合物の利用法を勉強しておくこと。4 ○：物理学的半減期は ^{131}I よりも ^{125}I の方が長い。一方、 ^{131}I 標識化合物は ^{125}I 標識化合物に比べて、放出される放射線の関係から、体外からの計測がしやすい。

問題 2 遺伝子研究などに使われる標識化合物に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A $[^{32}\text{P}]$ リン酸は DNA に標識され、塩基配列の分析などに使われる。
 - B ^{32}P で標識した dCTP を DNA 合成実験に使うには、 α 位標識でも γ 位標識でも、どちらでもかまわない。
 - C リン酸基とヌクレオシドの結合は $[\alpha\text{-}^{32}\text{P}]$ dCTP 中の ^{32}P が壊変しても、そのまま維持される。
 - D ^{32}P -ATP は DNA の末端ラベルなどに使われる。
 - E DNA の構成元素ではないが DNA の標識に用いられる核種には、 ^{35}S と ^{125}I とがある。
- 1 ABC のみ 2 ABE のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 CDE のみ

解 説 A 正：DNA にはリンが含まれ、このリンの部分を ^{32}P で標識して、塩基配列の決定などに使用されている。例えば $[\alpha\text{-}^{32}\text{P}]$ デオキシシチジン三リン酸 (dCTP) は DNA の塩基配列決定に用いられる。B 誤：ヌクレオチドである dCTP は、塩基であるシトシンにデオキシリボースと 3 つのリン酸がついたもので、シトシンを供給するので、DNA 合成に使用される。 ^{32}P の標識位置はシトシンに近いものから α 位、 β 位、 γ 位と呼ばれている。dCTP を利用して合成された DNA には α 位のリン酸だけが残るため、 β 位や γ 位標識の $[^{32}\text{P}]$ dCTP では DNA の標識はできない。C 誤： ^{32}P の放射性壊変により結合は離れてしまう。DNA や RNA の基本構造は、(デオキシ)ヌクレオチドがリン酸基を介して隣接する (デオキシ)リボースと重合した (デオキシ)ポリヌクレオチド鎖構造をしている。 ^{32}P が壊変するとリン酸基が破壊されるため、1 本鎖の切断が起こる。また、 β 崩壊による電子が反対鎖のリン酸-リボースの結合を破壊すると DNA 2 本鎖切断となる場合もある。D 正：ポリヌクレオチドキナーゼは ATP の γ 位のリン酸を DNA や RNA の 5' 末端に転移する活性を持つ。 $[^{32}\text{P}]$ ATP を利用してラベルされた DNA や RNA は、サザンやノーザンハイブリダイゼーションで塩基配列が相同な遺伝子の同定や定量などに利用される。また、標識された末端塩基の解析にも利用できる。E 正： $[^{35}\text{S}]$ モノヌクレオチド、 $[^{125}\text{I}]$ ヨードデオキシウリジンなどが代表例である。 $[^{35}\text{S}]$ dCTP は DNA 合成の基質として DNA 塩基配列決定に利用される。 $[^{32}\text{P}]$ dCTP よりも β 線のエネルギーが低いため、鮮明な DNA 電気泳動パターンが得られる一方、フィルム現像までに長時間を要する。 $[^{125}\text{I}]$ ヨードデオキシウリジンは DNA の基質であるチミジンの 5 位のメチル基の代わりにヨードを導入することで分子量を増大させたい場合に利用される。ヨードデオキシウリジンを含む DNA の密度が大きくなることを利用して、新生 DNA 鎖の分離や解析に利用される。 【解答】 3

問題 3 遺伝子研究などに使われる標識化合物に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 ^{32}P で標識したデオキシヌクレオチド-3-リン酸で標識した DNA 断片（プローブ）を用いて特定の遺伝子の存在を検出することができる。
- 2 ^{32}P で標識された DNA 断片は、特異的な RNA の検出に使用される。
- 3 $[^3\text{H}]$ ウリジンは哺乳動物細胞での遺伝子転写産物を調べるのに適当な標識化合物である。
- 4 ^{32}P で標識した DNA プローブを用いて、特定の遺伝子の転写産物量を調べた。

解説と解答

1 ○：サザンブロッティングと呼ばれる手法である。標識した DNA（プローブ）を使って、この標識 DNA と塩基対を形成することができる DNA だけを検出する。塩基対を形成させる過程をハイブリダイゼーションと呼ぶ。いろいろな塩基配列の DNA が混ざり合っている中から、標識 DNA と塩基対を形成できる配列だけを見つけ出すことになる。サザン分析では標識 RNA プローブとのハイブリダイゼーションによっても特定の DNA を検出することができる。2 ○：ノーザンブロッティング法がその例である。これは、種々の RNA 分子を含む RNA 抽出液をゲル電気泳動して RNA を分子の大きさ（長さ）に従って分離した後、フィルタに吸着させ、標識 DNA プローブや標識 RNA プローブとのハイブリダイゼーションにより特定の RNA を検出する方法である。3 ○：DNA にある遺伝情報が RNA に写とられる過程が転写である。RNA での翻訳を経て、タンパク質が合成され、遺伝子の発現となる。遺伝子転写産物とは RNA のことを指し、遺伝子転写産物を調べるためには、RNA を構成する塩基の 1 つである $[^3\text{H}]$ ウリジンが使われる。4 ○：一般的に RNA の合成総量を調べるには標識したウリジンを用いることで遺伝子転写産物の定量は可能である。一方、特定の RNA の転写量を調べるためには特定 RNA の分離・同定と定量が必要である。このため、細胞抽出液中の RNA をゲル電気泳動などで分離した後、標識 DNA をプローブとしてハイブリダイゼーションを行い、特定 RNA の同定を行う。経時的にサンプリングすることで特定 RNA 量の時間変化を解析できる。

問題 4 核医学診断などに関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 ^{18}F 標識化合物の使用に際しては、放出される放射線のエネルギーが高いために、周囲のヒトの被ばくに注意が必要である。
- 2 ヒトに直接投与することを目的としたがん関連抗体の、放射性ヨウ素による標識では、診断を目的とする場合には ^{123}I 、 ^{131}I 、治療を目的とする場合には ^{131}I が用いられる。
- 3 放射性医薬品として使用されている主な核種には、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 、 ^{51}Cr 、 ^{59}Fe 、 ^{67}Ga 、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{123}I 、 ^{131}I 、 ^{133}Xe 、 ^{201}Tl などがある。

解説と解答

1 ○： ^{18}F はポジトロン核種で、サイクロトロンでつくられ、PET 診断に使用される。物理学的半減期は 110 分と短い。崩壊により出た陽電子は付近の電子と反応し、0.51 MeV の 2 本の消滅放射線（ γ 線）を放射する。消滅放射線による周囲のヒトの被ばくには注意が必要である。 ^{18}F -フルオロデオキシグルコースは、脳をはじめ各種組織でのがん診断やエネルギー代謝測定に使用される。2 ○：一方、体外診断法にはラジオイムノアッセイ（RIA）がある。これは患者から採取した血液や尿などに含まれているホルモンなどの生理活性物質やがんに関連する微量な成分などを、 ^{125}I 標識抗原を用いて免疫学的に定量するもので、患者にアイソトープを投与することなしに検査ができる。最近では ^{125}I 標識抗体を用いるイムノラジオメトリックアッセイ（IRMA）も行われている。3 ○： $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は使い勝手のよいエネルギーの γ 線を出し、半減期も 6 時間と短く、患者の被ばく線量が少なくすむため、核医学診断において多用されている。 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O もポジトロン核種で各種の機能診断に利用されている。それぞれの核種について物理的半減期・エネルギーや使用例なども勉強しておく必要がある。

問題 5 放射線が生体に入ったときの線量分布などに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 炭素イオン線、電子線、陽子線、X線、 γ 線、速中性子線のうち、放射線治療でブラッグピークを利用するものは、炭素イオン線と陽子線である。
- 2 炭素粒子線の生物作用は、ブラッグピーク付近で最大となる。
- 3 中性子線は体内の深部ほどエネルギー付与が大きい。
- 4 低 LET 放射線は身体の表面付近で付与される線量が高い。

解説 1 正：重荷電粒子では飛程の終点付近でエネルギー付与密度の高いブラッグピークをつくる。吸収線量が体表面からある深部まではほぼ平坦であるが、ある深部でピークとなる性質を放射線治療に利用するものには、陽子線と重イオン線の炭素イオン線が該当する。2 正：炭素粒子線などの重荷電粒子線では、大半のエネルギーはブラッグピーク付近に付与され、この付近で生物作用は最大となる。3 誤：中性子線は電荷がなくブラッグピークを形成しない。最大のエネルギーの付与は身体の表面付近で行われ、深部に行くほど付与は小さくなる。4 正：深部では線量は低くなる。ブラッグピークは電磁波である X 線・ γ 線では生じない。

【解答】 3

問題 6 がん治療における RBE に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 がん治療において、電子線の RBE は X 線と同等であるが、速中性子線と重イオン線の RBE は X 線よりも大きい。
- 2 陽子線のブラッグピークの部分の RBE は 1 より小さい。
- 3 放射線荷重係数とがん治療における RBE とは同じ値である。

解説と解答 1 ○：低 LET 放射線である電子線の RBE は X 線の RBE とほぼ同じである。がん治療における RBE は、陽子線 1.0 ～ 1.2、速中性子線 1.2 ～ 2.8、重イオン線は 1.2 ～ 3.1 程度である。2 ×：陽子線はブラッグピークを形成し、粒子が止まる直前で多くのエネルギーを付与することになり、ブラッグピーク部分の RBE は 1 よりも大きくなる。3 ×：放射線荷重係数は低線量における確率的影響の誘発に関する RBE を代表するように決められており、高線量でのがん治療における RBE の値とは異なる。

問題 7 がん治療に用いられる線源に関する次の記述のうち、正しいものには○、誤っているものには×をつけなさい。

- 1 α 線、電子線、 γ 線、X線、陽子線、速中性子線、炭素イオン線のいずれもが、がんの治療に用いられる。
- 2 ^{60}Co 、 ^{125}I 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir のいずれもが、治療用の密封線源として使用される。
- 3 中性子捕捉療法は、中性子と ^{10}B との原子核反応から得られる α 粒子を用いたがん治療法の1つである。
- 4 炭素イオン・ネオンイオンなどの重粒子線はがん治療に有効である。

解説と解答

1 ○： ^{226}Ra からは α 線が出ているが、ラジウム針では容器により遮へいされ、 α 線が治療に寄与しているわけではない。ラジウム針で利用しているのは γ 線である。中性子捕捉療法では、 α 線ががん治療に利用されている。リニアックより発生する電子線・X線、X線発生装置からのX線、 ^{60}Co から発生する γ 線、シンクロトロンより発生する陽子線、サイクロトロンより発生する速中性子線、重粒子線発生装置より発生する炭素イオン線などががん治療に使われている。2 ○： ^{60}Co はテレコバルトとして外部照射治療にも使われる。密封小線源としては、 ^{60}Co ・ ^{103}Pd ・ ^{125}I ・ ^{137}Cs ・ ^{192}Ir ・ ^{198}Au ・ ^{226}Ra などが治療用に使われる。3 ○：原子炉を利用した ^{10}B (n, α) ^7Li という原子核反応により放出される α 粒子を利用している。 α 粒子は飛程が短く、電離密度が大きいため、がん病巣に集中できれば、効果的な治療が期待できる。4 ○：中性子線はX線や γ 線に比べてRBEが大きく、低酸素性のがん細胞を殺す力が強い。陽子線はブラッグピークを形成し深部での線量分布が得られ、X線や γ 線に比べてがん組織に集中的にエネルギーを付与することができる。重粒子イオンは、ブラッグピークを形成するので病巣への高い線量集積性を持ち、高いRBEを持っている。重粒子イオンは低酸素性細胞にも有効で、陽子線と中性子線の両方の長所を持っているので、今後の利用拡大が期待されている。がん治療に用いられる重粒子イオンには、ヘリウム (He)、炭素 (C)、ネオン (Ne)、シリコン (Si)、アルゴン (Ar) がある。

問題 8 重粒子線治療の特徴に関する次の記述のうち、正しいものの組み合わせはどれか。

- A 重粒子線治療では、 π 中間子が用いられる。
 - B 重粒子線は、X線や γ 線と比べて、身体の深部にあるがんの治療に適している。
 - C 重粒子線による治療効果は、X線や γ 線と比べて、細胞周期による影響を受けやすい。
 - D 重粒子線による治療効果は、X線や γ 線と比べて、酸素による影響が小さい。
- 1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

解説

A 誤：重粒子線治療では、ヘリウム (He)、炭素 (C)、ネオン (Ne)、シリコン (Si)、アルゴン (Ar) などの重粒子イオンが用いられる。B 正：重粒子線はブラッグピークを形成するので、深部にあるがんの治療に適している。C 誤：重粒子線では修復しにくいDNA損傷が多く、細胞周期などの修飾要因による影響は小さい。D 正：重粒子線では関節作用の寄与は少なく、ラジカルの生成が少ないので、酸素効果はX線や γ 線に比べて小さく、低酸素性のがん細胞に有効である。

【解答】 5