

講義の進め方・質疑応答について

■可能ならば、WEB版を講義前に見られるようにしてもらえると、いろいろとやりやすいです。

私の場合、講義資料にぎりぎりまで手を入れて講義を行った後、引用した画像やデータに出典などの漏れが無い
か、著作権侵害が無いかなどをチェックした後にWEB掲載するため、どうしても時間がかかってしまっています。
予習したいという要望はもっともだと思いますがご容赦ください。

なお、オムニバス形式の講義のため、第4回以降の講義は私以外の先生方に交代しますが、他の先生方にそのよ
うな要望が有ることはお伝えしておきました。

■今回の講義で1, 2回目広義の復習をしてくださったのがありがたかったです。今後も、講義の復習や補足を
挟んで頂けると嬉しいです。

本講義はオムニバス形式のため、私の担当は3回目までになります。したがって私の方から能動的に復習や補足
を行う機会はもう無いのですが、基礎分野に関する疑問・質問等にメールでお答えすることはできます。遠慮な
くご連絡下さい。

■今後の授業でシーベルト以外の単位の定義について扱うことはありますか。

他の先生の講義内容を細部まで把握しているわけではありませんが、放射線・放射性同位体関連で主に使われる
単位は Bq、Sv、Gy なので、以降の講義でこれら以外の単位が出てくる可能性は低いです。古い単位として Ci
(キュリー)、R (レントゲン)、rad、rem などがありますが、これらは現在 Bq、Gy、Sv に置き換わっていま
す。

■壊変図式が未だに理解できない。γ線スペクトロメトリーの連立方程式も何を表す式なのかわからない。

力不足で申し訳ありません。これらは放射性同位体の測定が具体的にはどのように行なわれているかを説明する
ために取り上げたので、仮に理解できなくても第4回以降の講義の理解に深刻な影響は有りません。しかし、も
しきちんと知りたいということであれば、私の居室に来ていただければ追加説明は可能です(実際の測定装置の
見学もできます)。希望される場合はメール等でご連絡下さい。

■リスクの評価の部分が難しかったので、より詳しく説明を聞きたい。

上記と同じく、居室に来ていただければ追加説明できます。

放射線の人体影響メカニズムについて

■DNAの誤った修復とは具体的にどんなものか気になりました。

DNAは相補性のある2本鎖からできており、片方が切断されただけであれば、もう1本の鎖から正確に復元で
きます。しかし、放射線による損傷はたとえ電子線(や光子線)によるものであっても比較的高確率で2本鎖切
断を起こします。

2本鎖切断が生じた場合にどのような修復(および不完全な修復)が行なわれるのかは、例えば下記の解説記事
を参照してください。

黒沢 綾、足立 典隆「ヒト細胞におけるDNA二本鎖切断の修復」

https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201405_TENBO_KUROSAWA_ADACHI.pdf

また、遺伝情報の誤りがどのように細胞のがん化につながるかは、下記のページの解説が分かりやすいと思いま
す。

国立がん研究センター「細胞のがん化する仕組み」

https://ganjoho.jp/public/dia_tre/knowledge/cancerous_change.html

■放射線による DNA の損傷の際に、直接よりも水分子等を介しての損傷が多いのは、単に DNA が小さいために放射線が水分子に当たる確率が高いからという認識で良いのだろうか？

講義の際には簡単に流してしまいましたが、実際にはこの割合は放射線の種類によっても異なります。原発事故で問題になっている ^{137}Cs が出す電子線や光子線ではラジカル生成による間接的な損傷の方が多いのですが、 α 線のように狭い範囲に集中してエネルギーを与える放射線の場合、直接 DNA を損傷させる率が高くなることが知られています。

ATOMICA「放射線の DNA への影響」

http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-02-02-06

■なぜ内臓などの特定の組織が致命的な癌になりやすいのでしょうか？

組織によって違いがあることまでは理解していますが、それがなぜかについて、申し訳ありませんが自信を持ってお答えできるほどの知識が有りません。医学系の専門の方の解説等を探してみてください。

医療被曝について

■授業においては、ガンを引き起こすものとしての放射線のふるまいを学びましたが、ガン治療に用いる際の放射線のふるまいはどのようなものなのでしょうか（類似質問複数）。

がん細胞に高線量を与えることによって DNA を損傷させます。つまり正常細胞に対するふるまいと同様です。したがって、がん細胞以外の正常細胞への影響を抑えつつがん細胞に線量を集中させるために、様々な工夫が行なわれています。

例えば飛程の短い電子線や弱い光子線を発生する核種を腫瘍に埋め込む方法や、外部から放射線を当てる場合に 200 箇所前後の位置から γ 線を腫瘍に照射し、正常部分の被ばく量を腫瘍に比べて 200 分の 1 にするといった方法（ガンマナイフ）などがあります。

また、 α 線等の重粒子線は飛程の末端部分で急激に相互作用が強くなる性質（ブラッグピーク）があり、照射経路上にある体の表層近くの組織をあまり被ばくさせず、腫瘍の存在する深さで線量が高くなるように調整することもできます。

■早見図によればがん治療の被ばく量は大きいですが、その治療がガンを誘発することはないのか疑問に感じた。

がん治療に伴う被ばくによって発がんリスクは上昇すると考えられています。現在発症しているガンを放射線治療することによるメリットと、将来的な発症リスクというデメリットを考慮した上で、メリットの方が大きい場合に治療が実施されることとなります。

■レントゲンはどのような放射線をどれだけ使用して、人体への影響を抑制しているのか気になった。私の考えたこととしては、まず、半減期の短い放射線を利用して被験者の体内やレントゲン室内に放射線が多量に残らないようにし、また、ある被ばく量以下では症状の出ないしきい値の範囲内に収まるように体の部位に応じて線量を調製しているのではないかということである。

レントゲン撮影では放射線は使用しますが、放射性同位体は使用しません。第 2 回講義の際に配布したコピー（放射線と安全につきあう p.150）に記載が有りますが、電子を加速してターゲットの金属に照射し、そこで発生する制動放射と特性 X 線を利用します。

この場合、X 線照射経路のシャッターを閉じる、電子の発生・加速を止める等の処置を行うことで、放射線の照射を ON/OFF することができますので、残留は問題になりません。一方で、PET 検査やシンチグラムといった検査では体内に放射性同位体を投与しますので、半減期が短いということは重要です。

なお、低線量被ばくで問題になるがんの発生にはしきい値が存在しないと見なされています（少なくとも防護のルール上、存在しないとみなして対応します）。このため、合理的に必要な線量を見極める作業が必要になります（少なすぎると像が写らないリスクが上がり、多すぎるとがんリスクを高める）。

シーベルトの算出について

■内部被ばくはベクレル×実効線量係数で計算しますが、これは実効線量ではなく等価線量に相当するものと考えて良いのでしょうか？また、組織加重係数の和が 1 になるように設定されているとのことでしたが、それは全

身への影響を合わせたものが等価線量で表現されるという意味なのでしょうか？

Bq×実効線量係数は等価線量ではなく実効線量です。この実効線量を求める際には、摂取した核種による各組織の等価線量を計算し、それぞれの組織の組織加重係数を掛けたうえで合計しています。

実効線量 = \sum 各組織の等価線量×各組織の組織加重係数

組織加重係数の和が1である理由についての公的な記述を見つけることができなかつたのですが、和を1にすると外部被ばくで全身均一に1Sv被ばくした場合と、内部被ばくで各組織について個別に1Svずつ被ばくした場合の計算値が一致するようになります。つまり、内部被ばくと外部被ばくを一元的に比較可能とするための工夫だと思われまふ。

■複数のSvの紛らわしさを解決するための呼び分けの試みは無いのですか？複数の定義が一つの式の中にある場合はどのような書き分けをしているのですか？

同感です。せめて等価線量と実効線量は分けて欲しかったですが、今のところ両方ともSvです。ちなみに式の中などで複数のSvを区別する方法として、実効線量をE、等価線量をHで表現する方法が有ります。

■周辺線量当量や個人線量当量のH*(10)やHp(10)という記号は何を表しているのか疑問に思つた。

実用量の場合、人体の特定の深さ（主に10mmと0.07mm）の等価線量に相当する値（線量当量）を使用するため、H(10)、H(0.07)というように0内に深さを表記します。10mmの深さは全身被ばくの評価に使用されます。X線やγ線等の光子線の外部被ばくでは、一般に人体表面から10mmくらいが最も吸収が大きいため、この深さでの吸収量で全身の吸収量を代表させることで、簡便性と安全性を両立させる工夫です。0.07mmは眼球や皮膚の被ばく評価に使用されます。

また、Hの後ろに付く記号は実用量の種類を表しています。よく使われるのは、空間線量測定用の線量計で測る「周辺線量当量 H*(10)」、身につけて使う線量計で測る「個人線量当量 Hp(10)」などです。

■線量計などでGyではなくSvが表示される場合、その値を出すための演算をどのようにしてその機械が行なっているのか？という疑問が生じた。

どの線量計でも行っている方法として、ある特定の放射線（例えば¹³⁷Csの662keVのγ線）が飛び交っている条件において、センサーで検知した値とSv（この場合、実用量である周辺線量当量 H*(10)）との関係を校正するというものがあります。ただしこれだけでは、校正時と異なるエネルギーの放射線が飛び交っている場合に正しいSvを表すことはできません。

高級な線量計では、エネルギー補償という機能があり、放射線のエネルギーに影響されずに正しいSvを表示できるようになっています。シンチレーション型の線量計はある程度エネルギーを判定できますので、エネルギーに応じてセンサーの出力とSvの関係式に重みづけを行います。エネルギーを判定できないGM管型等の場合、センサーの周りに物理的なフィルタを入れる等の方法で調整します。

■体内動態モデルおよび線量評価モデルについて、その信頼性がどのように担保されているかお聞きしたいです（実際に実験で得られたものですか？など類似質問複数）。

□体内動態モデルについて

ICRP Publ.30(part1)を確認したところ、p.159-161に「セシウムの代謝データ」という一節が有り、セシウムの体内動態パラメータの算出について述べられています。ここに引用されている原著論文のタイトルを見る限りでは、事故や核実験等で人が¹³⁷Csを摂取した場合の追跡調査と、ラットやビーグル犬による動物実験のデータの両方を参考にしているようです。

ちなみに、下記URLでダウンロードできるPDFのp.173からがセシウムの代謝データに関する記述です。

ICRP Publ.30 Part 1「作業員による放射性核種の摂取の限度 Part 1」

http://www.icrp.org/docs/P30-1_Japanese.pdf

体内動態モデルについての概要は以下の発表資料も参考になります。

栗原治「国際放射線防護委員会（ICRP）の放射性核種の体内摂取に伴う線量評価モデルについて」

<https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001cyyt-att/2r9852000001cz7c.pdf>

□線量評価モデルについて

現在の主流は計算機によるモンテカルロシミュレーションです。このシミュレーションの信頼性は、例えば以下のような手法で検証されています。

人体を模擬した組成や形状を持つモデルをファントムと言います。この中に線源を埋め込んで外部から測定したり、逆にファントム内に測定器を埋め込んで外部からの放射線を測定したりすることで、人体内の放射線の挙動を実測から推定することができます。その一方で、ファントムを再現した3Dモデルによる計算機シミュレーションも行い、両者の結果が一致すれば計算機シミュレーションによる推定が妥当であることが証明できます。

■放射線荷重係数や組織加重係数はどのように決定されているのか気になった。放射線加重係数はエネルギーから考えられるかもしれないが、組織加重係数は何を基にしているのだろうか（類似質問複数）。

組織加重係数の策定におけるもっとも重要なデータは原爆被爆者の追跡調査です。これに加え、医療被ばく患者、放射線業務従事者、核実験・天然核種からの環境被ばく等のデータ等も併用されています。参考までに、これらのデータから最終的な数値を策定するステップをICRP Publ. 103より抜粋したものを引用します。

Box A.1：組織加重システム策定のステップ

組織加重システムの策定は、主としてがんに関する相対放射線損害に基づいていた。策定の段階は順に以下のとおりであった：

- a) 放射線関連がんについて、生涯がん罹患リスク推定値を決定する：14の臓器又は組織に対して、男性と女性の生涯過剰がんリスクを過剰相対リスク（ERR）と過剰絶対リスク（EAR）の両モデルを用いて推定し、ついで、男女にわたって平均した。
- b) 線量・線量率効果係数（DDREF）を適用する：生涯リスク推定値は、DDREFを考慮して2倍だけ下方に調整された（白血病は別とする。この場合については、直線-二次のリスクモデルでDDREFが既に考慮されている）。
- c) リスク推定値を集団間で転換する：各がん部位についての放射線リスクを推定するため、ERRとEARによる生涯リスク推定値の加重を定め、ベースラインリスクの異なる集団間で一般化するために合理的な根拠を提供した（ERR：EARの加重0：100%は乳房と骨髄に、100：0%は甲状腺と皮膚に、30：70%は肺に、そして50：50%はその他すべてに割り当てられた）。
- d) 名目リスク係数：これらの重み付けされたリスク推定値は、7つの西欧人とアジア人の集団に適用され、平均されて、表A.4.1と表A.4.2に示されている名目リスク係数を提供した。
- e) 致死率の調整：過剰に起こる罹患がんに基づく個々のがん部位に関する生涯リスクは、代表的な国のがん生存率データから導かれたそれらの致死割合を乗じることによって致死がんリスクに変換された。
- f) QOLの調整：非致死がんに関連する罹病率と苦痛を考慮するために、更なる調整を適用した。
- g) 寿命損失年数の調整：がんのタイプによって年齢分布が異なるので、国のがんデータから数種類のタイプのがんの平均年齢を推定し、がんが発生したときの寿命損失年数の平均値に変換した。ついで、これまでの段階の結果に寿命損失年数の調整を適用した。
- h) 放射線損害：上記の計算結果から個々のがんのタイプに関連する放射線損害の推定値が得られた。これらは、合計して1になるように規格化されると、表A.4.1の相対放射線損害となる。
- i) 組織加重係数：表A.4.1の詳細な相対放射線損害は、それらの推定に関連する不確実性のゆえに不正確であるため、それらは相対損害をおおまかに反映するように4つのカテゴリーにグループ化された。詳細な放射線リスク計算のために、情報が不十分な臓器又は組織への放射線リスクを考慮して、未処理のグループである“残りの組織”も追加された。

放射線加重係数策定の詳細については ICRP Publ.92 を参照してください（概要だけであれば最初の 2 ページ程度に要約されています）。

ICRP Publication 92 「生物効果比（RBE）,線質係数（Q）,及び放射線加重係数（wR）」

http://www.icrp.org/docs/P92_Japanese.pdf

なおこの両者に共通する要素として、実用可能な程度の複雑さに留める目的で、ある程度の不確実性を許容して設定されていることが挙げられます。放射線加重係数は中性子を除いて 1,2,20 の 3 段階、組織加重係数も最も高い 0.12 からもっとも低い 0.01 までの 4 段階にまとめています。トランスサイエンスな決断をしている一例としても参考になるかと思えます。

■ヒト以外の動植物への影響を考える際も同じ計算方法でシーベルトを定義するのか（マウス実験など）、それともグレイのままなのか？

人間以外の被ばく量はグレイで表します。シーベルトは放射線加重係数や組織加重係数の見直しで変わってしまう可能性が有るため、調査条件や実験条件の表現には向かないという事情もあると思います（実際に、ICRP の 1990 年勧告と 2007 年勧告では採用されている係数に若干の変更が有ります）。

■内部被ばくの量を検出する方法を見つけられると素晴らしいなと思いました。

直接の被ばく量の測定はやはり難しいです。間接的には、 γ 線を出す核種の場合、ホールボディカウンターという装置で現在体内に残存している核種量を測定することが可能です。その核種を摂取した経路と時期が特定できれば、体内動態モデルと組み合わせて積算被ばく量を推定することができます。また、排泄物を調べることで、モデルを用いた推定を行う場合も有ります。

核燃料サイクルについて

■高速増殖炉が ^{238}U を ^{239}Pu に変換する能力が高いのはなぜでしょう

普通の原子炉では核分裂で生じた高速の中性子を減速材（兼冷却材）の水で減速し、熱中性子（運動エネルギーが熱運動レベルに落ちた中性子）となったものが核燃料である ^{235}U および ^{239}Pu の核分裂を引き起こします。これに対し、高速増殖炉では減速材を使わず、高速な中性子で ^{239}Pu （および、その他の核種）の核分裂を起こします。

1 回の核分裂で生じる中性子数を η で表すと、次の核分裂を起こすのに必要な 1 個を除いた $\eta - 1$ 個が余分になり、これを ^{238}U から ^{239}Pu への変換に利用することができます。

^{238}U - 中性子吸収 \rightarrow ^{239}U - β 壊変 \rightarrow ^{239}Np - β 壊変 \rightarrow ^{239}Pu

中性子エネルギーと η の関係を示す図（<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/03/03060402/02.gif>）を見ると、中性子のエネルギーが低い場合は ^{235}U も ^{239}Pu も η にそれほど余裕がありません。

しかし中性子のエネルギーが $2 \times 10^5 \text{eV}$ を超えると η が安定して 2 を超えるため、理論上は 1 回の核分裂で生じる中性子で、核分裂を維持しつつ 1 原子以上の核分裂核種を新たに作る、つまりエネルギーを生み出しつつ核分裂核種を増殖させることができるようになります。

また、この余った中性子を効率よく ^{239}Pu の製造に使うため、高速増殖炉では炉心の外側に ^{238}U を多く含むブランケット燃料棒というものを並べ、炉心から漏れてきた中性子で ^{238}U から ^{239}Pu を作るようになっています（<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/04/04090205/02.gif>）。

ATOMICA 「原子炉物理の基礎（2）中性子増倍率と転換、増殖」

http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=03-06-04-02

■原子燃料サイクルにおいて使用済み核燃料はどのような形で蓄積されるのですか

短半減期の核分裂生成物が多く、したがって崩壊熱の発生が多い間は、冷却水を循環させた燃料プール内で冷却しつつ保管します（水は同時に、燃料棒からの放射線を遮へいする役割も有ります）。

崩壊熱が収まってきた使用済み燃料は、ドライキャスクと呼ばれる空冷式の保管容器に移す場合もあります（冷

却水を循環させる必要が無いため、停電に強いというメリットが有ります)。

電気事業連合会「使用済燃料の貯蔵対策 > 対策の強化と貯蔵方法」

<http://www.fepec.or.jp/nuclear/cycle/chozou/reinforcement/index.html>

α線の検出について

■試料から出たα線とCR-39の化学反応はどういったものだろうか。

エーテル結合やエステル結合を切断するようです。

簡易な説明 → 藤井正美「固体飛跡検出器の魅力」

https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/19/no358.pdf

詳細な説明 → 小平 聡、山内 知也「固体飛跡検出器CR-39における重イオン飛跡生成メカニズム研究の現状」

http://www.radiation-chemistry.org/kaishi/094pdf/94_27.pdf

■CR-39を用いてα線を検出する際に3ヶ月もかかるのは、 ^{210}Po の半減期など関係が有るのか？また、冷凍保存していても常温時と同じように ^{210}Po を検出することができるものなのか？

検出の原理上、エッチングした後に十分なシグナルが得られなかった場合、最初からやり直す必要が有ります。期間が短すぎても検出できずに時間の無駄になりますが、あまり長くしても ^{210}Po が減ってしまって時間効率が落ちます。したがって、 ^{210}Po の半減期1回分である3ヶ月を選びました。今回の結果を見る限り、もっとシグナルが弱くても良いのであれば、1ヶ月程度でも検出できたかもしれません。

冷凍保存したのは、(フリーズドライ処理を行ったとはいえ)常温では試料が腐ったり虫がついたりする可能性があったためです。CR-39による検出には温度依存性があることが知られていますが、 -20°C と 20°C ではほとんど差が無いようです。詳細は前述の「固体飛跡検出器CR-39における重イオン飛跡生成メカニズム研究の現状」を参照してください。

トランスサイエンスについて

■もんじゅが廃炉になったのは政治的要因もあったのでしょうか？

「政治的要因」が何を意味するかによりますが、少なくとも廃炉の決定は政府によって行われました。

■原発での発電量が、現状かなり少ないようですが、原発による電力供給がないとまかなえないのでしょうか？(日本の場合)

原発の停止分は、現状は主に火力が補填しています。そういう意味では「まかなえている」と言えます。しかし、燃料費増大と二酸化炭素排出量の増大という副作用が生じていますので、完全な意味では「まかなえていない」とも言えるでしょう。

■放射性廃棄物の最終処分場が日本にできるとしたらどこにできるのでしょうか

「最終処分場に適さない場所」については、昨年経産省が公表しました。したがって現時点で言えることは「それ以外の場所のどこか」ということになります。具体的な範囲については下記URLで確認してみてください。

「科学的特性マップ公表用サイト」

http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/

■トランスサイエンスのような難しい問題に対する姿勢について、ワインバーグさんまたは他の方が示したりはしたのでしょうか。難しい問題であることは以前から承知済みですが、それに関して何かアクションをした人がいるのかどうか気になりました。

まず、ワインバーグさんが何を示したかについて。彼は論文中で、科学者はトランスサイエンスな問いに対し、法律家、政治家、市民よりも明確な答えを出せるわけではないが、科学がどこで終わり、トランスサイエンスが

どこから始まるかを示す役割が有ると述べています。そして、トランスサイエンスな問題の場合、つまり、科学者はそれに対して意見を持っているが、その意見を裏付ける厳密な科学的証拠を持っていない場合のアイデアとして、対審手続 (adversary procedure) を提案しています。裁判と類似した手順で、まず初めに争点を整理し、その上で対立意見を持つ科学者がそれぞれ意見の根拠を述べ、相互に質問する形です。これによって、科学の限界がどこにあり、どこからトランスサイエンスが始まるかを明確にすることができます。ただし、これが機能するには科学者・技術者たちに (地位や職責がある人間にとってはほとんど不可能なレベルの) 無私の正直さが必要であるとも述べています。

ワインバーグさんと同時代の人でもう一例あげると、R.P.ファインマンさん (物理学の教科書で見た名前かも知れませんが) も似たような主旨のことを一般向けの講演で述べています (R.P.ファインマン「科学は不確かだ!」)。

一方で、近年の例でいえば、日本学術会議が原発事故後の反省を踏まえて以下の提言を行っています。トランスサイエンスな問題にいかに対応すべきかという内容を含んでいます。

科学と社会のよりよい関係に向けて ー福島原発災害後の信頼喪失を踏まえてー

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t195-6.pdf>

他にも様々な方が考察を行っていますので、トランスサイエンス、サイエンスコミュニケーション等のキーワードで文献検索を行ってみてください。

また、広く社会に発信するわけではなくても、トランスサイエンスな問題というものが存在すること、それに対して今までどのような検討がされてきたのかということ身近な人間に伝えていくというのも一つのアクションだと考えています (少なくとも私はそう思って講義を行っています)