

排出放射性物質影響調査

成果報告会

平成 27 年度

公益財団法人 環境科学技術研究所

今回の成果報告会で説明する内容は、青森県からの受託事業「排出放射性物質影響調査」により得られた成果の一部です。

目 次

解説	： 放射線の単位と影響について	1-4
1.	トリチウムのイネへの移行 ～空気中トリチウム濃度の変化に応じた予測～	
	（1）研究の背景 ～生物中のトリチウム濃度を予測する～	5-12
	（2）研究報告	13-25
2.	放射線の生物影響 ～マウス造血細胞への低線量率放射線の影響～	
	（1）研究の背景 ～環境科学技術研究所における低線量率 放射線生物影響研究について～	26-32
	（2）研究報告	33-44

解説:

放射線の単位と影響について

(公財)環境科学技術研究所

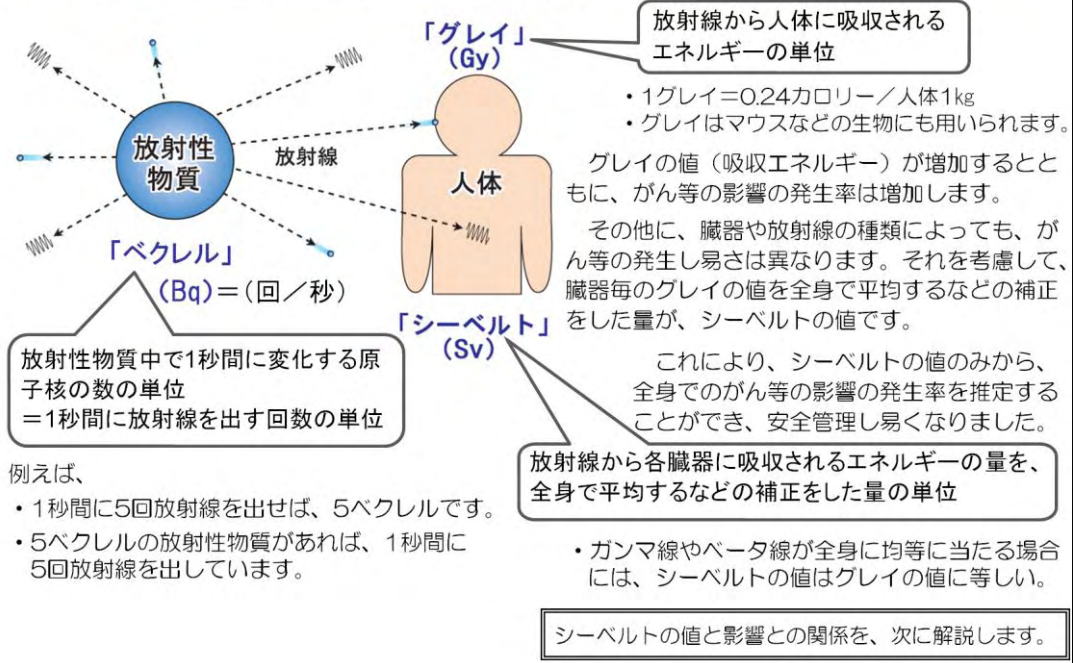
総務部 企画・広報課

石川 敏夫

成果の発表にあたって、その理解の一助とするために、放射線の単位と影響の概要について解説します。

放射線の単位

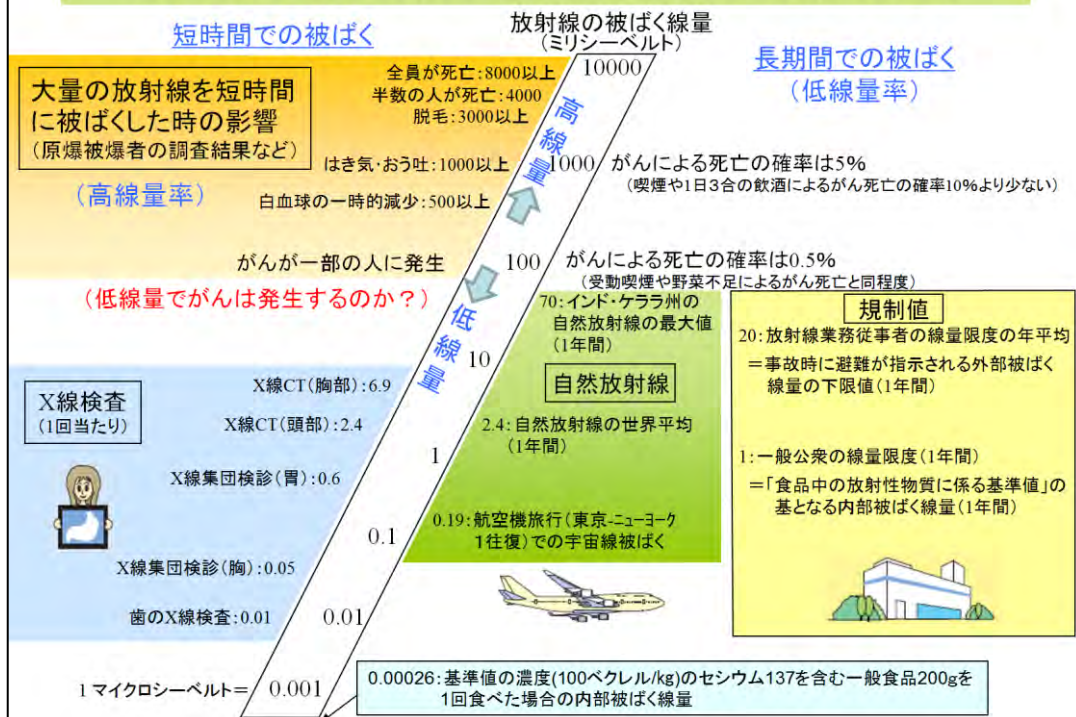
影響の話の前に、放射線の量に関する単位を解説します。



—要点—

1. ベクレルは、放射性物質の原子核が1秒間に変化する数の単位
1ベクレル=1個の原子核の変化/秒
2. グレイは、放射線から人体1kgに吸収されるエネルギーの単位
1グレイ=1 ジュール/人体1kg=0.24カロリー/人体1kg
(グレイは、人体に限らずマウスなどの動物に吸収されるエネルギーとしても用いられる。)
3. グレイの値を補正するために用いる係数
 - ①放射線加重係数：放射線の種類によるがん等の発生し易さの違いを、ガンマ線を基準にして表した係数
ガンマ線：1 ベータ線：1 アルファ線：20
 - ②組織加重係数：臓器等各組織のがん等の発生し易さの違いを表した係数
肺、骨髄、胃等：0.12 生殖腺：0.08
甲状腺等：0.04 皮膚等：0.01
(全ての組織の加重係数の合計が1になるように決められた。)
4. シーベルトの定義
 3. の加重係数を臓器等各組織のグレイの値に掛けて、全身で合計して得られた放射線量が、シーベルトの値である。
(全身に均等にガンマ線やベータ線のエネルギーが吸収された場合には、シーベルトの値はグレイの値に等しくなる。)

放射線の被ばく線量と影響などとの関係の概要



—要点—

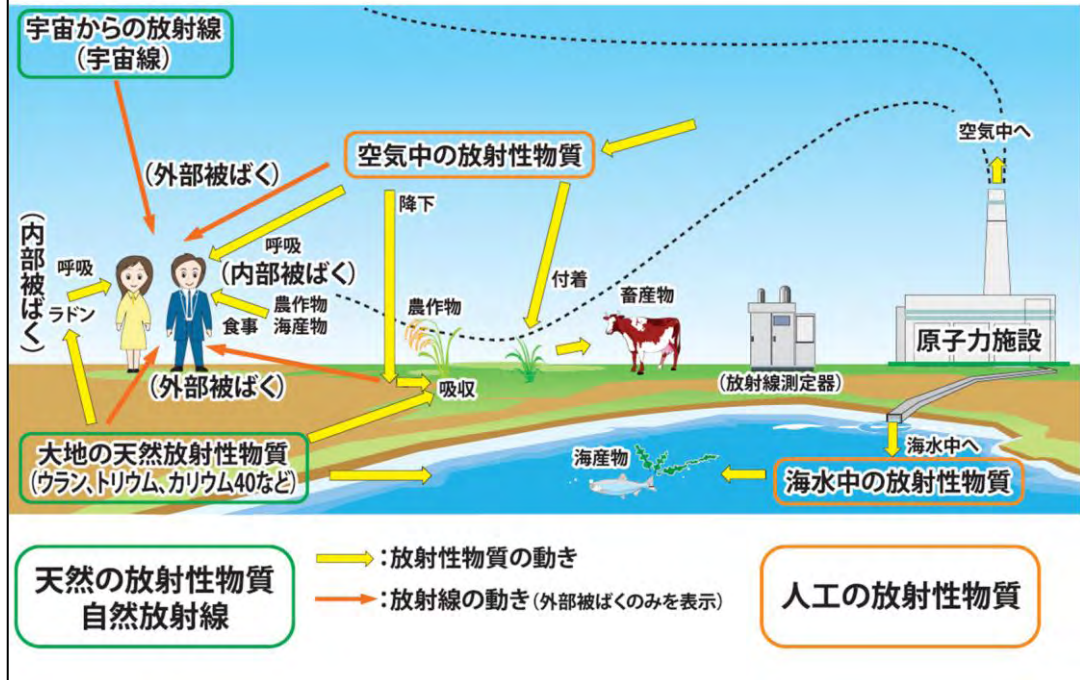
1. 大量の放射線（高線量）を短時間で被ばくした場合（高線量率被ばく）には、様々な影響が現れる。被ばく線量が少なくなるとともに影響も少なくなり、約100ミリシーベルト以下の少量の放射線（低線量）ではがんが発生するののかどうかに関心が高まっている。
2. がんは放射線を被ばくした人が全員なる訳ではなく、例えば、1000ミリシーベルトを100人が被ばくした時、将来がんで死亡する人は約5人であり、その確率は約5%である。
3. 約100ミリシーベルト以下の低線量でのがん発生確率は、喫煙や食生活（飲酒、野菜不足）によるがん発生確率より低いことなどから、人の調査で正確に見積もることは困難である。
4. 原子力施設に関連する放射線被ばくのほとんどは、1時間当たりの被ばく線量は少ない（低線量率）が、長期間にわたって被ばくする可能性がある。

〔用語解説〕

線量：被ばくする放射線の総量。約100ミリシーベルト以下が低線量とされている。

線量率：1分当たり1時間当たりあるいは1日当たりに被ばくする放射線の量。1時間当たり6ミリシーベルト以下が低線量率とされている。

環境中の放射性物質・放射線と人とのかかわり



—要点—

環境中の放射性物質

- ① 環境中には、天然の放射性物質が存在している。
- ② 六ヶ所村の再処理工場から、少量の放射性物質が空気中と海に排出される。

再処理工場から排出される放射性物質の環境中での動きや、それから発生する放射線の影響に関する研究について、発表する。

生物中のトリチウム濃度を予測する

(公財)環境科学技術研究所
理事 環境影響研究部長
久松 俊一

原子炉内ではトリチウム(3重水素)もできる

トリチウムとは

質量数が3の水素同位体

質量数1：軽水素 (^1H)：99.985%

質量数2：重水素 (^2H)：0.015%

弱いベータ線を出してヘリウム3になる。

半減期：12.3年

—要点—

1. 水素には質量数が異なる同位体がある。
2. 自然状態では、質量数が1の軽水素が99.985%であり、質量数が2の重水素が0.015%含まれている。
3. この他、質量数が3のトリチウムがあり、自然界にもわずかながら存在する。
4. 軽水素と重水素は放射能を持たないが、トリチウムは弱いベータ線を出して半減期12.3年でヘリウム3になる。
5. トリチウムは原子炉の中でも作られ、燃料内に蓄積されていく。

原子炉内でのトリチウムのでき方

冷却水や制御棒中のホウ素と中性子の反応

冷却水中の重水素と中性子の反応

ウランが2つではなく、3つに核分裂した時の一番小さな塊として生成

—要点—

1. 原子炉内でトリチウムができる主な反応を示している。



—要点—

トリチウムの民生利用：

1. トリチウムを蛍光剤と混ぜると自発発光剤となるので、夜光塗料として塗ったり、ガラス管に封入して光源として使用される。
2. 海外ではよく使われており、写真は民生品でトリチウムを使用した例である。
3. しかし、これらの物の中には国内法では放射性元素として取り扱う必要がある物も稀に含まれ、その場合には販売、廃棄や所持に制限がある。トリチウムを利用したキーホルダーを輸入した業者が摘発された例もある。

〔用語解説〕

ベクレル：放射性物質の量を表す単位

トリチウムを出す弱いベータ線とは

ベータ線の最大エネルギーと水中での最大飛程

トリチウム	: 18 keV	0.0055 mm
ヨウ素131	: 606 keV*	2.1 mm
セシウム137	: 512 keV*	1.7 mm

* 主なベータ線

—要点—

1. ベータ線が出る時には決まったエネルギーで出るわけではなく、様々なエネルギーを持って出て来る。ただし、最大エネルギーは決まっており、ここでは、ベータ線のエネルギーの強さを最大エネルギーで表した。
2. ベータ線はエネルギーによりどこまで飛ぶかが決まる。最大エネルギーを持つベータ線が飛ぶ最大の距離が最大飛程となる。
3. トリチウムのベータ線の最大飛程は0.0055 mm (5.5ミクロン) である。
4. 人体の皮膚の角質は死滅した表皮細胞でできており、その厚さは10~200ミクロンになるため、皮膚表面のトリチウムからのベータ線が角質層を透過することはない。
5. 前述のトリチウムを利用した光源でも、時計のガラスや封入してあるガラス管をベータ線が透過することはない。
6. ただし、プラスチックのケースを使った時計でトリチウム自体が漏れた例は報告されている。漏れても微量なので健康上の問題はなく、ステンレスのケースでは漏れたという報告はない。

〔用語解説〕

keV：キロエレクトロンボルト、放射線のエネルギーを表す単位。

1 ベクレル(Bq)の摂取で、何シーベルトの内部被ばくになるか(ICRP)

ナノシーベルト(nSv、 $1/10^9$ Sv)			
食べたとき		吸い込んだとき	
トリチウム (水)	0.018	トリチウム (水)	0.018
トリチウム (有機物)	0.042	トリチウム (S)	0.26
炭素14	0.58	炭素14 (S)	5.8
ストロンチウム90	28	ストロンチウム90(S)	160
セシウム134	19	セシウム134 (S)	20
セシウム137	13	セシウム137 (S)	39

S : とても溶けにくく肺に留まりやすい化合物

—要点—

1. 表は、ICRPが示した値であり、国内でも同じ値が用いられている。
2. 吸い込んだときの被ばく線量は放射性物質の形態で変わる。トリチウム以外では最も被ばく線量の高い形態を挙げている。形態は以下のように分類。
F : fast、 溶けやすく血流に乗り全身へ移行しやすい形態。
S : slow、 とても溶けにくく肺に留まりやすい形態。
M : medium、 中間の性質を持つ形態。
3. トリチウムは水素の同位体であるので、水(H₂O)の水素と入れ替わり(HTO、Tはトリチウム)、トリチウム水となる。水の形で食べたり、吸い込んだりした時のトリチウムの被ばくが特に少ないのは、水が比較的速く体外に排泄され、体内に留まる時間が短いためである。
4. 有機物の水素と置き換わったトリチウムはトリチウム水よりも体内に長く留まると考えられており、線量が増えている。

〔用語解説〕

シーベルト：放射線の被ばく線量を実効線量として表す単位。

ミリシーベルト(mSv)=シーベルト(Sv)の1/1000

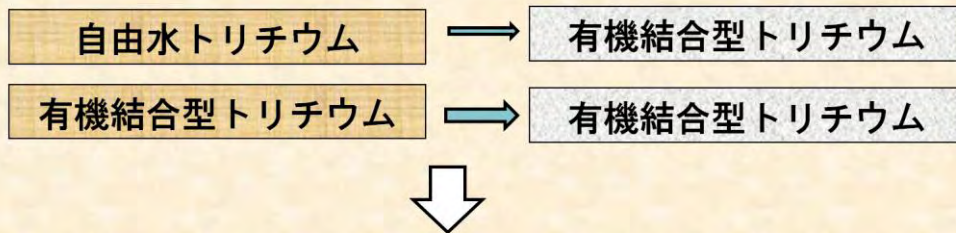
マイクロシーベルト(μ Sv) = ミリシーベルト(mSv)の1/1000

ナノシーベルト(nSv) = マイクロシーベルト(μ Sv)の1/1000

ICRP：国際放射線防護委員会、放射線防護の考え方や基準値を示す委員会。

生物中のトリチウム

- 生物中のトリチウム
 - 〔 水の水素として含まれる :自由水トリチウム
 - 〔 有機物中の水素として含まれる :有機結合型トリチウム
- 一般に有機結合型トリチウムは自由水トリチウムより体内に留まり易い。
- 有機結合型トリチウムを食べると、有機結合型トリチウムに成り易い。



被ばく線量：有機結合型トリチウム > 自由水トリチウム

—要点—

有機物中のトリチウムは水のトリチウムより被ばく線量が増える理由をもう少し詳しく。

1. 生物中のトリチウムは自由水トリチウムと有機結合型トリチウムに分類される。
2. 自由水とは生物中の水分のことで、自由水トリチウムは水分に含まれるトリチウムである。
3. 有機結合型トリチウムは体内のたんぱく質や脂肪と言った有機物に含まれているトリチウムである。有機物は炭素、水素、窒素等から成り、トリチウムは水素と置き換わる。
4. 人体内の水は回転が速く、平均約2週間*で体内から出ていくとされている。これに対して、有機物中の水素が出ていくには平均で約2か月*かかるとされ、水よりも長く留まる。
5. 食べ物の有機結合型トリチウムは、体内の有機結合型トリチウムに成り易い性質を持っている。自由水トリチウムからも有機結合型トリチウムが体内で合成されるが、その量はわずかである。
8. 従って、食べ物中の有機結合型トリチウムによる被ばく線量は、同量のトリチウムを自由水として摂った場合よりも大きくなる。

* ICRP、国際放射線防護委員会

トリチウムによる線量の評価

- 食品中のトリチウムによる被ばく線量の評価
食品中の有機結合型トリチウムの含有量が大事になる。
- 水の中のトリチウムは、農作物の光合成により有機物へと転換される。
- 水にトリチウムが含まれていたときに、どれくらいが農作物の有機結合型トリチウムとなって、収穫時までどれくらい残っているかが重要。
- 今回は、イネについて空気中の水分から米へのトリチウムの移行を調べました。

— 要点 —

1. 食品中のトリチウムを摂取した時の被ばく線量を知るには、食品中の自由水中トリチウム量と有機結合型トリチウム量が必要であり、有機結合型トリチウム量がより重要である。
2. 水の形で環境中に存在しているトリチウムは農作物の光合成によって有機結合型トリチウムになる。
3. 水にトリチウムが含まれていたとき、例えば空気中の水分にトリチウムが含まれていた時に、どれくらいが農作物の有機結合型トリチウムとなって、収穫時までどれくらい残っているかが大事である。

今回は、イネについて調査を行い、空気中の水分から米のトリチウムへの移行を調べた結果について、次の講演で紹介する。

トリチウムのイネへの移行

— 空气中トリチウム濃度の変化に応じた予測 —

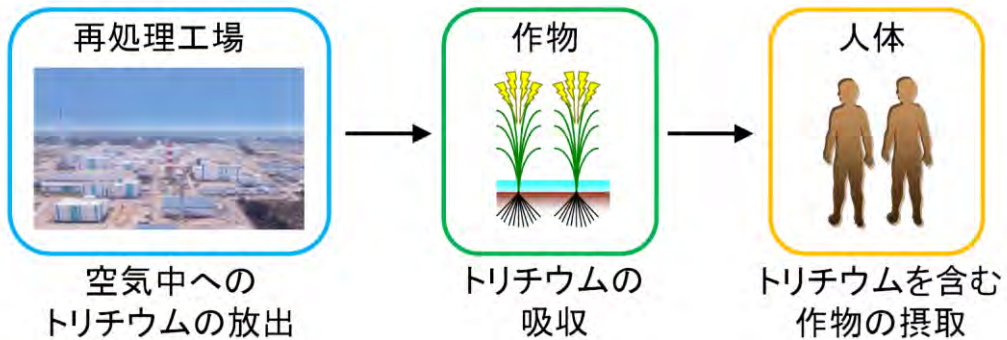


(公財) 環境科学技術研究所

環境影響研究部

谷 享

作物を介したトリチウムの動き



研究の目的:

空気中のトリチウム濃度がイネの生育時期によって変化

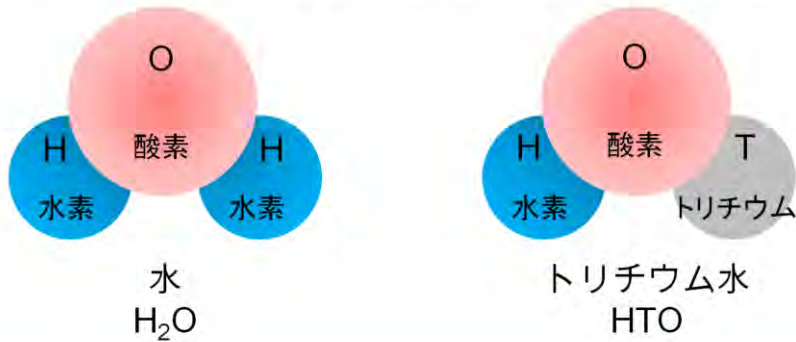


どの時期にトリチウムを吸収しても、収穫される米のトリチウム濃度が計算できるモデルの作成

—要点—

1. 再処理工場から空気中に放出されるトリチウムの一部は、作物によって吸収される。
2. トリチウムが作物体内に取り込まれると、作物からの収穫物を介して人体にトリチウムが移行する。
3. このようなことから、主要作物であるイネ中のトリチウム濃度を推定するモデルの作成を目的とした。
4. モデルにより、イネの生育中に空気中のトリチウム濃度が変わっても、収穫される米のトリチウム濃度が計算できるようになった。

作物が吸収するトリチウム



空気中に放出されたトリチウムは
主に水分子の中に存在(トリチウム水)



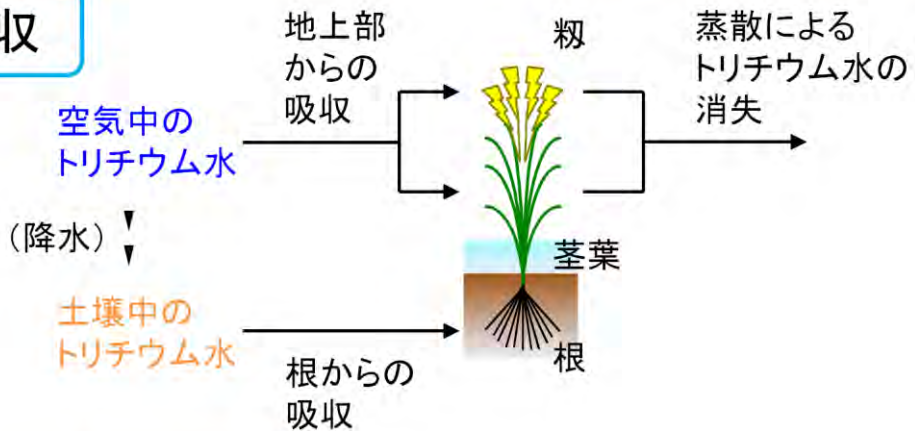
水として作物に吸収されるトリチウムの動きに注目

—要点—

1. 再処理工場から空気中に放出されるトリチウムの多くは、水分子 (H_2O) の水素の少なくとも1つがトリチウムに置き換わったトリチウム水 (HTO) として存在する。
2. トリチウムは水素の同位体であり、トリチウム水は化学的には水であるため、水として作物に吸収される。
3. したがって、作物中のトリチウム濃度を推定するモデルを作るためには、水として作物が吸収したトリチウムの動きに注目する必要がある。

作物におけるトリチウムの動き

吸収



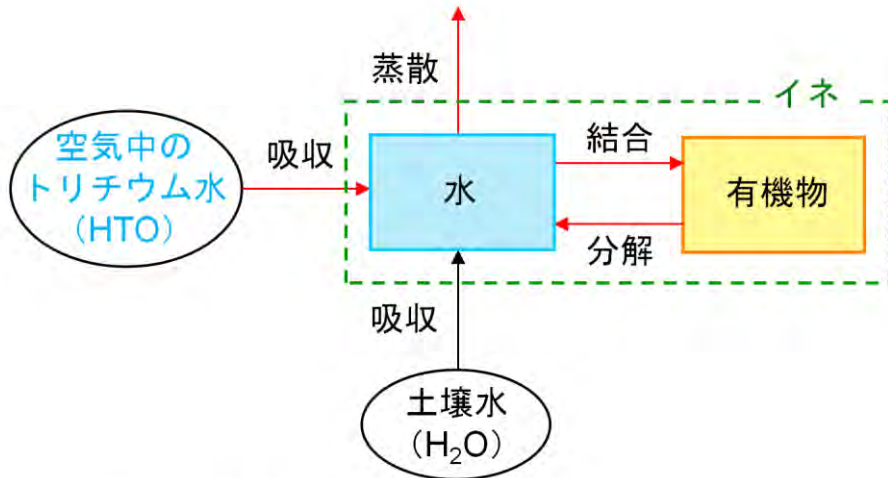
有機物との結合

主に光合成によって有機物に結合し作物体内に残る

—要点—

1. トリチウムの動きは、作物に吸収される過程と、吸収後に作物体内で有機物に結合する過程に分かれる。
2. 吸収の過程では、空気中のトリチウムの一部が降水によって土壌に入ることから、作物の地上部と根の両方からトリチウムが入る。
3. 作物体内に吸収されたトリチウムの多くは地上部から蒸散作用によって体外に出ていき、一部が主に光合成によって有機物に結合する。
4. 有機物に結合したトリチウムは、呼吸などによって分解されてトリチウム水に戻るが、有機物に結合したまま収穫まで作物体内に残るものもある。

トリチウムの動きのモデル化

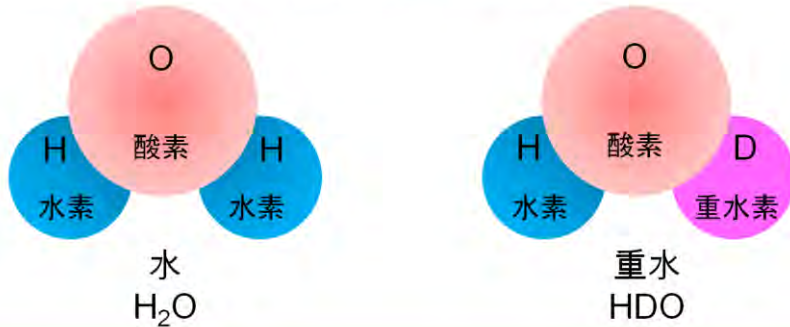


- ・ イネを水と有機物に分ける
- ・ 移行速度(赤矢印)を実験により求める

—要点—

1. 作物体内でのトリチウムの動きは、水としての動きと有機物としての動きに区別できることから、モデルではイネを水と有機物に分けて考える。
2. 水田では多量の水によって土壌のトリチウムの濃度が薄まるため、イネのモデルでは空気中からトリチウム水 (HTO) を吸収する場合を考えれば良い。
3. モデルの図に赤矢印で示した経路のトリチウム移行速度を求めることができれば、空気中のトリチウム水を吸収した時に、水と有機物にトリチウムがどれだけ入り、どれだけ蓄積するかが分かる。

トリチウムの移行速度を求める実験



トリチウムの代わりに重水素を重水としてイネに吸収させる



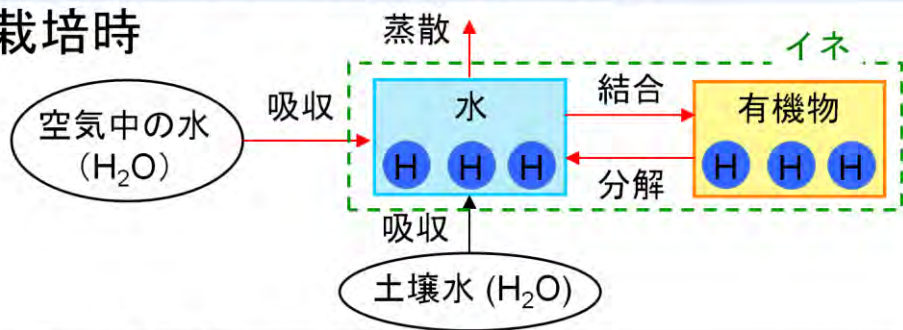
イネ体内の重水素濃度の変化から
水および有機物としての重水素の移行速度を求める

—要点—

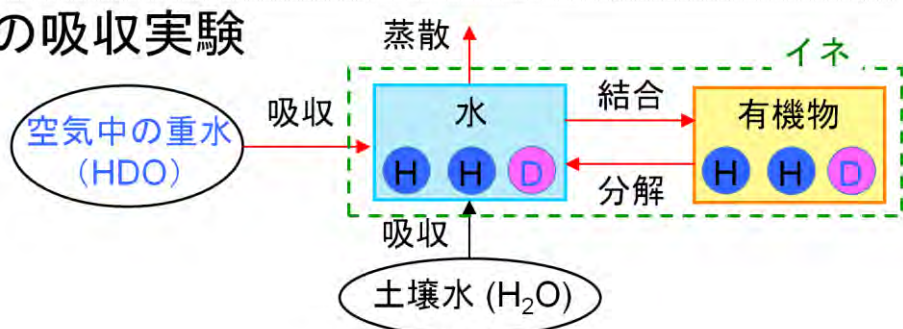
1. モデル作成に必要なトリチウムの移行速度を求めるために、トリチウムの代わりに放射線を出さない重水素 (D) を、重水 (HDO) としてイネに吸収させる実験を行った。
2. 重水素は水素 (H) の同位体であり、天然での存在比は水素 (99.98% 以上) に比べてごくわずか (0.015%) である。トリチウムと同様に、重水素の化学的な挙動は水素と同じである。
3. 空気中から重水を吸収したイネ体内の重水素濃度の高まり方を調べることで、水および有機物としての重水素の移行速度を求めた。

重水の吸収実験：概要

通常栽培時



重水の吸収実験



—要点—

1. イネに重水を吸収させる実験の概要を説明する。
2. 通常の栽培では、イネが空気と土壌から水 (H₂O) を吸収するため、水および有機物には水素 (H) が含まれる。
3. 重水の吸収実験では、水素 (H) を含んだイネに空気中の重水 (HDO) を吸収させる。すると、水および有機物の重水素濃度が高くなる。
4. 水と有機物の重水素濃度は、赤矢印の経路での重水素の移行速度によって決まる。
5. そこで、重水の吸収実験ではイネ体内の水および有機物の重水素濃度を測定することで、モデル作成に必要な重水素の移行速度を求めた。

重水の吸収実験：水としての移行



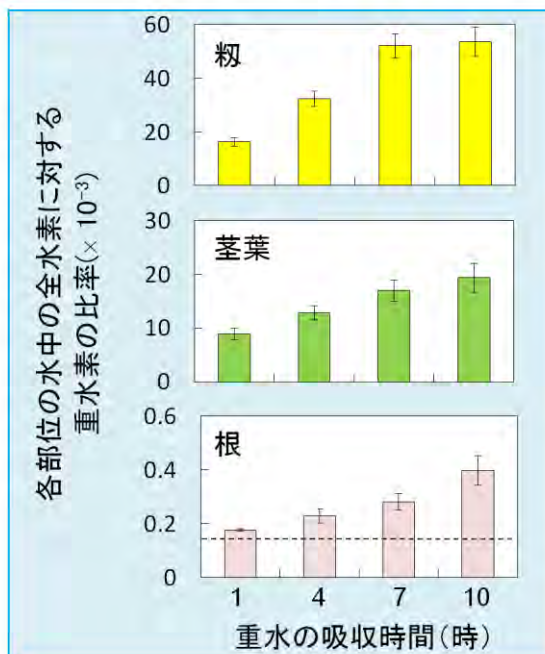
出穂後の開花日に
重水の吸収実験



各部位の水中の
重水素濃度を測定



水としての重水素の
移行速度を決定



—要点—

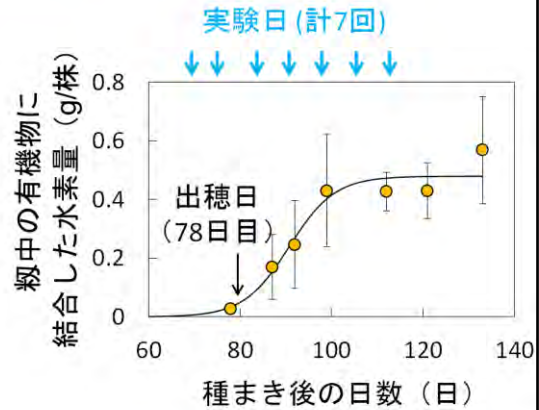
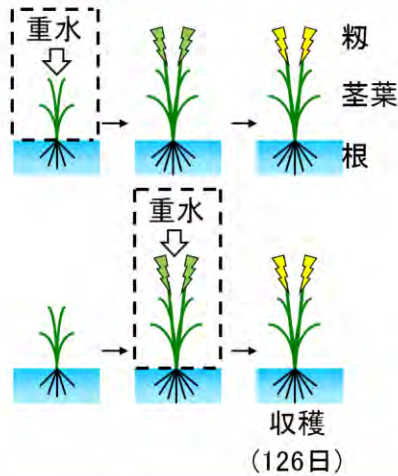
1. 籾、茎葉、根について、水としての重水素の移行速度を求めるために、イネの地上部（籾、茎葉）から重水を吸収させた。
2. 重水の吸収実験は、穂が完全に出た開花日のイネを対象として行った。
3. 籾、茎葉、根に含まれる水の中の重水素濃度の時間変化を調べた。
4. 籾と茎葉では、吸収時間が長くなるほど水に含まれる重水素の濃度が上昇した。
5. 根の水に含まれる重水素の濃度は点線で示した天然レベルの濃度に近く、籾及び茎葉が空気から吸収した重水は、ほんのわずかしが根に行かないことが分かった。

〔用語解説〕

出穂：茎の先端から穂が出ること。

重水の吸収実験：有機物としての移行

生育時期別の重水吸収実験



収穫日 (126日) の有機物中の重水素濃度を測定

—要点—

1. 籾、茎葉、根について、有機物としての重水素の移行速度を求めるために、生育時期別にイネの地上部（籾、茎葉）から重水を吸収させた。
2. 出穂直前から籾が成熟し始めるまでの期間で、生育時期ごとに計7回、それぞれ別々のイネに重水を吸収させた。
3. 重水を吸収させたイネは、収穫日まで天然レベルの重水素濃度条件で栽培し、収穫日の各部位に有機物として残存している重水素濃度を測定した。

実験結果：有機物としての移行

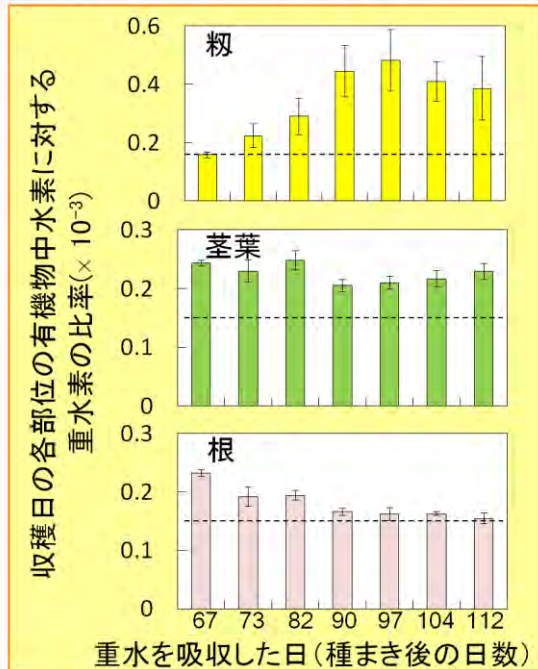
生育時期別の重水吸収実験



収穫日(126日)の各部位に
有機物として残った重水素の
濃度を測定



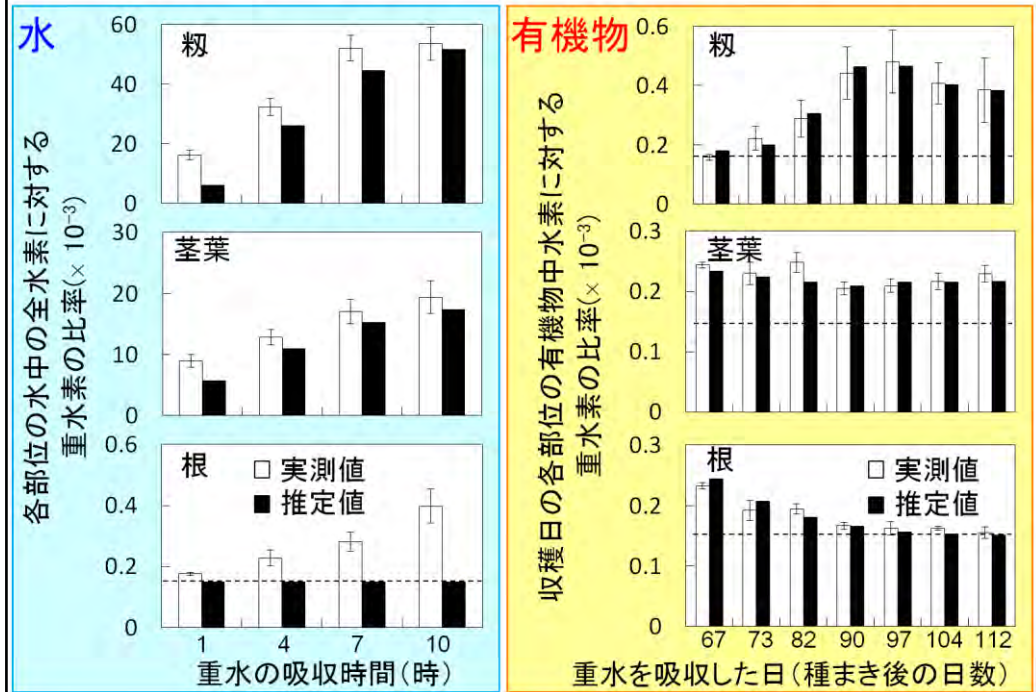
有機物としての重水素の
移行速度を決定



—要点—

1. 生育時期別に重水を吸収させたイネの、収穫日(126日)の籾、茎葉、根に残った有機物に含まれる重水素を測定した。
2. 籾では、生長によって重量が大きく増加する時期(播種後90、97日)に重水を吸収した場合に、収穫日の有機物に含まれる重水素の濃度が高くなった。
3. このような測定結果に基づき、モデル作成に必要な有機物としての重水素の移行速度を決定した。

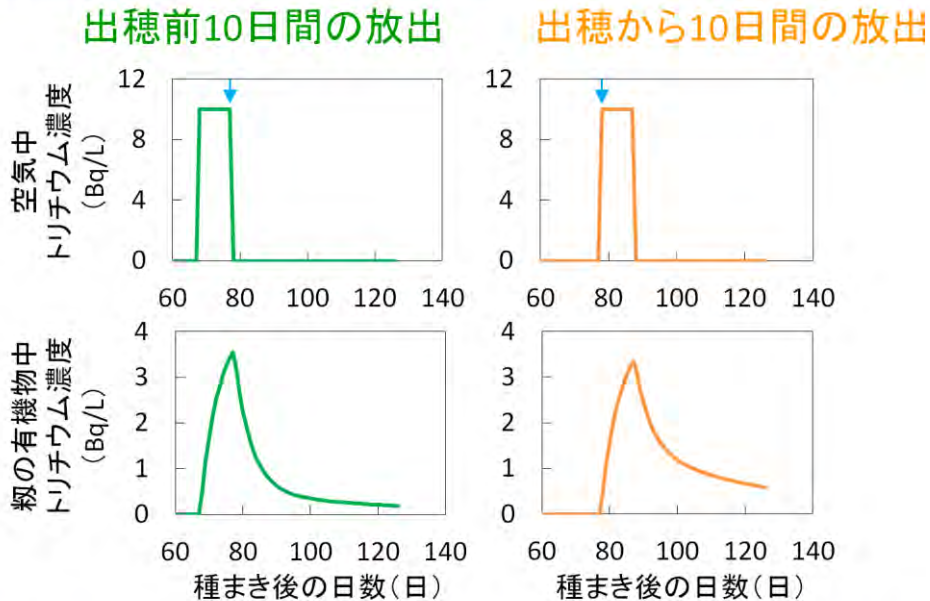
イネ中の重水素濃度のモデル推定結果



—要点—

1. 水および有機物中の重水素濃度の実測値 (□) から、イネの水および有機物としての重水素の移行速度を求めることでモデルを作成した。
2. 作成したモデルにより、籾、茎葉、根の水および有機物中の重水素濃度を推定した結果、モデル推定値 (■) は実測値 (□) と概ね一致した。
3. 根の水の重水素濃度は合っていないように見えるが、これは実測の濃度がとても低かったことから、モデルでは根に重水が行かないとして計算したためである。

空気中へのトリチウム放出時期の影響



放出時期によって収穫日の籾中トリチウム濃度が変わる

—要点—

1. 作成したモデルを用いて、空気中へのトリチウムの放出時期の違いによって、籾の有機物中トリチウム濃度がどのように変わるかを計算した。
2. 10日間だけ空気中トリチウム濃度が10 Bq/Lに上昇するとし、出穂日（種まき後78日目、青矢印）より前の10日間（左図）に上昇した場合と、出穂から10日間（右図）上昇した場合を比較した。他の日は0 Bq/Lとした。
3. 両方とも籾の有機物中トリチウム濃度はほぼ同じ濃度まで上昇するが、収穫時までには低くなる。
4. 収穫日（種まき後126日目）の籾の有機物中トリチウム濃度は、出穂後に空気中トリチウム濃度が上昇する場合に（右図）約3倍高くなった。
5. 作成したモデルにより、空気中トリチウム濃度が高くなる時期の違いによって、収穫日の籾の有機物に残るトリチウムの濃度が変わることが分かった。

〔用語解説〕

ベクレル (Bq) : 放射性物質（ここではトリチウム）の原子核のうち、1秒間に放射線を出して安定な原子核に変わるものの数。

トリチウム濃度 (Bq/L) : 空気中の水蒸気または籾の有機物中の水素の量

を液体の水の量（リットル）として表したときに、その中に含まれるトリチウム原子の数をベクレルの単位で示した値。

まとめ

- ・ 重水吸収実験のデータに基づき、イネのトリチウム移行モデルを作成した。
- ・ 作成したモデルにより、空气中トリチウム濃度の変化に応じたイネ体内のトリチウム濃度の予測が可能になった。

[研究の背景]

- ◆ 環境科学技術研究所における
低線量率放射線生物影響研究
について

環境科学技術研究所
生物影響研究部
小村潤一郎

低線量率ガンマ線連続照射室とマウス飼育ケージ



—要点—

1. 環境科学技術研究所では、主にマウスを用いて、低線量率放射線の生体への影響を調べている。
2. この写真は、マウスに低線量率放射線を長期にわたり照射するための部屋の様子である。
3. 線源からの距離が同じになるようにマウスのケージが置かれているので、各マウスが受ける放射線の線量率は同じになる。

環境研の実験で主に使用している低線量率と総線量

線量率 (mGy/22時間/日)	400日間連続照射 した時の総線量 (mGy)	総線量のレベル
0.05 (約 2.3 μGy/時間)	20	自然放射線による年間被ばく線量の約10倍、あるいは職業人の年平均線量限度に相当
1 (約 45 μGy/時間)	400	原爆被ばく者の平均被ばく線量(急照射)、あるいは宇宙ステーションでの年間被ばく線量に相当
20 (約 909 μGy/時間)	8000	発がん等の影響が確実に現れると予測される線量

—要点—

1. 環境科学技術研究所のマウス実験で使用している主な線量率である。
2. 前ページのようなタイプの照射室が全部で5室あり、そこではこのような線量率でのマウス長期照射/飼育実験を行っている。
3. 1日あたり22時間照射を行ない、残りの2時間、線源を格納して動物の世話を行っている。

〔用語解説〕

Gy：グレイ（生物等に吸収された放射線のエネルギー）

mGy：ミリグレイ（グレイの1/1000）

μGy：マイクログレイ（グレイの100万分の1、ミリグレイの1/1000）

寿命試験(最初の大規模実験、1995~2002)

マウスに8週齢から400日間照射

・非照射群 (オス、メス500匹ずつ)



死ぬまで飼育

・照射群 (オス、メス500匹ずつを400日間連続照射)

低線量率
ガンマ線



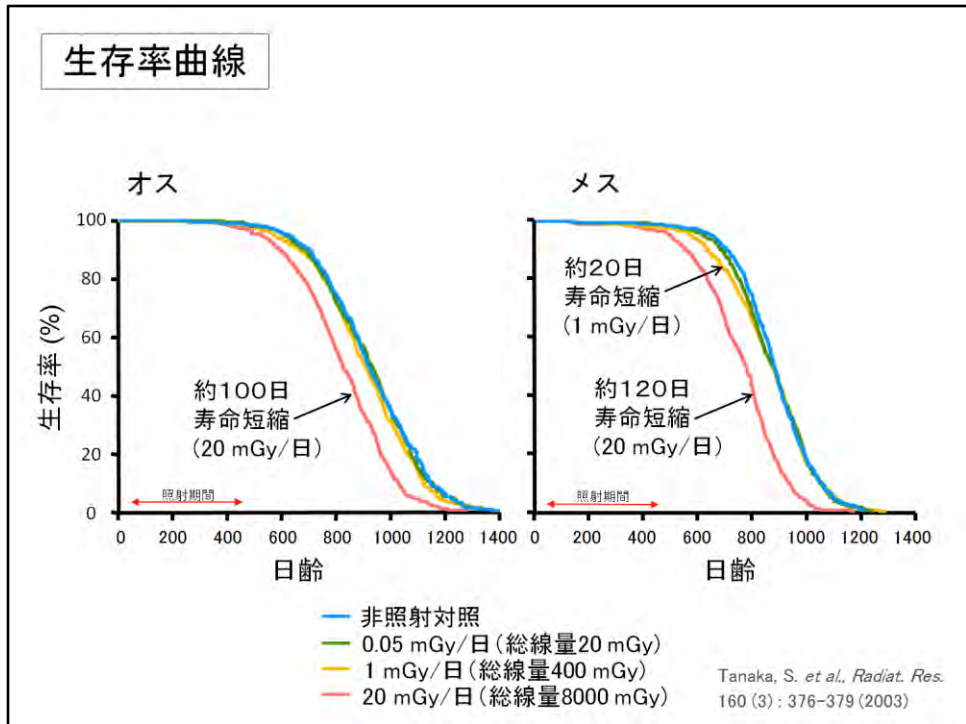
$0.05 \text{ mGy/日} \times 400 \text{ 日} = 20 \text{ mGy}$
 $1 \text{ mGy/日} \times 400 \text{ 日} = 400 \text{ mGy}$
 $20 \text{ mGy/日} \times 400 \text{ 日} = 8000 \text{ mGy}$

400日間の照射後 死ぬまで飼育

非照射群と比べて①寿命は短くなるか? ②死因は?

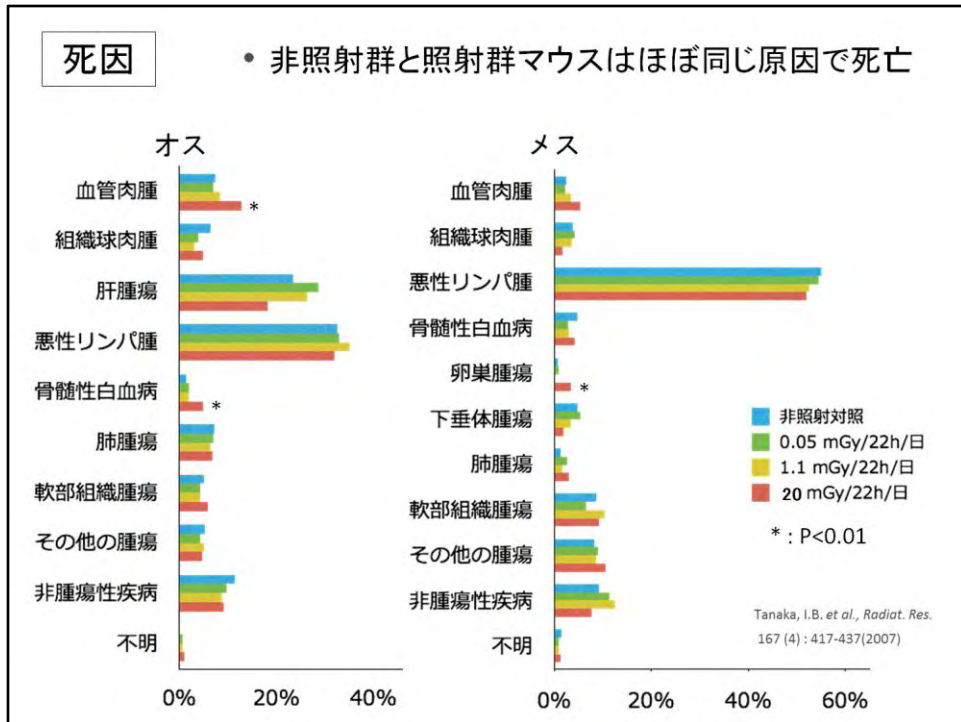
—要点—

1. 生体への影響に関して、環境科学技術研究所で最初に行われた大規模実験を紹介する(寿命試験)。
2. おとなに達して間もない8週齢から400日間、低線量率放射線を照射されたマウス(B6C3F1という系統のものを使用)では、非照射対照群に比べて、寿命が短くなるか否かを調査した。また、その死因についても調査をした。



— 要点 —

1. 20ミリグレイ/日 (mGy/日) × 400日で照射した群では、オス・メスともに明らかな寿命短縮がみられた。
2. 1 mGy/日 × 400日で照射した群では、メスのみに有意な寿命短縮がみられた。
3. 1 mGy/日 × 400日で照射したオスと0.05 mGy/日 × 400日で照射したオス・メスでは、統計的に有意な寿命短縮は認められなかった。

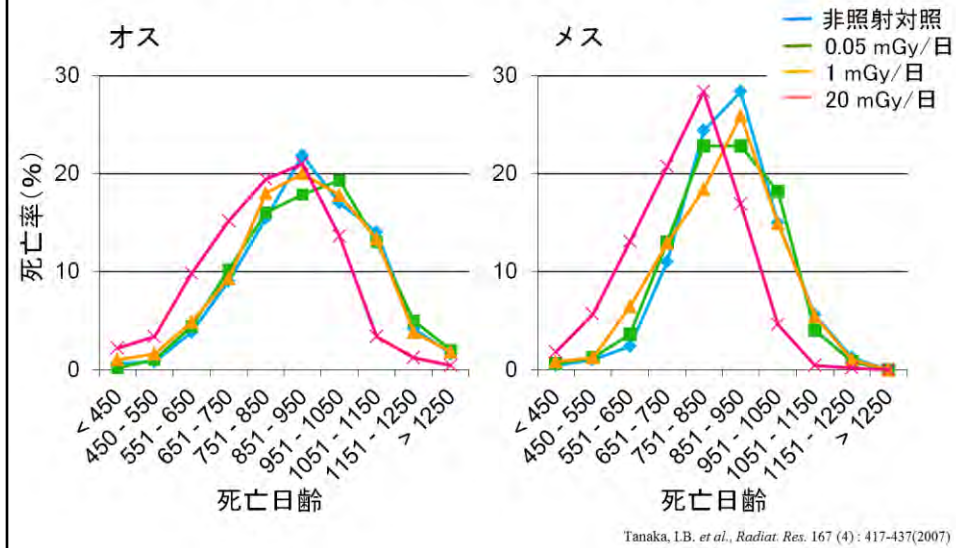


—要点—

1. 死因となったがんの種類については、照射群と非照射群の間で顕著な差は見られなかった。

腫瘍により死亡したマウスの死亡日齢分布

- 20 mGy/日照射群マウスは、腫瘍が原因でより早く死亡



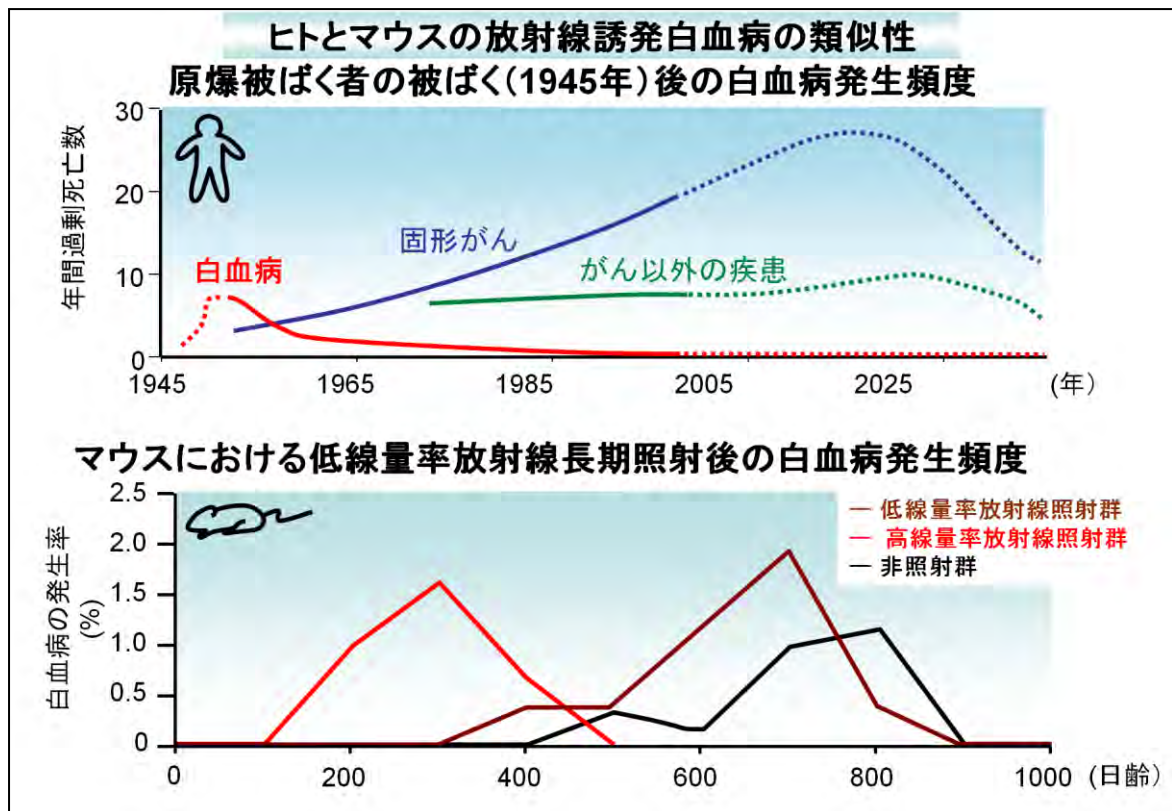
—要点—

1. 20ミリグレイ/日 (mGy/日) × 400日で照射したマウスは、腫瘍が原因でより早くに死亡していることがわかった。
2. 低線量率放射線による寿命短縮の主な原因が腫瘍であることが明らかになったことから、環境科学技術研究所では、低線量率放射線による腫瘍発生の機構の解明を目指している。
3. その際の研究対象のひとつに造血細胞がある。造血細胞は分化・増殖して血液中のさまざまな細胞となるが、この仕組みに異常をきたしたことにより発生する疾病の中で重要なものに白血病などの造血器腫瘍がある。被ばく者の調査等により放射線が白血病を誘発しうることはよく知られていることから、環境科学技術研究所では、低線量率放射線が造血細胞の分化・増殖等に与える影響について、高線量率放射線の場合と対比しつつ研究を進めている。

放射線の生物影響

～マウス造血細胞への低線量率放射線の影響～

(公財) 環境科学技術研究所
生物影響研究部
廣内 篤久



—要点—

1. 原爆被ばく者集団でのがん発生の特徴

- 原爆被ばく者（約5万人）を対象とした調査では、がんの発生率が高いことと、特定の臓器にがんが発生することが知られている。白血病は骨髄から発生するがんであり、他のがんに比べてとても早く発生している。
- 白内障、心臓病、甲状腺の良性腫瘍、脳卒中等のがん以外の疾患も原爆被ばく者で増加した。

2. マウスでのがん発生の特徴

- 原爆被ばく者と同じく、マウスに高線量率の放射線を大量に照射すると白血病が発生する。
- 一日当たり20mGyの低線量率の放射線を400日間照射し続けて大量の放射線を被ばくしたマウスでは、寿命が短くなって白血病が発生することが分った。

〔用語解説〕

年間過剰死亡数: 被ばく集団における1年間のがん等による死亡数が、放射線に被ばくしていない集団における1年間のがん等による死亡数と比べてどれだけ過剰かを示す。

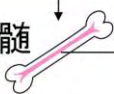
高線量率放射線照射マウスに発生した白血病の特徴

高線量率放射線誘発白血病マウス



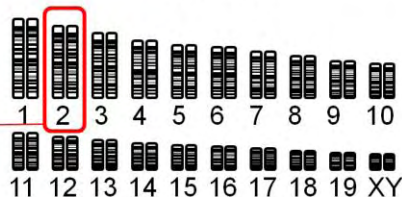
- 赤血球数の減少(貧血)
- 白血球数の異常増加
- 脾臓の腫れ
- 骨髄が白っぽくなる

骨髄

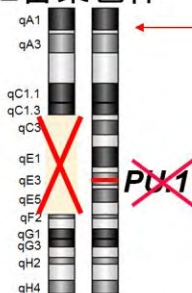


白血病細胞

染色体



2番染色体



高線量率放射線誘発白血病マウスの白血病細胞の特徴

- ① 片側の染色体の一部が失われている(欠失変異)。
- ② 白血病に関連する遺伝子(左図中の*PU.1*遺伝子)が変異を起こしている。

—要点—

1. 白血病の症状

- 血液中の赤血球数の減少(貧血)、白血球数の増加
- 脾臓*1の腫れ
- 骨髄*2が白っぽくなる

2. 高線量率放射線で発生したマウスの白血病細胞の染色体*3上の特徴

- 2本ある2番染色体のうち的一本が大きく欠けている(欠失変異*4)。
- 欠失変異が無い方の2番染色体の白血病関連遺伝子(*PU.1*遺伝子*5)に小さな変異が生じている。

〔用語解説〕

- *1脾臓(ひそう)：胃の近傍にある臓器で、免疫細胞の成熟、古い赤血球の破壊、血液の貯蔵を行っている。赤血球や白血球などの血球細胞を生産する機能も持っており、マウスでは常時血球細胞を作っているが、ヒトでは出血や貧血等の緊急時にのみ生産する。
- *2骨髄：骨の髄腔内において赤血球や白血球等の血球細胞を作る組織(造血組織)。
- *3染色体：遺伝情報を担う生体物質。ヒトの1細胞あたりの染色体は22対の常染色体と1対の性染色体の計46本から構成され、マウスでは19対の常染色体と1対の性染色体の計40本から構成されている。
- *4欠失変異：染色体の構造異常の一つであり、染色体の一部や全体が欠けている状態。逆に染色体の一部、もしくは全体がコピーされて増えている異常を増幅変異と言う。
- *5 *PU.1*遺伝子：(ぴーゆーわんいでんし) 白血病の発生に関連する遺伝子の一つ。*PU.1*遺伝子の変異すると血球細胞が正常に作られなくなり、白血病細胞の元になる異常な血球細胞が増える。

研究目的

『低い線量率の放射線によって誘発される白血病と高い線量率の放射線によって誘発される白血病の発症の仕方は異なるのか?』を明らかにする。

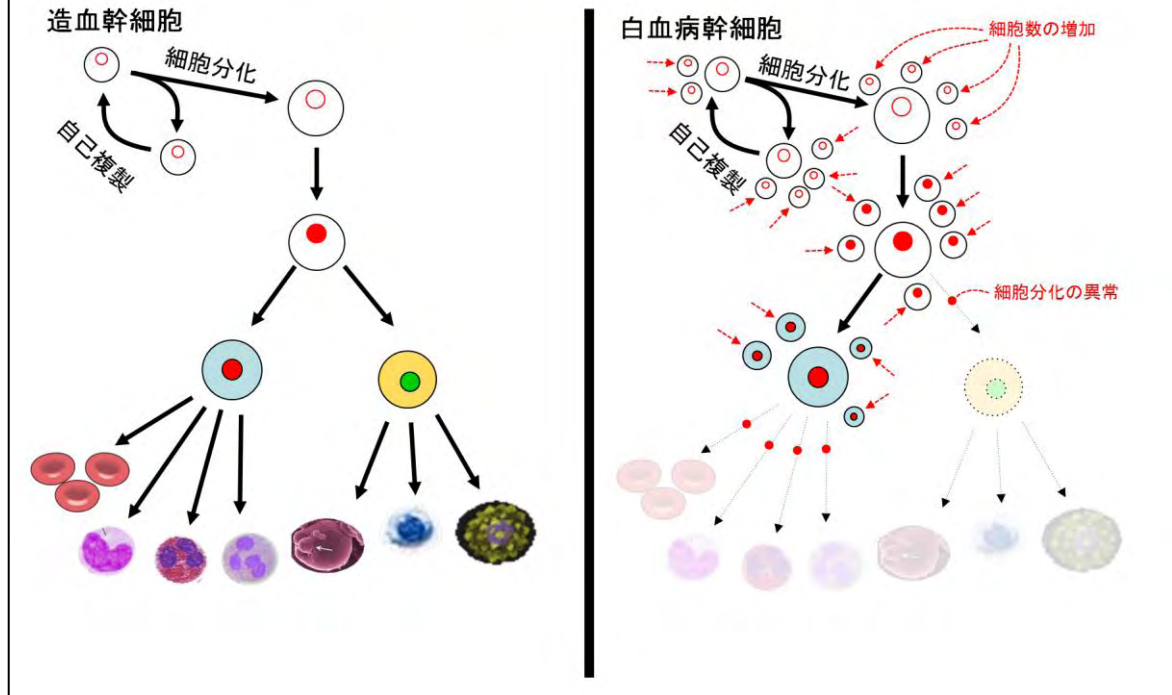
解析内容

- ① 染色体異常の解析
- ② 白血病細胞の元になる“白血病幹細胞”についての解析
- ③ 放射線が健康な造血幹細胞に与える影響についての調査

〔用語解説〕

造血幹細胞・白血病幹細胞：正常な血球細胞は造血幹細胞という細胞から作られるが、白血病細胞は白血病幹細胞から作られる。白血病幹細胞は造血幹細胞とよく似た性質を持っている（次ページを参照）。

造血幹細胞と白血病幹細胞



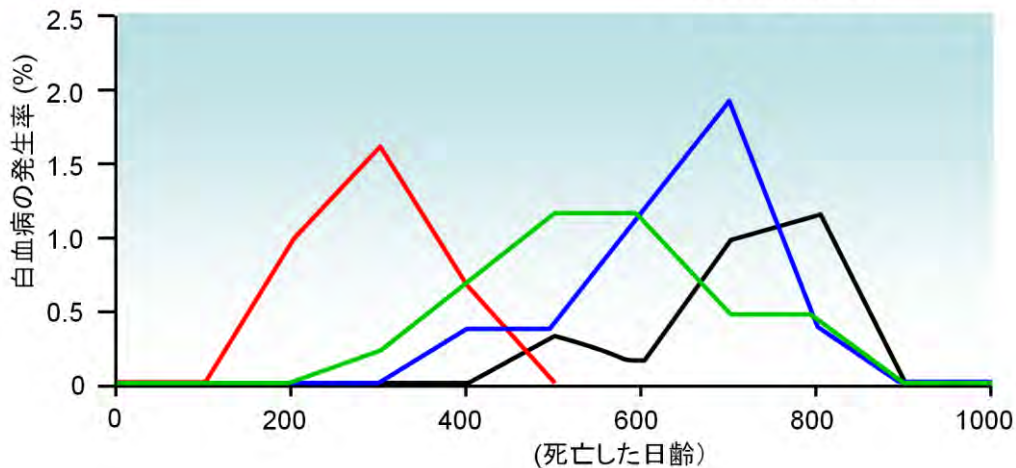
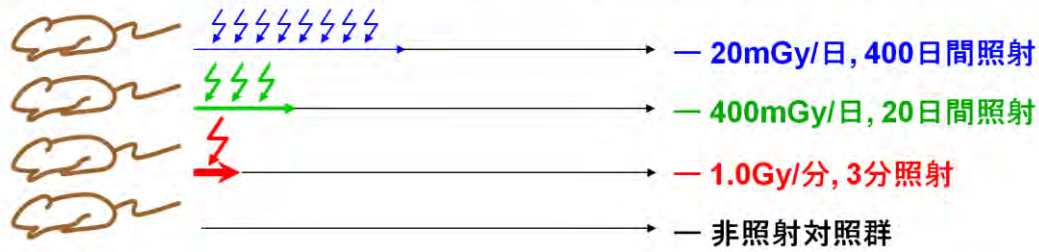
—要点—

1. 正常な血球細胞は造血幹細胞から作られる。
2. 造血幹細胞は細胞分裂をした後に、①分裂する前と同じ性質を持つ細胞と、②赤血球や白血球などの様々な血球細胞を生み出すための細胞になる。①の細胞を生む能力を「自己複製能」といい、②の細胞を経ていろいろな細胞になる能力を「多分化能」と言う。
3. 白血病幹細胞は「自己複製能」と「多分化能」を持っている。
4. ただし、多くの白血病の症例の白血病幹細胞は、「自己複製能」が強く、「多分化能」は不完全である場合が多く、未成熟な血球細胞に類似した細胞を大量に生産する。

〔参考〕

ノーベル賞で有名になったiPS細胞は、日本語で人工多能性幹細胞、英語でinduced Pluripotent Stem cellと言いますが、これは本来自己複製能も多分化能も持っていない皮膚などの細胞に人工的な遺伝子操作を施すことによって、自己複製能と多分化能を持つように誘導して (induced)、多能性の (Pluripotent) 幹細胞 (Stem cell) に変化させたものです。

照射するガンマ線の線量率による白血病発症の仕方の違い



—要点—

- 3段階の線量率の放射線（下記参照）を生後8週齢のC3H系統のマウス*に大量に照射して、その後は放射線を照射しないで飼育して、それぞれの白血病の発症の仕方を観察した。

低線量率放射線：20 mGy/22時間/日、400日間。（総線量：8 Gy）（高線量）

中線量率放射線：400 mGy/22時間/日、10日間。（総線量：4 Gy）（高線量）

高線量率放射線：1.0 Gy/分、3分間。（総線量：3 Gy）（高線量）

- その結果、以下のようなことが分かった。

- 線量率が高いほど、発症時期が早い。
- 一生を通しての発症率には差がない。



〔用語解説〕

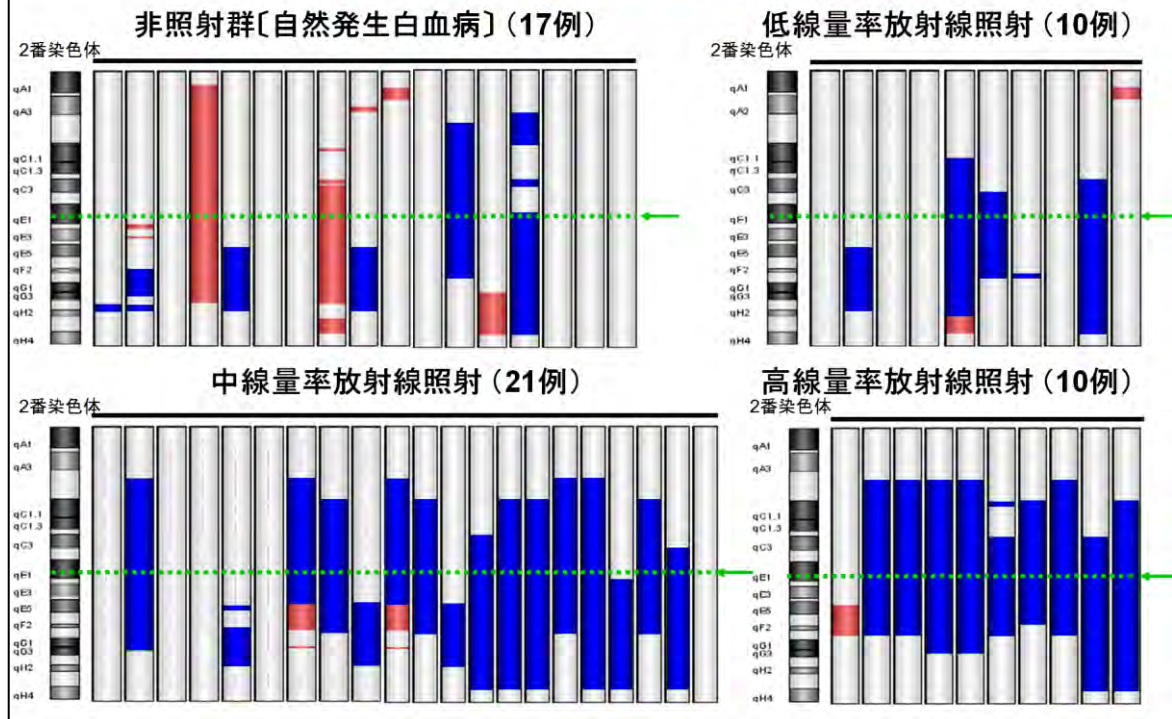
* C3Hマウス：野生型のハツカネズミと同じ体毛色を持つ実験用マウスの系統。
高線量率の放射線を照射すると、照射後1年程度で急性骨髄性白血病を高い頻度で発症することが知られている。

Gy：グレイ（生物等に吸収された放射線のエネルギーの単位）

mGy：ミリグレイ（グレイの1/1000）

2番染色体に起きた染色体異常の違い

赤: 増幅領域 青: 欠失領域 緑: *PU.1*遺伝子のある部分



—要点—

白血病細胞の2番染色体の異常

低・中・高の線量率放射線照射マウス群と非照射マウス群の白血病細胞の2番染色体の染色体異常を比較すると（赤い部分は増幅変異*のあった領域、青い部分は欠失変異*のあった領域）、線量率が高くなる程、*PU.1*遺伝子周辺（緑の破線の位置）の欠失の頻度が高くなっていった（下表参照）。

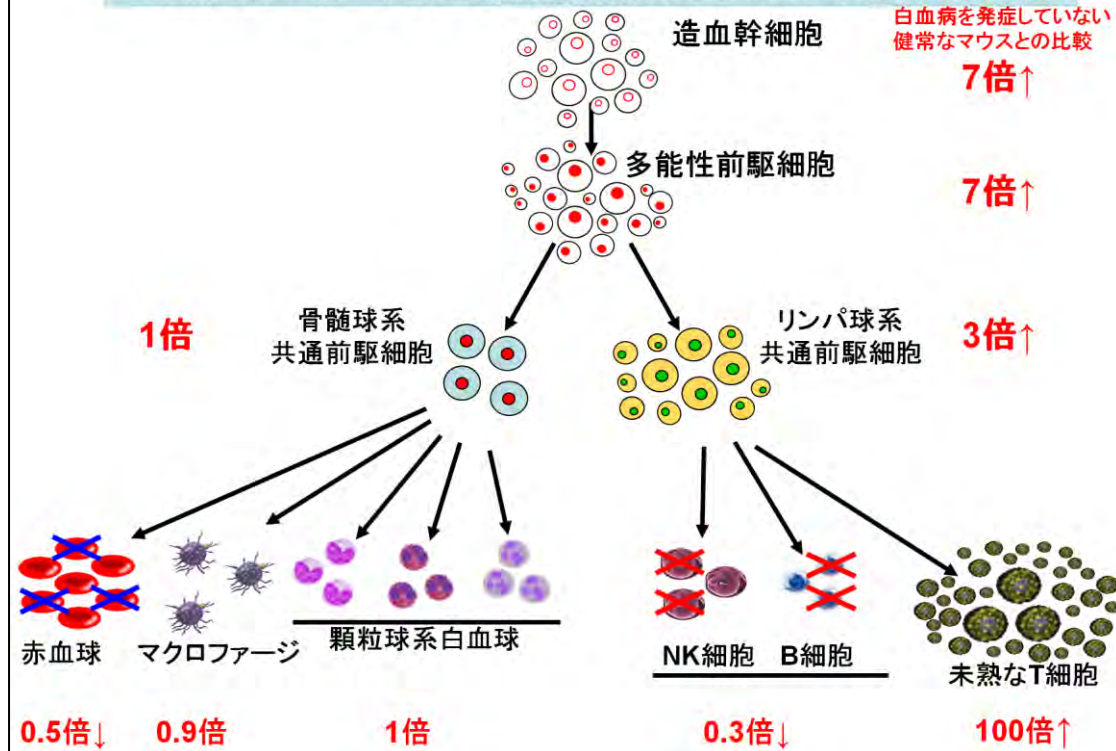
実験群名	白血病の例数	<i>PU.1</i> 周辺の欠失 (%)
非照射	17例	2例 (12%)
低線量率・高線量放射線照射群	10例	3例 (30%)
中線量率・高線量放射線照射群	21例	12例 (57%)
高線量率・高線量放射線照射群	10例	9例 (90%)

〔用語解説〕

2番染色体：（45ページを参照）

*増幅変異・欠失変異：染色体の構造異常の一つであり、染色体の一部、もしくは全体がコピーされて増えている異常を増幅変異、染色体の一部や全体が欠けている状態を欠失変異と言う。それぞれの異常領域に含まれる遺伝子の機能が過剰に促進されたり、機能不全になる。

自然発生と低・中線量率放射線誘発白血病に共通する特徴

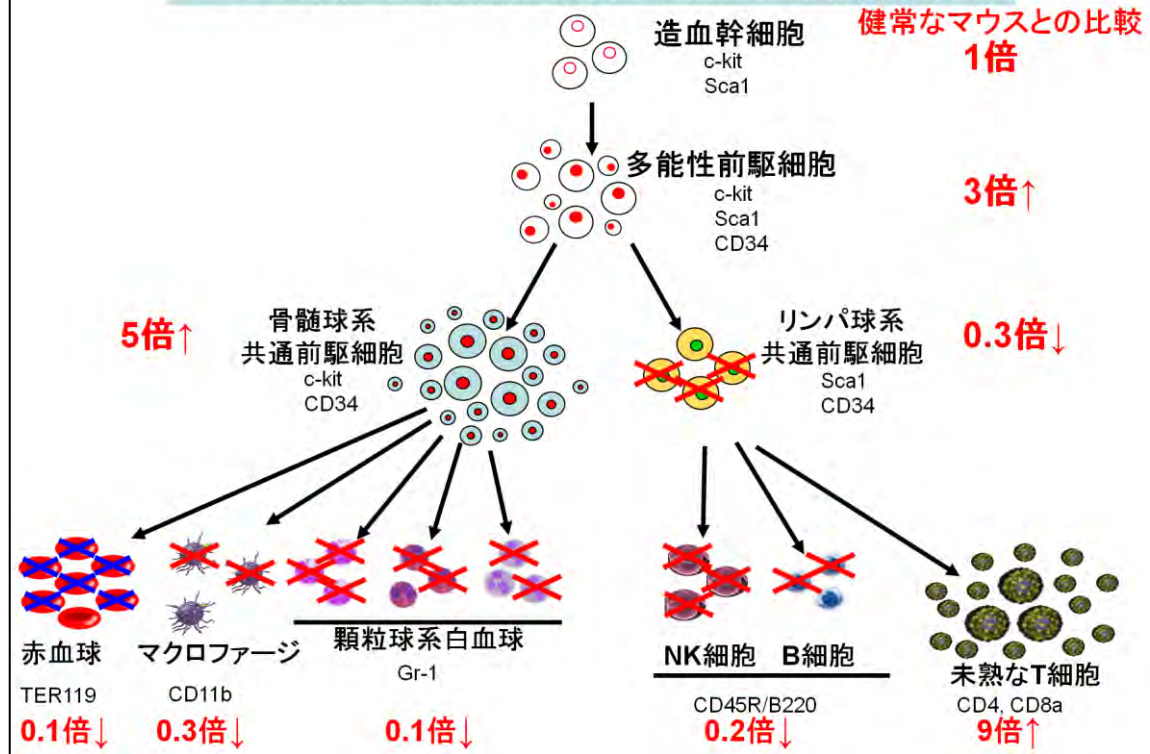


—要点—

1. 正常な血球細胞は造血幹細胞から生産され、造血幹細胞は血球細胞になるまでに少しずつ分裂して数を増やしながらか、段階的に形状を変化させると同時に、様々な機能を獲得していく（細胞分化）。これによって、少数の造血幹細胞から大量の成熟した血球細胞が生産される。
2. 2番染色体に欠失変異を持たないタイプの白血病（自然発生・低線量率タイプ）のマウスでは、健全マウスと比較して以下のような結果が得られた。

- 造血幹細胞、多能性共通前駆細胞、リンパ球系共通前駆細胞、T細胞が増加
- 赤血球、NK細胞・B細胞は減少

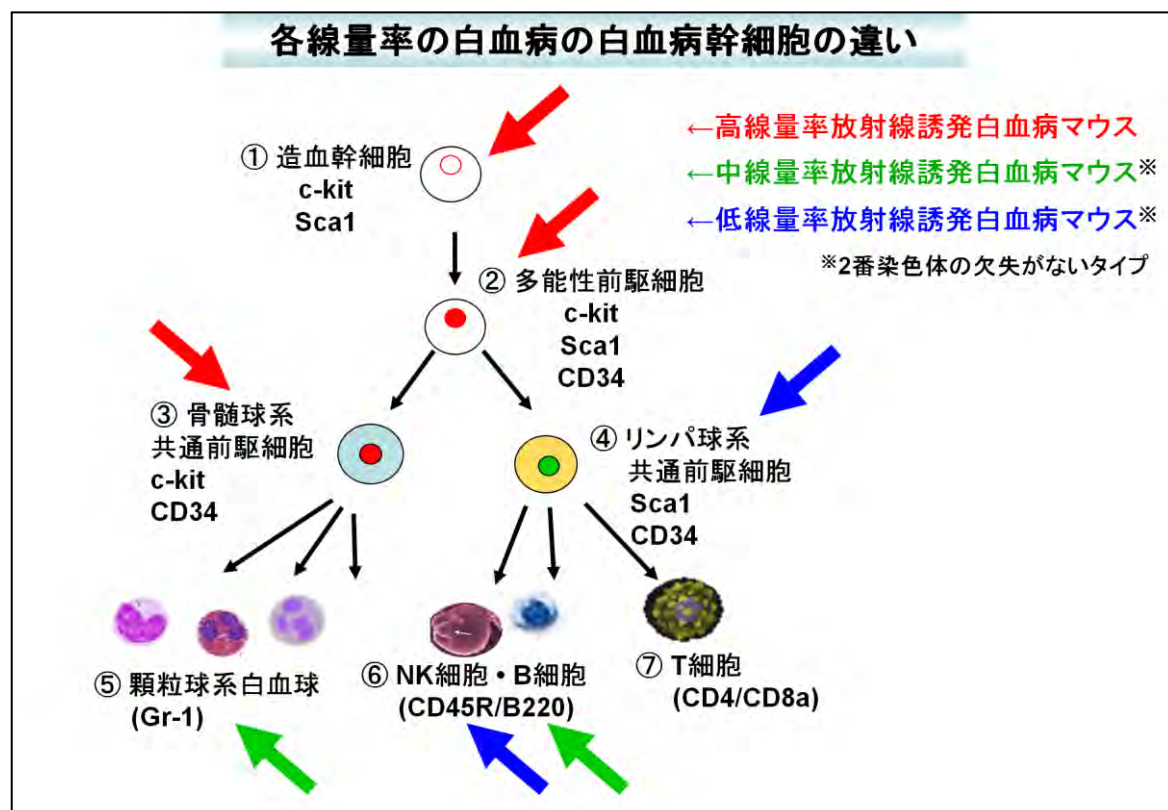
中・高線量率放射線誘発白血病に共通する特徴



—要点—

- 2番染色体に欠失変異を持つタイプの白血病（高線量率タイプ）のマウスでは、健常マウスと比較して、以下のような結果となった。
 - 多能性共通前駆細胞、骨髄球系共通前駆細胞、T細胞が増加
 - リンパ球系共通前駆細胞、赤血球、マクロファージ、白血球、NK細胞・B細胞が減少
- 自然発生・低線量率タイプ（前ページの2番染色体に欠失変異を持たない白血病）とは対照的な結果となった。

各線量率の白血病の白血病幹細胞の違い



—要点—

白血病幹細胞がもともとはどんな造血細胞であったかを予測する手がかりを得るために、低・中・高の線量率放射線照射マウス群と非照射マウス群のそれぞれの白血病幹細胞の分化段階を調べた。

高線量率放射線照射マウス白血病

細胞分化段階	白血病発症数
造血幹細胞	2例
多能性前駆細胞	1例
骨髄球系共通前駆細胞	3例

中線量率放射線照射マウス白血病*

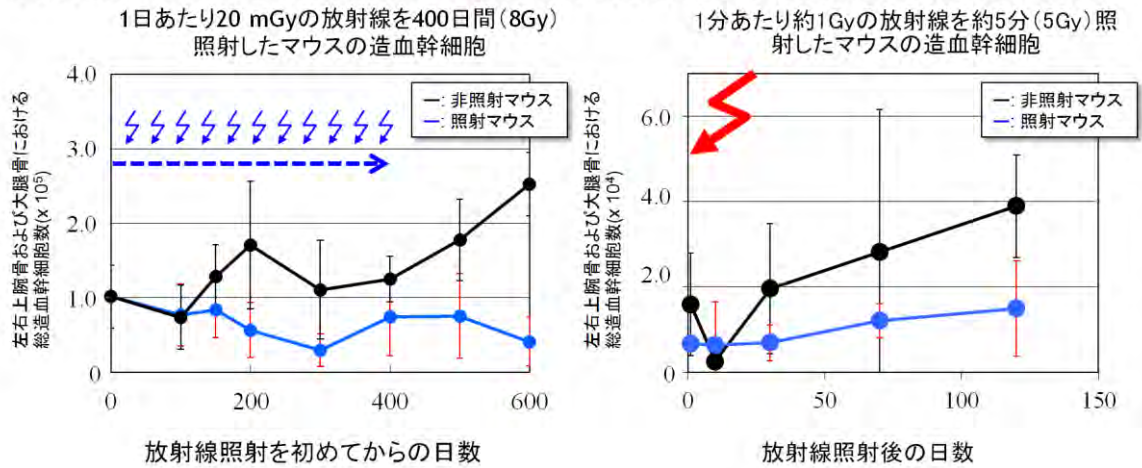
細胞分化段階	白血病発症数
顆粒球系白血球	1例
B細胞・NK細胞	1例

低線量率放射線照射マウス白血病*

細胞分化段階	白血病発症数
リンパ球系共通前駆細胞	1例
B細胞・NK細胞	1例

*2番染色体の欠失がないタイプ

放射線が健康な造血幹細胞に与える影響についての調査



—要点—

1. 低線量率放射線の連続照射中の造血幹細胞の細胞数がどのように変化するかを調べた。
2. 8週齢から1日あたり20 mGyの放射線を400日間連続照射したマウスの大腿骨(後肢)と上腕骨(前肢)の骨髄の中の造血幹細胞を100日おきに数えた。また、連続照射の後は放射線を照射せずに飼育を行い、こちらも同様に造血幹細胞を数えた。
3. 上記のマウス(照射マウス)と、それぞれの観察点で週齢が同じ放射線を照射しないマウス(非照射マウス)の結果を比べると、照射日数が200日を過ぎた頃から両者の造血幹細胞数に差が生じ、この差は連続照射を止めてもなくならなかった。
4. 低線量率放射線に比べて高線量率放射線では照射直後に造血幹細胞数がすぐに減少して、それが100日以上続いた。

まとめ

①染色体異常の解析

線量率が高くなる程、2番染色体の部分的な欠失を持つ白血病が増える
→高線量率群の白血病マウスでは90%前後、低線量率群では30%

②白血病細胞の元になる“白血病幹細胞”についての解析

- 2番染色体の欠失を持つ白血病と持たない白血病細胞の分化段階が異なる
→高線量率群は骨髄系の細胞、低線量率群ではリンパ系の細胞が増殖
- 2番染色体の欠失を持つ白血病と持たない白血病では、白血病幹細胞の分化段階が異なる
→高線量率群の白血病幹細胞は骨髄系の前駆細胞に、低線量率群ではリンパ系の前駆細胞、リンパ球、顆粒球に類似

③放射線が健康な造血幹細胞に与える影響についての調査

- 400日間の低線量率放射線の照射によって骨髄中の造血幹細胞は非照射マウスの約半分に減少
- 上記の造血幹細胞の減少は照射終了後200日でも回復しない
→高線量率放射線では照射直後に減少し、長時間継続

現在および今後の研究計画

高線量率と低線量率の二つの放射線の白血病を引き起こす機構の違いに注目した研究を行う。

—要点—

低・中・高の線量率放射線の照射によって誘発された白血病について比較を行った結果、以下の内容が明らかになった。

①染色体異常の解析

照射した放射線の線量率が高くなる程、白血病マウスの脾臓や骨髄中の白血病細胞が2番染色体の欠失変異を有する傾向が高くなった。

②白血病細胞の元になる“白血病幹細胞”についての解析

- 放射線誘発白血病マウスの血球細胞の比は健常なマウスのそれとは異なり、2番染色体欠失を持つ群では骨髄球系共通前駆細胞が増加し、2番染色体欠失を持たない群では造血幹細胞とリンパ球系共通前駆細胞が増加した。
- 2番染色体欠失を持つ群の白血病幹細胞は造血幹細胞、多能性前駆細胞、骨髄球系共通前駆細胞に似ており、2番染色体欠失を持たない群の白血病幹細胞はリンパ球系共通前駆細胞、顆粒球系白血球、NK細胞・B細胞に類似していた。

③放射線が健康な血液細胞に与える影響についての調査

健常なマウスに低線量率放射線を毎日照射すると、加齢に伴う造血幹細胞の増加が抑えられて、400日間の照射によって放射線を照射しないマウスの約半分とった。この造血幹細胞の減少は照射を止めても回復しなかった。

報告内容等の問合せ先 : 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字家ノ前 1 番 7
公益財団法人 環境科学技術研究所

総務部 企画・広報課

TEL 0175-71-1240