

放射能の体内除染・防護修復能の向上

香川靖雄*

女子栄養大学

〒350-0288 埼玉県坂戸市千代田三の 9-21

Improvement of Biological Decontamination, Protective and Repair Activity against Radiation Injury

Yasuo KAGAWA

Kagawa Nutrition University

9-21, 3Chome, Chiyoda, Sakado, Saitama Japan 350-0288

Summary

Because the protection of human subject from late radiation injury is the final goal of remediation of radioactive contamination of ^{137}Cs in environment, improvement of DNA-repairing ability and ^{137}Cs -removal from human body is important. In order to reduce environmental radioactivity in areas exceeding 5 mSv/year in Fukushima prefecture, the cost is estimated to be 118 trillion yen, and there are difficulties in finding place to store ^{137}Cs -contaminated soils and in ^{137}Cs -recontamination. The radiation damage of DNA molecule takes place stochastically following linear no threshold model (LNT), but the cancer risk and other late radiation injury from long-term low dose radiation do not follow LNT model if we improve DNA repair and the cell regeneration systems. Indirect effects of radiation damage on DNA mediated by reactive oxygen species (ROS) are prevented by vitamin C, E, carotenoids including lycopene and phytochemicals. ROS is also removed by superoxide dismutases containing Cu, Mn and Zn. Direct effects of radiation damage on DNA are repaired by enzyme systems using folic acid, vitamins B₆ and B₁₂. In addition, before the radiation injury, absorption of ^{137}Cs is prevented by taking pectin etc. and excretion of ^{137}Cs is accelerated by ingesting more K. Finally, early detection of cancer and its removal by detailed health check of radiation-exposed people is needed. Radiation-protecting diet developed to protect astronauts from about 1 mSv per day, will be useful for many workers of atomic power plant as well as people living in the ^{137}Cs -contaminated areas.

Key words: 晩発性放射線障害、体内放射能除染、DNA 修復能、活性酸素除去、放射線防護食

1. 緒言

環境放射能除染の目標である放射線障害の予防を医学の視点から、体内放射能の除去法、放射能に対する細胞の防護能の向上法、そして DNA や組織の放射線損傷修復能の向上法について紹介する。

2. 巨億の除染費用の目的は人体の晩発性放射線障害の防御

現在行われている ^{137}Cs 環境放射能除染の最終目的は、汚染食品や粉塵による内部被曝と環境の ^{137}Cs 外部被曝による人体の晩発性放射線障害の予防である。除染関係ガイドライン（平成 25 年 5 月、第 2 版）には 0.23 $\mu\text{Sv}/\text{時}$ 以上の地域を「汚染状況重点調査地域」として、環境大臣が指定する。環境除染が容易ならば基本的な選択肢となるが、環境省試算によると、福島県の面積 ($13,782 \text{ km}^2$) の 17.5%に相当する 5 mSv/

年以上の $2,412 \text{ km}^2$ 土壌 $2,879 \text{ 万 m}^3$ の除染費用に 118 兆円と経済学者池田信夫が試算している。政府公約の 1 mSv/年以上の土壤除染には 1,000 兆円とも試算している。日本原子力学会誌の石倉武、藤田玲子の試算では 6~9 兆円となる。安価な試算は 1.03~3.10 兆円（産業技術総合研究所：保高徹生、内藤航、2013 年 7 月）で、除染実施区域 40 市町村の対象全面積 $8,127 \text{ km}^2$ の森林等を除染せず建物の 1 部等に実施する。国家の税収が僅か 40 兆円程度で、財政赤字が約 1,000 兆円であること、福島県の総生産額が 7 兆 6,669 億円に過ぎないことを考えると、栄養・検診等の他の選択肢との費用対効果比の査定が不可欠である。除染は有用な物品生産や建設ではなく、 ^{137}Cs の移動作業である。経済的技術的制約のため住民の長期低線量被曝、事故原子炉作業員の法的限度の高線量被曝は不可避と考えなければならない。したがって、除染本来の目的に立ち返って人体の放射能の防御能を高め、放射線被

*Corresponding author: TEL 0492-82-3618 (直通), FAX 0492-82-3618 (直通), E-mail: kagawa@eiyo.ac.jp

曝による損傷の修復能を高める技術を紹介する¹⁾。放射能は五感で感知出来ないため、科学的知識を持つ心の目で見なければならぬが、過去40年高校教育で放射能が教育されず、栄養士養成校で放射線実習講義がなされている所は女子栄養大学以外に希なため、給食でも混乱が起っている。筆者は自治医科大学のRI委員長として研究、診療の放射線安全管理業務を続けた。ここでは現在の遺伝子医学・栄養学の経験から解説したい¹⁾。

3. 閾値無し線形モデル（LNT）とDNA修復能

電離性放射線は微量でも線量に比例して、障害が起こるという閾値無し線形モデル、すなわち LNT (linear no threshold model) は国際放射線防護委員会で採用されている。これはDNAや蛋白質などの標的分子の破壊では正しい²⁾。吸収線量に比例して物体中に発生するイオンクラスターとDNA等が反応するのは全く確率的に起こるからである。この関係式を利用して、直線加速器を用いて電子線では生体分子の標的分子量を求めることが出来る²⁾ (図1左)。また、重粒子線の場合には線エネルギー付与 (LET) が大きいので分子の標的断面積が得られる (図1右)。「100 mSv以下の被曝の影響は数十年経ても全く判らない。」というのが行政、報道の見解である。しかし、分子生物学の実験では僅か1 mSvの放射線照射で起こる2本鎖DNA切断を3分後にはヒストンH2AXリン酸化の免疫蛍光法で検出でき、その切断数は線量に比例する³⁾。このように極微量の放射線被曝でも異常が起こることがインターネット等で広まり、国民の不信感を増大させた。放射線による閾値なしの分子破壊のみを強調した矢ヶ崎克馬証人は第177回国会予算委員会(平成23年5月27日)で「私はストレートに分子切断、内部被曝の方が外部被曝よりも怖いと申しあげる。国際放射線防護委員会の吸収線量の規定は安全な値ではありません。それは、私が御説明したDNAの

切断ということ自体を基本に置けば、もうとても安全というものではございません。」と証言した。これがさらに、国民を不安に陥れ、困難な除染を住民、行政に強いている。しかし、人体には防御能・修復能があり、その能力を向上させれば放射線障害は破壊された分子数に比例しない点が重要である。

放射能を被曝しない時にも、人体の60兆個の各細胞の中で、毎日、数万回のDNAの塩基損傷、1本鎖切断があるが、全て速やかに修復される。これに較べ約10回だけ2本鎖切断があり、その一部だけが癌などの障害を起こす⁴⁾ (図2)。この事は放射線被曝の無い人体が排出される8ヒドロキシデオキシグアノシンなど核酸の除去修復産物等から算出できる。この修復能の極端に高い例が放射線耐性菌で、ヒトの致死線量2 Svの3万倍の6万Svを被曝しDNAが寸断されても生存できる⁵⁾ (図3)。要するに、被曝線量が放射線障害を決定する最終的な要因ではなく、生体側の放射能防御能、修復能が決定的因素である。行政が国民に知らせておられる生涯被曝100 mSv当たり0.5%発癌という疫学は原爆の被爆者を放置した場合から算出された確率で、被爆者であっても後述のように野菜果物の摂取量増加だけでも放射線修復能が向上して、発症率を一般被爆者よりも減らせるのである。

4. 自然放射能は人体内に約7000 Bq、外部被曝、医療被曝合計約5 mSv

環境汚染をどれだけ丁寧に除染しても、大地の自然放射能には0.4~10 mSv/年の地域差がある。その上、土壤、食物、大気、宇宙線の自然放射能被曝に医療被曝を加えると日本人平均で約5 mSv/年に達する。医療被曝はCTスキャン1回で6.9 mSv程度である。バセドウ病治療では1回に5億Bqの¹³¹I (8 Sv相当)を内服するのが「放射性ヨード内用治療ガイドライン、2012年」に定められているが、これで発癌しないことはハリソン内科学教科書にも載っている。原発事故

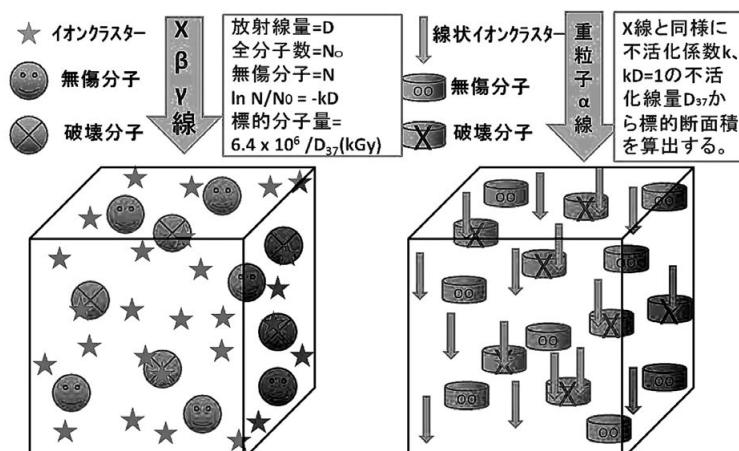


図1. 放射線量に比例した確率的な生体分子の破壊と標的分子量と断面積

[出典] 香川靖雄 : *Biochim. Biophys. Acta* 131, 586-588 (1967)

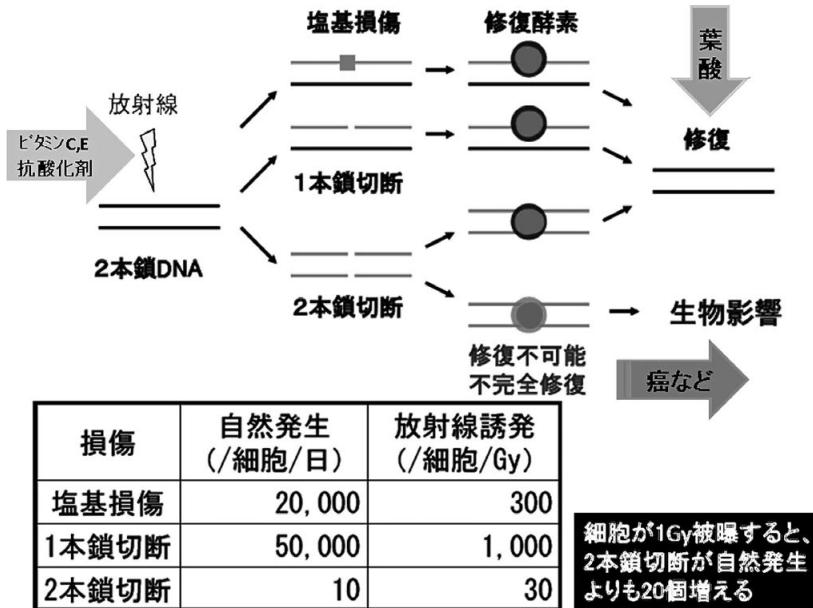


図2. 細胞内DNAの毎日数万箇所の損傷と完全に近い修復

〔出典〕文献1：文献4から改変

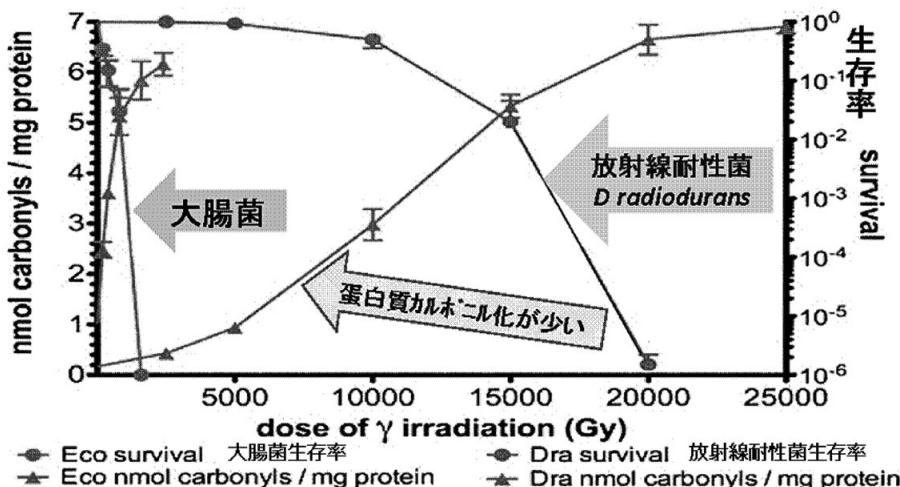


図3. 放射線耐性菌の高線量被曝下の生存率 線量はヒト致死線量の1.5万倍

〔出典〕A. Kriskova, et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107, 14373-14377 (2010)

後に都の水道水汚染 ^{131}I 100 Bq/kg でペットボトル水の入手に都民が狂奔したが、上記医療は500万倍の線量に相当する。特に微量の ^{137}Cs (β 崩壊 94%) の内部被曝の危険を強調する者がいるが、本来人体内には約 7,000 Bq の放射能が存在する。この内部被曝で最大核種は ^{40}K (β 崩壊 89%) で 4,000 Bq あり、女子栄養大学ではホールボディーカウンターで全身の ^{40}K の γ 線を計測して肥満度を算出してきた^⑥ (図4)。筋肉、骨格等の細胞内液は ^{40}K を含むが、体脂肪には ^{40}K は

含まれないからである。この体内 ^{40}K の由来は成人が1日に約 100Bq の ^{40}K を摂取しているためである。現在の食品中の ^{137}Cs の規制値は 100 Bq/kg であるが、干し昆布の ^{40}K 2,000 Bq/kg をはじめ、この規制値を超える ^{40}K 含有食品は多数ある。 ^{40}K と ^{137}Cs の壊変図をみて判るように、 ^{40}K による放射線被曝は ^{137}Cs とほぼ等しい。たとえ、 ^{137}Cs の食品の規制値を 100 Bq/kg (約 1 mSv/年) 以下に厳格にしても、人体の放射線被曝線量 (約 5 mSv/年) の軽減は僅かである。

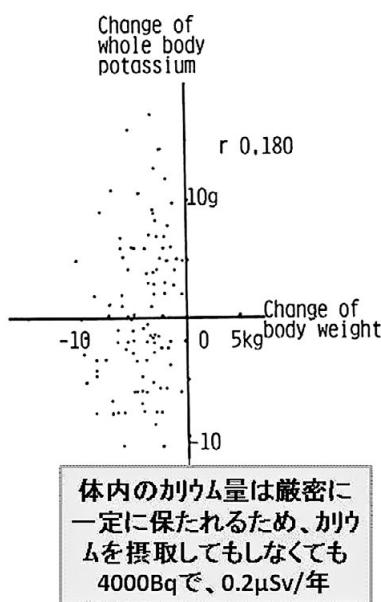


図4. 人体内 7,000 Bq の自然放射能の中で 4,000 Bq を占める⁴⁰K を利用する肥満度決定法

・成人体内カリウム量は 140 g (放射能強度 4,000 Bq) = 3.5 Eq で摂取量は 3.3g/日 = 94 Bq/日。年間 180 μSv。半減期 12.8 億年。生物学的半減期は 30 日。細胞内液にあるので肥満度計測に使う。10,000 Bq 経口摂取時の実効線量は 0.062mSv。

・女子栄養大学は東大・吉沢教授のホールボディーカウンターで減量を指導。
無脂肪体重 (kg) = カリウム量 (mEq) ÷ 68.1 で計算。

[出典] Y. Kagawa et al., "Nutritional Prevention of Cardiovascular Disease" (1984), Acad. Press

仮に⁴⁰K を含む食品を摂取しなければ、内的環境恒常性によつて⁴⁰K の排出を厳しく抑制して、体内⁴⁰K 量を完全に維持するので、⁴⁰K による内部被曝線量は減らせないのである。

4. ⁴⁰K 摂取増加による¹³⁷Cs の体内除染能の向上

¹³⁷Cs の物理的半減期は 30 年であり、「人体での¹³⁷Cs の長期低線量被曝の晩発性放射線障害は未知である。」と不安を煽る報道が多い。しかし、1964 年前後の中国の大気圏内原子爆弾実験によって、全日本人の体内に平均 500 Bq の¹³⁷Cs の汚染があった（放射線医学総合研究所 稲葉次郎）が数年で正常値に戻っている¹⁾。人体と同型の人形の¹³⁷Cs 汚染では半減期は 30 年で、現在でも高放射能が残るが、生体には

代謝があつて、¹³⁷Cs は体内から除染される。この生体の¹³⁷Cs の半減期を生物学的半減期と呼び、幼児で約 9 日、成人では約 90 日である¹⁾。この体内からの除染を促進するには¹³⁷Cs と体内で競合する K 摂取量を増加すればその量に応じて¹³⁷Cs が減少するのである⁷⁾（図 5）。とくに発癌しやすい肝臓、腎臓、脾臓、骨等の諸臓器からの K による¹³⁷Cs 除染促進の率は発癌しない骨格筋よりもはるかに大きい⁷⁾（図 6）。健康日本 21 政策による K 摂取の目標量は 1 日 3.5 g であるが、現在は野菜、果物の摂取減少、調理による K の溶出で年々減少し、現在は約 2 g である。したがつて K の約 2 倍の摂取増加は汚染地域はもちろん、一般人の健康にとっても重要である。

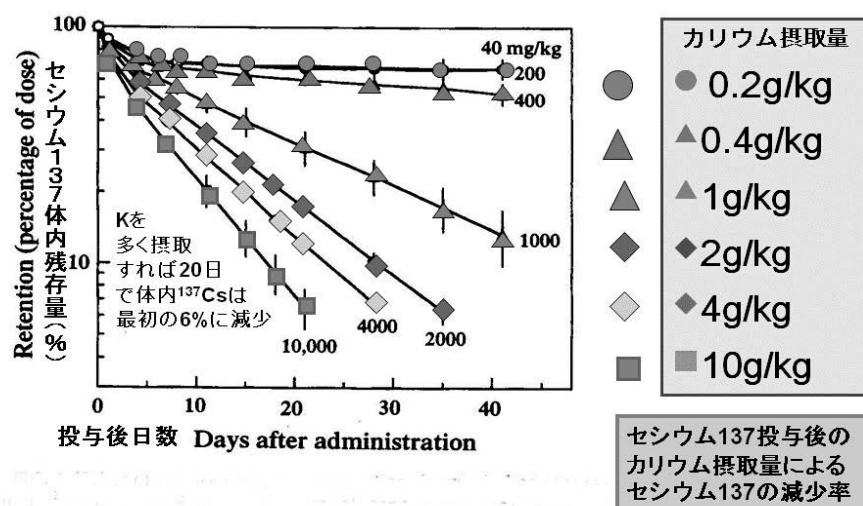
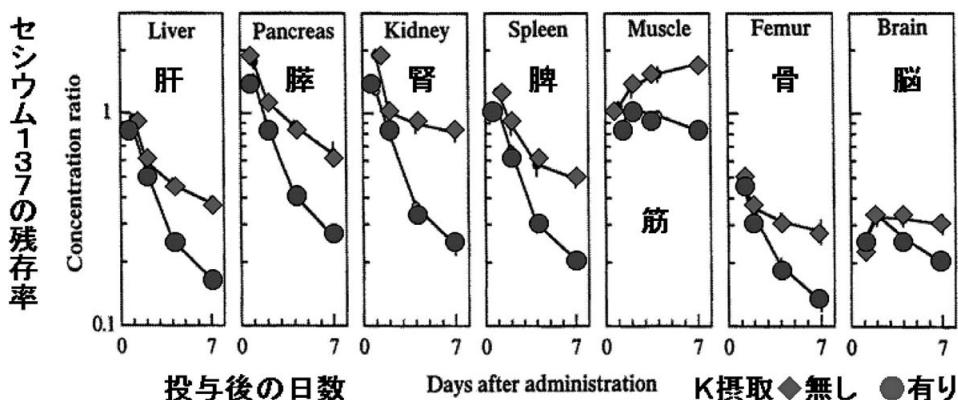


図5. 体内¹³⁷Cs 除染速度の K 摂取量依存性

[出典] I. Sato, et al.: Radiat. Res. 148, 98-100 (1997)

図 6. 体内 ^{137}Cs 除染速度の K 摂取量依存性 発癌性臓器の高除染速度

[出典] I. Sato, et al.: Radiat. Res. 148, 98-100 (1997)

^{137}Cs の体内での汚染防御は、各種の放射性核種において解析されている吸収、分布、代謝、排泄の4段階の経路と同様に、4段階にわたって多くの手段がある（図7）。摂取量を減らす調理の段階については水洗や調理でも20～60%は除染可能である。呼気からの吸入を減らすマスクにも高性能フィルターがあり、 ^{131}I には活性炭で吸着する。摂取した ^{137}Cs を結合して消化管での吸収を阻害して、体内から除染する物質が利用されている。その代表がペクチンであり、 Chernobyl事故以降、広く用いられている。また、現在原子炉の汚染水の ^{137}Cs 吸着剤として使用されているプルシアンブルーも医薬として準備されている。特に飲用水については逆浸透膜を使用すれば ^{137}Cs も他の核種もほぼ完全に除染できるので、汚染の大事故への備えとして重要である。分布・代謝段

階には先述の Kなどの競合核種が用いられる。 ^{131}I 体内汚染にたいする安定ヨウ素剤（100 mg）の事故時即時服用は、今回の原発事故では責任者が動転して、三春町以外では実行できなかった。原発事故の混乱時に役場に出頭させて配布する今的方式を、各家庭に配布しておく方式に改めないと有効時間を逸することが判った。大量のヨウ素は1回しか投与できず、後から与えても有害である。原子炉事故後、インターネット上にイソジンなどのヨウ素剤の飲用を勧める無責任な情報が流行したが、日本人の食事摂取基準ではヨウ素の耐容上限量は2 mgである。大量放射線の体内汚染時にはEDTA等の排出促進剤が用いられる。これらの防御法でも防止出来ない場合、細胞が被曝するが、その際のDNAや細胞の修復能が重要である。

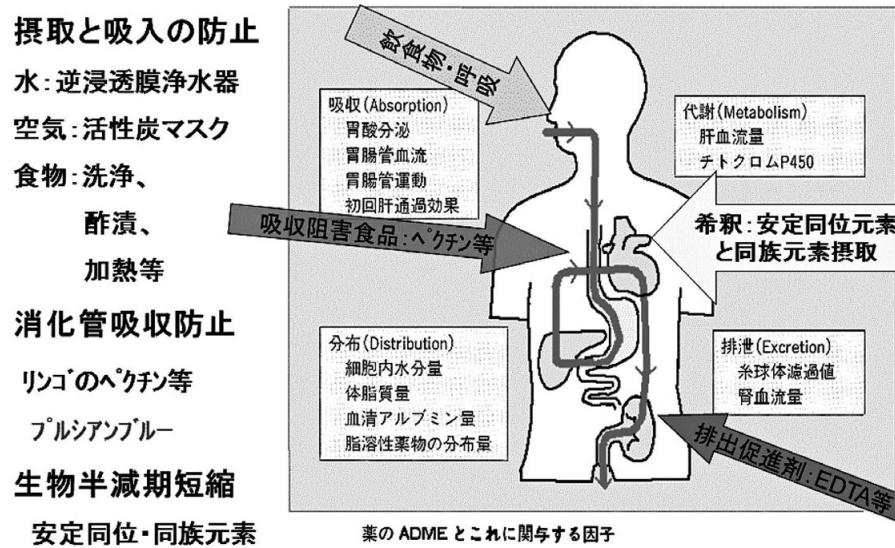


図 7. 放射性核種の吸収、分布、代謝、排泄 — 各段階別の汚染防御法と体内除染法

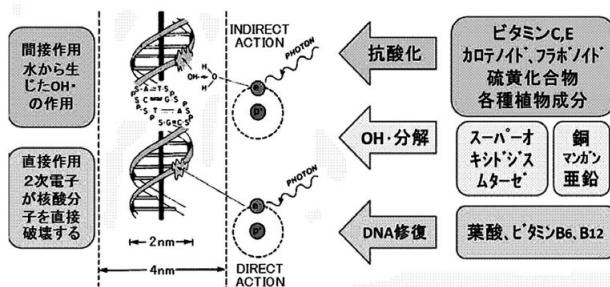


図8. 放射線の間接作用と直接作用：間接作用の活性酸素に対する抗酸化物質

直接、間接作用によるDNA損傷の葉酸、

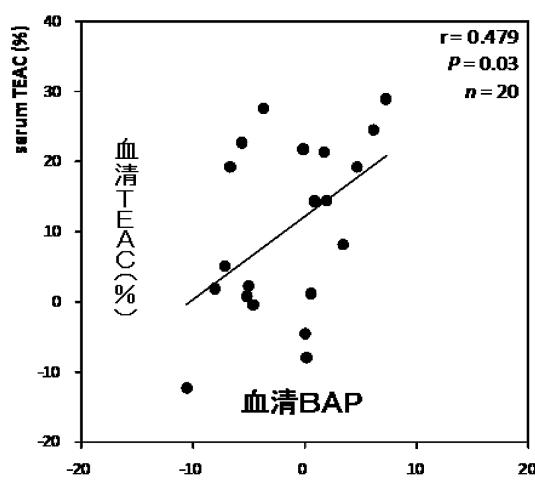
ビタミンB₁₂、ビタミンB₆による修復

[出典] E. J. Hall著、浦野宗保訳：放射線医のための放射線生物学 第4版、篠原出版（1995）
p. 11より改変

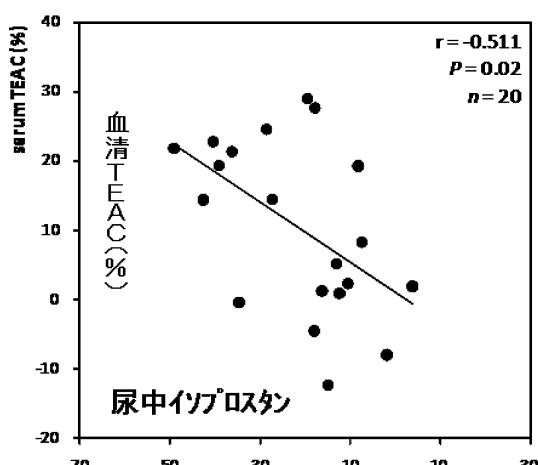
5. 放射線障害間接効果の原因となる活性酸素の分解促進

放射能によるDNA損傷は水の電離で発生する活性化酸素による間接作用と、直接DNA分子内の2次電子による直接作用の2通りがある（図8）。γ線によるDNA損傷の原因としては前者が約70%を占めるのは人体に水分子が最も多いためである。活性酸素にはヒドロキシラジカル、過酸化水素、スーパー・オキシダニオン、一重項酸素の4種がある。活性酸素で最も酸化を受けやすいのはDNAの中のグアニン塩基であり、8位に酸素の入った8-ヒドロキシデオキシグアノ

シンが形成されて、その後の細胞機能に障害を与える。間接作用で発生した活性酸素を除去するには、抗酸化物質が必要である（図8上）。抗酸化ビタミンには、ビタミンC、ビタミンE、カロテノイドなどがある。カロテノイドは、野菜の色素成分として、緑黄色野菜に多く含まれている。トマトの赤色色素であるカロテノイドの一種リコペソも、活性酸素の除去能が高い。筆者等は現在、日本宇宙食（トマトゼリー：リコペソ30 mg/180 g）の原料となる高リコペントマトジュースを負荷する人体試験を行って、血中抗酸化力をBAP（Biological Antioxidant Potential）とTEAC（Torolox Equivalent Antioxidant Capacity）を測定し、その両者に有意正相関があるだけでなく、酸化ストレスのマーカーであるイソプロスタンと有意の負相関を認めた⁸⁾（図9）。活性酸素の4種類の中で、ヒドロキシラジカルはビタミンEやカロテノイドで除去されるのに対して、他の3種はビタミンCで除去されるため、放射線障害を防ぐためには、抗酸化物質は他種類の組合せが必要となる。その他、ネギ科やアブラナ科の野菜中には多数の硫黄化合物等の抗酸化ファイトケミカルがあり、抗酸化能が高い。スーパー・オキシダニオンを分解する酵素がスーパー・オキシダニオン・スムターゼ（SOD）である。SODにはZn、Cu、Mnが含まれ、CuとZnは日本人に不足しやすい。過酸化水素の分解にはSeを含んだグルタチオンペルオキシダーゼが必要である。電離性放射線照射後、細胞内の活性酸素除去にビタミンC、E等抗酸化物質が消費されるために激減する⁹⁾（図10上）。したがってこれらをあらかじめ多く摂取していると放射線耐性が増加し、遺伝子損傷のマーカーである小核が減少することも証明されている。



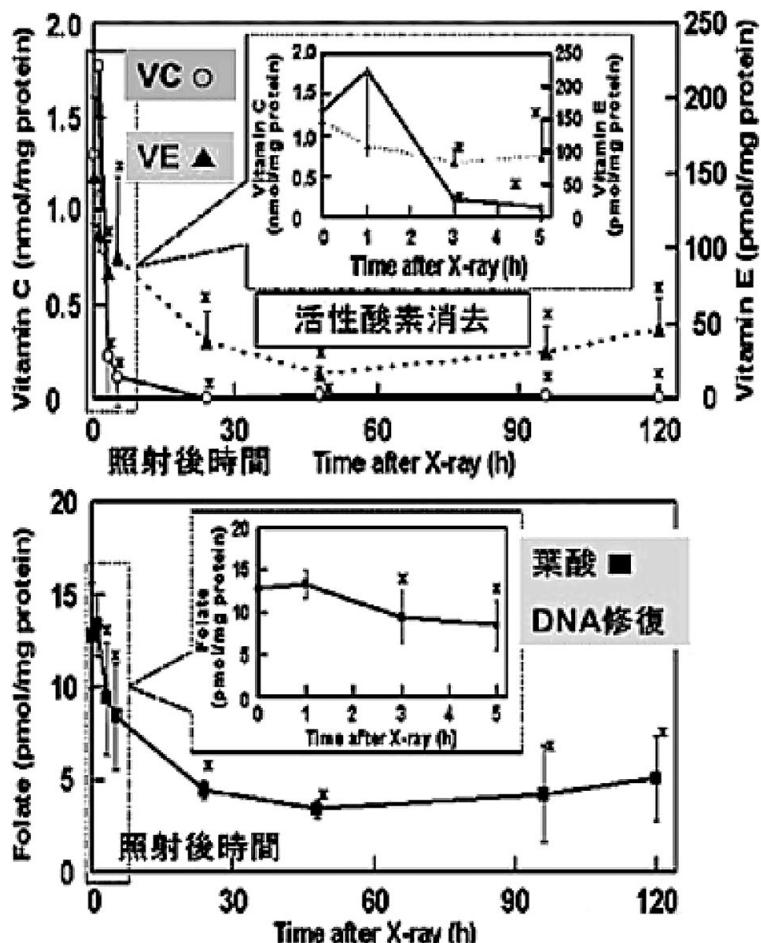
血中抗酸化マーカーであるBAPおよびTEACレベル間に有意な正の相関が認められた。



尿中酸化傷害マーカーであるIsopおよびTEACレベル間に有意な負の相関が認められた。

図9. 高リコペントマトジュース飲用による血清抗酸化能の上昇と血清酸化障害マーカーの低下

[出典] 市川、三浦、香川作成の原図



6. 修復能の向上と葉酸、ビタミン B₆、B₁₂

細胞に対する間接作用、直接作用の DNA 損傷を前記の諸手段をもってしても完全に防護することは困難であるから、最も重要なのは DNA の修復能である。そのためには DNA の合成に必要な葉酸、ビタミン B₆、ビタミン B₁₂が不可欠である。図 10 の下のパネルには、放射線照射直後から葉酸が激減していることが示されている⁹⁾。特に修復の主役となる葉酸の欠乏は、放射線被曝線量とともに DNA の塩基が失われる AP 部位欠失量に比例している¹⁰⁾ (図 11)。前述の図 2 のように、体細胞当たり毎日、塩基損傷は 2 万回、1 本鎖切断は 5 万回もある。これは、体内の ⁴⁰K、¹⁴C 等による他、ミトコンドリアの電子伝達系で不可避に発生する活性酸素や食品中の癌原物質が DNA を損傷し、また、細胞増殖の際の DNA 複製の誤りがあるからである。これは、図 2 下の表にあるように、1 Gy (γ 線ならば 1 Sv) の大量放射線被曝による DNA 損傷と較べて、2 本鎖 DNA 切断を例外として、塩基損傷は 67 倍、1 本鎖 DNA 切断は 50 倍である。この表から判ることは人体では 1 Sv という大量の放射線被曝の修復能の数十倍の修復能を全細胞が保持していることである。例えば活性酸素で DNA 内に生じた 8-ヒドロキシデオキシグ

アノシン、チミジングリコール等の酸化産物を塩基除去修復経路で完全に修復し、新しいデオキシグアノシンを葉酸等で合成して補充するのである。そのために、酸化ストレスの大きさは DNA から切除されて尿中に排出された 8-ヒドロキシデオキシグアノシンで定量する。修復困難な 2 本鎖切断でも相同組換えで大部分が修復される^{4, 11)}。切断された DNA の修復能、特に 2 本鎖 DNA の相同組換え、非相同組換えによる修復能は放射線障害による発癌の防護に必要であるが、その分子生物学的な詳細は総説を紹介するのに止める^{4, 11)}。上記のように放射線照射後に急速な DNA 修復のために葉酸が激減するので、葉酸を多量に供給すると、放射線被曝で生じる小核の数を減らすことができる¹²⁾。紙面の関係で、DNA 修復が出来なかった細胞は p53 という癌抑制遺伝子等が作用して、アポトーシスと呼ばれる過程で除去される。これら数段の安全機構のために、長期低線量被曝の場合の発癌や奇形児の発生は大きく抑制されるのである。

7. 放射線防護食

1 日約 1 mSv 被曝する宇宙飛行士の被曝上限量は年齢にもよるが 1.1 Sv であり、放射線防護食の開発が行われてきた¹²⁾

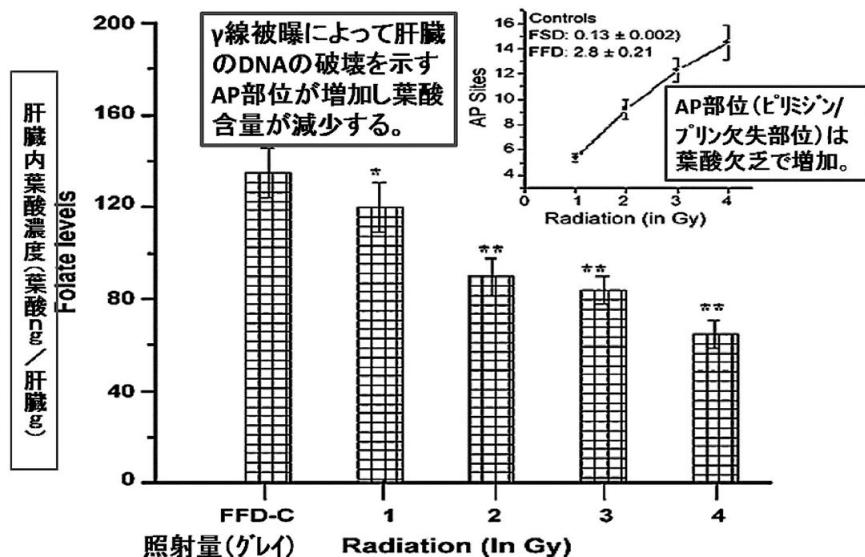


図 11. γ 線照射による肝臓の塩基破壊と葉酸の代償的減少

[出典] V. Batra, et al.: *Toxicology* 255, 91-99 (2009)

(図 12)。葉酸、ビタミン B₁₂ の欠乏が最も重視され (図 12 左上)、その次に抗酸化ビタミン (図 12 左中)、DNA 修復酵素の補助因子がこれに次ぐ¹²⁾。これらの不足の結果、寿命の回数券であるテロメアの異常、老化促進、そして染色体異常などが現れる¹²⁾ (図 12)。放射線防護食で守られた国際宇宙

ステーションでの最長滞在記録はクリカリヨフ飛行士の 803 日であり、月面着陸をした N. アームストロング飛行士も 82 歳の長寿であったが、死因は癌でなく心疾患であった。現在の宇宙食で、日本人の食事摂取基準と比較して大きく異なるのは葉酸 (約 2 倍) とビタミン E (約 3 倍) であり、他に骨粗

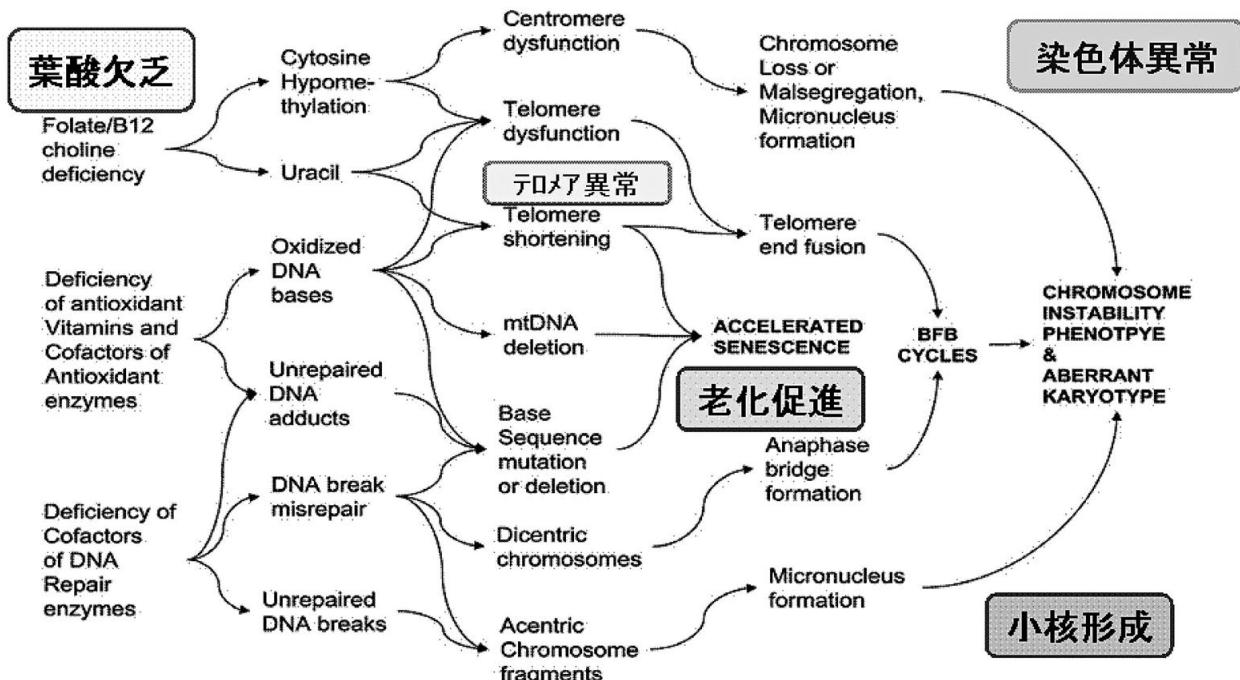


図 12. 放射線防護食の基礎：葉酸、抗酸化ビタミン等と遺伝子、染色体

[出典] M. F. Fenech: *Am. J. Clin. Nutr.* 91 (5), 1438S-1454S (2010)

鬆症予防のためビタミンD（約4倍）とCa（約2倍）が多い。現在は約千日の有人火星探査が計画されているが、高度の被曝が避けられないので、長期宇宙滞在飛行士（128～195日）の血液成分を検討し、葉酸やSODの減少を考慮して現在の宇宙食の改善が試みられている¹³⁾。現在の宇宙食で大量の抗酸化ビタミン、葉酸（400 µg/日）等を摂取していても宇宙飛行で赤血球葉酸は有意に不足するからである¹³⁾。

放射線防護食(radioprotective diet)は最初からビタミンE、葉酸、ビタミンCを中心として、フラボノイド、ポリフェノールなどを含む抗酸化物質を用いて工夫されている¹⁴⁾。特にヒト白血球の放射線照射（2 Gy）による小核形成をマーカーとして、日常食品中の遺伝子保護物質を検討し、ビタミンCやビタミンEの他に、肉のカルノシン酸、カフェイン酸エステル、茶の抽出物（葉酸も含むと推定）等が有効なことを示した¹⁵⁾。

これらの知見を総合して、まず、抗酸化物質（ビタミンC、ビタミンE、α-リポ酸等）を中心とした放射線防護食が試みられて全身への陽子線による電離性放射線照射（TBI: Total Body Irradiation）を行い生存率で有意の保護作用を示した¹⁶⁾（図13）。さらに、骨髄造血系にも1 Gy～7.2 Gyの照射に対して有意の保護作用を確認した。ビタミンや抗酸化物質等の放射線防護食を、AIN93Gという栄養食に加えると、¹³⁷Csの放射能による障害が大幅に軽減される¹⁷⁾（図14）。具体的には対照群に対する致死線量を照射しても放射線防護食群の生存率は75%であり（図14左）、線量依存生存率にも大きな保護作用がある¹⁸⁾（図14右）。

すでに放射線被曝した原子爆弾の被爆者は生存者の人数も多く、その食事による放射線障害修復の研究から、緑黄野菜、果物の摂取量の多い被爆者には、固体癌の発生が有意に少ないだけでなく¹⁷⁾（図15）、緑黄野菜の摂取によって脳卒中の

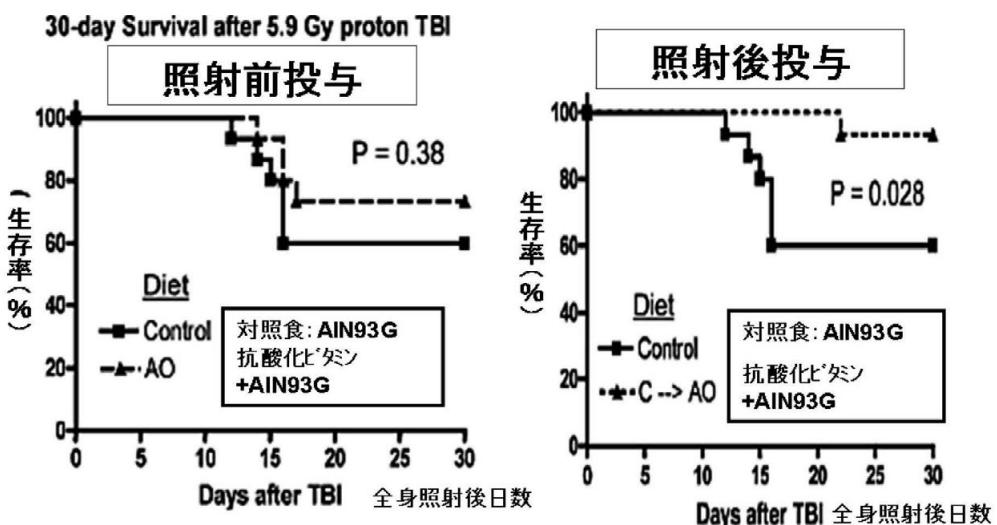


図13. 抗酸化ビタミンの放射線防護食の陽子線防御効果

[出典] C. O. Wambi, et al.: *Radiat. Res.* 172, 175-186 (2009)

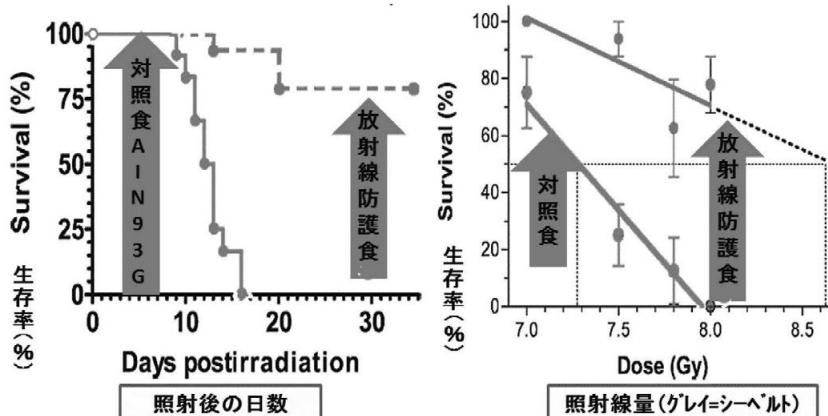


図14. ¹³⁷Cs γ 線照射マウスの放射線防護食の有効性

[出典] S. L. Brown, et al.: *Radiat. Res.* 173 (4), 462-468 (2010)

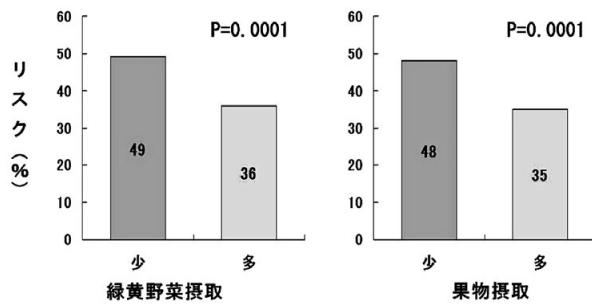


図 15. 原爆被爆者の全固形癌のリスクの緑黄野菜、果物による減少

[出典] C. Sauvaget, et. al.: *Mutat. Res.* 551, 145-152 (2004)

死亡危険度も低い¹⁹⁾ (図 16)。これらの知見は宇宙食の開発にも用いられ²⁰⁾、長期宇宙滞在が必要な国際宇宙ステーションでは「宇宙野菜」も栽培されるようになった。原爆被爆後であっても修復能を高めると発症が大幅に減少する点が重要である。人に対する放射線防護食の開発^{1, 10-12, 19)}は、原子炉解体の労働者など不可避の被爆にも有用である。

8. 除染と栄養・検診の費用対効果比

環境除染だけが放射線障害を防止できるという硬直した考えをあらためて、人体側の健康を考えるべきである。放射線被曝の安全基準と同様に、費用対効果比を判断の基準におき、除染と食事による放射線防護のいずれかを選択する必要がある。僅かな汚染を恐れて戸外の運動をしないため、福島の学童の肥満者は 2010 年の 8%から 2012 年には 14%に激増しているが(福島県統計課編 2012 年度学校保健統計調査)、運動不足による健康被害の方が大きく、現在の校庭での戸外運動を勧める。魚類と昆蟲の放射能汚染を低減するために、沿海、湖沼、山林を除染するのは困難である。現在の学童の

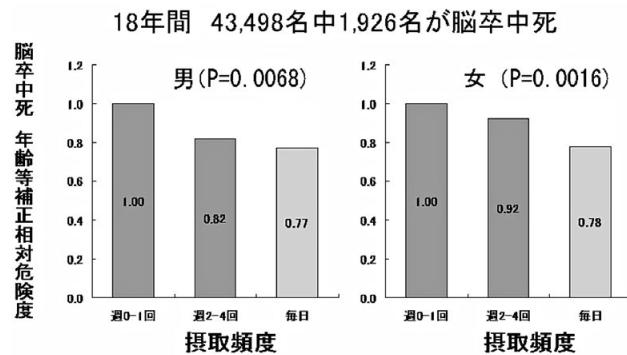


図 16. 広島・長崎の被爆者の緑黄野菜摂取頻度と脳卒中死危険度

[出典] C. Sauvaget, et al.: *Stroke* 34, 2355-2360 (2003)

日光不足、魚介類と昆蟲の摂取不足は、これら地域の除染よりも、ビタミン D と Ca で補充できる。

現在の日本の放射線防護策に欠けているのは葉酸である。葉酸は遺伝子を修復、合成するために、放射線障害だけでなく、多数の疾患の予防に有効なので、世界の 72ヶ国では全ての穀類に葉酸を添加することを義務づけている(図 17)。この強化費用は 1 人年間 1 円に過ぎないが、脳卒中等の循環器疾患、認知症、二分脊椎症を含む奇形児、各種の癌を大幅に削減した。米国では、心筋梗塞、二分脊椎症、大腸癌の 3 疾患の減少だけで 4,000 億円の医療費削減という高い費用対効果比(cost-effectiveness)を試算している²¹⁾。そこで、坂戸市でも、葉酸とこの修復作用を助けるビタミン B₆、B₁₂を含んだ葉酸米を開発して、医療介護費を大幅に削減出来た²²⁾(図 18)。

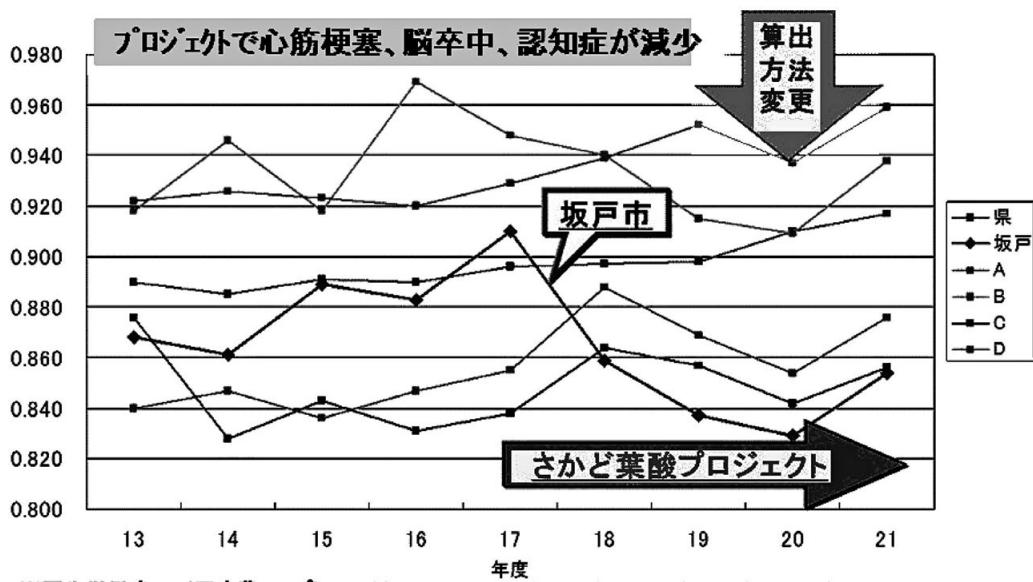
最後に重要なのは検診である。チェルノブイリ事故で 6,000 人の小児が甲状腺癌を発症したが、検診と早期手術によって、実際に死亡したのは僅か 15 人に過ぎない。筆者はチェルノブイリ事故当時、長崎大学原爆後遺障害医療研究所の非常勤講師であった時に、1 Sv 以下の被爆者は、一般日本人よりも健康指標が高くなったことに感銘を受けた。被爆後は検査のみで十分な医療を受けずに放置されていた当時の疫学統計から、現在の安全基準が国際放射線防護委員会で定められた。しかし、昭和 32 年に原子爆弾被爆者の医療等に関する法律(平成 6 年以降の略称被爆者援護法)で被曝者健康手帳所持者は年 2 回の無料精密検診、生活指導、早期治療を受けられるので、死亡率、癌死亡率、異常出産が一般人よりも低いだけでなく、日本人最高齢に近い 113 歳を含む百寿者も多いことは、たとえ被爆後でも図 15、16 のように適切な栄養で発症を大幅に予防出来ることを示している。



図 17. 法的な穀類の葉酸強化実施国

9. 結論

結論として、放射線被曝は少ない方がよいが、自然放射能による被曝と医療被曝を合計して、約 5 mSv であることを考



※厚生労働省HP(医療費マップ)<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/hoken/iryomap/>
※H20より給付費ベースではなく、医療費ベースで作成されているため、H19以前と単純比較はできない。

図 18. 坂戸市民の葉酸摂取増加による医療費の削減

(注) 全国平均を 1 とした場合、坂戸市は 0.86

慮すると、1 mSv/年を達成するための除染は、費用、人手から考えても困難である。放射線防護の食生活によって被曝の影響は大幅に減らせる。30 歳の 1,000 人が 40 年間に 100 mSv を被曝して癌患者 5 人が増加するのに対し、同期間に汚染と関係なく 300 人が癌で死亡する。野菜果物の摂取量を増し、葉酸やビタミン C、E を十分に摂り、さらに検診を頻度多く受けければ、この 300 人を 200 人に減らすことは十分可能である。精密検診と放射線防護の栄養によって、削減した除染費用は産業復興、教育、医療に有効に使うべきである。放射線防護の栄養と丁寧な検診による予防を、環境除染に加えて国民に経済的ゆとりと希望を与える。

付記：本総説では核種、放射線生物学の基本的数値、概念を記載しなかつたが、拙著のデータブックを参照して頂きたい²³⁾。

参考文献

- 1) 香川靖雄、菊地透：「いまからできる放射能対策ハンドブック」 女子栄養大学出版、東京 (2013)
- 2) Y. Kagawa: Target size of components in oxidative phosphorylation. Studies with a linear accelerator. *Biochim Biophys Acta* 131, 586-588 (1967).
- 3) I. G. Cowell, N. J. Sunter, P. B. Singh, C. A. Austin, B. W. Durkacz, M. J. Tilby: Gamma H2AX foci form preferentially in euchromatin after ionizing radiation. *PLoS One* 2 (10), e1057 (2007)
- 4) F. V. Rassool, A. E. Tomkinson : Targeting abnormal DNA double strand break repair in cancer. *Cell Mol Life Sci.* 67, 3699-3710 (2010).
- 5) A. Krisko, M. Radman: Protein damage and death by radiation in *Escherichia coli* and *Deinococcus radiodurans*. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 107, 14373-14377 (2010)
- 6) Y. Kagawa, A. Kagawa: "Nutritional Prevention of Cardiovascular Diseases" Ed by K. Lovenberg, Y. Yamori. Academic Press, pp.339-348 (1984)
- 7) I. Sato, N. Matsusaka, S. Tsuda, H. Kobayashi, Y. Nishimura: Relationship between turnover of cesium-137 and dietary potassium content in potassium-restricted mice. *Radiat. Res.* 148, 98-100 (1997)
- 8) 市川優：学位論文 「健康人における酸化ストレス関連因子、遺伝子多型および野菜類摂取による抗酸化効果の検討」 (2013)
- 9) K. Endoh, M. Murakami, K. Umegaki: Vulnerability of folate in plasma and bone marrow to total body irradiation in mice. *Int. J. Radiat. Biol.* 83, 65-71 (2007)
- 10) V. Batra, T. P. Devasagayam: Interaction between cytotoxic effects of gamma-radiation and folate deficiency in relation to choline reserves. *Toxicology* 255, 91-99 (2009).
- 11) P. J. McKinnon, K. W. Caldecott: DNA strand break repair and human genetic disease. *Ann. Rev. Genomics Hum. Genet.* 8, 37-55 (2007)
- 12) M.F. Fenech: Dietary reference values of individual micronutrients and nutriomes for genome damage prevention:

- current status and a road map to the future. *Am. J. Clin. Nutr.* **91**, 1438S-1454S (2010)
- 13) S. M. Smith, S. R. Zwart, G. Block, B. L. Rice, J. E. Davis-Street: The nutritional status of astronauts is altered after long-term space flight aboard the International Space Station. *J. Nutr.* **135**, 437-443 (2005)
 - 14) N. D. Turner, L. A. Braby, J. Ford, J. R. Lupton: Opportunities for nutritional amelioration of radiation-induced cellular damage. *Nutrition* **18**, 904-912 (2002)
 - 15) M. Alcaraz, D. Armero, Y. Martínez-Beneyto, J. Castillo, O. Benavente-García, H. Fernandez, M. Alcaraz-Saura, M. Canteras: Chemical genoprotection: reducing biological damage to as low as reasonably achievable levels. *Dentomaxillofac Radiol.* **40**, 310-314 (2011)
 - 16) C. O. Wambi, J. K. Sanzari, C. M. Sayers, M. Nuth, Z. Zhou, J. Davis, N. Finnberg, J. S. Lewis-Wambi, J. H. Ware, W. S. El-Deiry, A. R. Kennedy: Protective effects of dietary antioxidants on proton total-body irradiation-mediated hematopoietic cell and animal survival. *Radiat Res.* **172**, 175-186 (2009)
 - 17) S. L. Brown, A. Kolozsvary, J. Liu, K. A. Jenrow, S. Ryu, J. H. Kim: Antioxidant diet supplementation starting 24 hours after exposure reduces radiation lethality. *Radiat Res.* **173** (4), 462-468 (2010)
 - 18) C. Sauvaget, F. Kasagi, C. A. Waldren: Dietary factors and cancer mortality among atomic-bomb survivors. *Mutat. Res.* **551**, 145-152 (2004)
 - 19) C. Sauvaget, J. Nagano, N. Allen, K. Kodama: Vegetable and fruit intake and stroke mortality in the Hiroshima/Nagasaki Life Span Study. *Stroke* **34**, 2355-2360 (2003)
 - 20) B. Rabin, B. Shukitt-Hale, J. Joseph, P. Todd: Diet as a factor in behavioral radiation protection following exposure to heavy particles. *Grav. Space Biol.* **18**, 71-77 (2005)
 - 21) T. G. Bentley, M. C. Weinstein, W. C. Willett, K. M. Kuntz: A cost-effectiveness analysis of folic acid fortification policy in the United States. *Public Health Nutr.* **12**, 455-467 (2009)
 - 22) 香川靖雄:坂戸葉酸プロジェクトによる医療介護費削減. 臨床栄養, **120**, 398-400 (2012)
 - 23) 香川靖雄:9章 同位元素と放射線生物学.「生化学データブック II」日本生化学会編、東京化学同人、東京 (1980), pp.1105-1174.

2013年8月17日受付

2013年8月20日受理

和文要約

環境の ^{137}Cs 放射能除染の最終目的は放射線障害の予防であるから、人体の DNA 修復能と ^{137}Cs 除去能を高める方法が重要である。福島県の 5 mSv/年以上の地域の除染費用は 118 兆円との推定があり、 ^{137}Cs 汚染土の貯蔵場所、 ^{137}Cs 再汚染の困難がある。DNA 損傷の程度は閾値無し線形モデル (LNT) にしたがって確率的に起こるが、DNA 損傷と細胞の異常は急速に修復されるので、長期低線量被曝による発癌等の晩発性放射線障害は、DNA と細胞の修復能を向上させれば、被曝線量に比例しない。放射線で発生する活性酸素を介する間接効果に対しては、ビタミン C、ビタミン E、リコ펜などのカロテノイド、抗酸化フローティケミカル等が有効である。Cu、Mn、Zn を含むスーパーオキシドジスムターゼ等も活性酸素を除く。放射線の直接作用による DNA 損傷は葉酸、ビタミン B₆、ビタミン B₁₂ を用いる酵素系で修復される。さらに被曝以前に ^{137}Cs の吸収はペクチン等の摂取で防ぎ、 ^{137}Cs の排出能を K 摂取で増加する。最終的に被曝者の検診を充実して早期に癌を摘除する。毎日約 1 mSv 被曝する宇宙飛行士に対する放射線防護食の開発は、原発作業員や汚染地域住民の健康維持に有効である。