

第12章 ウラン 劣化ウラン兵器

と云うのは、知られるためでないのに隠されているものではなく：
表明されるためでないのに、秘密にされるものはないからである

マルコ 4.22

第12.1節 はじめに

ウランという元素は環境中に放出されているほとんど全ての放射能の基礎であり生みの親であるが、いっそう興味深いのは、それがひとつの兵器として使用されるようになるまで、健康に対して有害なものであるということは全く無視され続けてきたということである。それは原子力発電所や再処理工場の周辺地域で定期的に測定されていない。それは当然のことのようにして自然物であるとして扱われているが、そのような地域におけるウランの濃度や放出されているその化学的形態は自然物のそれらとは異なる。

ウラン兵器が使用された第一次ペルシャ湾岸戦争に参加した軍人、あるいは後のバルカン半島に派兵された軍人の健康については強く日々増大している関心が持たれているが、そのような地域で暮らしている住民の間にもたらされたウランの遺伝子毒性 (genotoxicity) は、もちろんそれを使用した軍隊よりも、その使用を正式に承認した列国よりも、はるかに重大であると信じられている。疫学によって、実験室において、また理論的にも、害をもたらすその異常な性質の証拠が次々に示されているにもかかわらず、放射線防護ではどこにでも顔を出すICRPモデルが、その証拠を否定するために、戦争において兵器としてその使用を続けることを許可するために使われている。大気圏核実験やチェルノブイリ原発事故、そして核施設周辺の小児白血病でそうであったのと同じく、その吸収線量はいかなる検出可能な影響をもたらすにしても低すぎる、という演繹的な論法によってウランへの被ばくがもたらしている明らかな損害が否定されている。2006年までには、いわゆる劣化ウラン (DU) への被ばくについて大きな集団を対象とした、DUが被害をもたらしているという証拠や実験室での研究、理論的な研究が現れるようになっていた。UNSCEAR (原子放射線による影響に関する国連科学委員会) の2006年の報告書では、その400ページのうちのある1ページの中の11行のみがDU効果について考察にあてられている。UNSCEARはウラン被ばくのあらゆる問題を3つの引用文献に基づいて棄却しているが、机上の文献調査ということになり、ランド研究所 (RAND corporation) の1999年報告 (Harley *et al* 1999) と米国医学研究所 (US Institute of Medicine) の2001年報告、及び王立協会 (the Royal Society) の2001年のそれである。これらの報告書はいずれもピア・レビュー審査は行われていないし、ランド研究所は米国防省と密接に関係している。それらの参考文献は全て選択されたものである。そして全てデータを欠いている。誰ひとりとして研究していないため、兵器から発生して吸引されたウランの特異なナノ粒子は取り扱われていない。3つの報告書では (WHOのような機関からの数えきれないほどの報告書でも) 線量が低すぎることを示すためにICRPモデルが採用された。

以下で論評する数多くのUNSCEARの影響をうけやすいにもかかわらず、その2006年の報告は (出版は2008年) 次のように述べている (53ページ) :

(健康機関によって) ウランがどうして人の発がん原因でない...と見なされているのかについては幾つかのはっきりとした理由がある: ウランは決して強い放射能ではなく (半

減期が48億年に及ぶウラン238は極めてゆっくりと崩壊する)、そして、その化学的な性質は吸引しても摂取してもかなり速く身体から排出される。

2004年までに、公的機関の報告類がウランはその放射能が示唆するよりも非常に遺伝子毒性が大きいこと明示するピア・レビュー審査付きの証拠を無視するようなやり方は既にきまりの悪いものになっていたので、WHOの上級放射線健康アドバイザーであるキース・ババーストック (Keith Baverstock) がカーメル・マザーシル (Carmel Mothershill) と共著でこの課題についての事務総長に対する論文を書いた。彼はクビにされたがその論文は後に公表された (Baverstock 2005)。

そのDUについての科学的調査は、以前の原子力施設の小児白血病の調査に興味深い凝縮した反響をもたらした。従来どおりの評価方法で低い線量であるとされたDUに、そのダストに曝された集団にそのようなありありとしたまた驚くような遺伝子作用をもたらす能力があることを認めなければならないとする政治的な決定を与えるとすれば、それは驚くことではない。もしもウランについてもこれが起こるのであれば、そのリスクモデルの基礎方程式と仮定の全てが間違っていることを意味する。この問題はひとりのアメリカ人学者であるポール・チンマーマン (Paul Zimmerman) によって丹念に研究され評論されているが、その学識によって独立に、ECRR2003で開発されこのECRR2010報告でも公表されているものと非常に近い結論に到達している (Zimmerman 2008)。

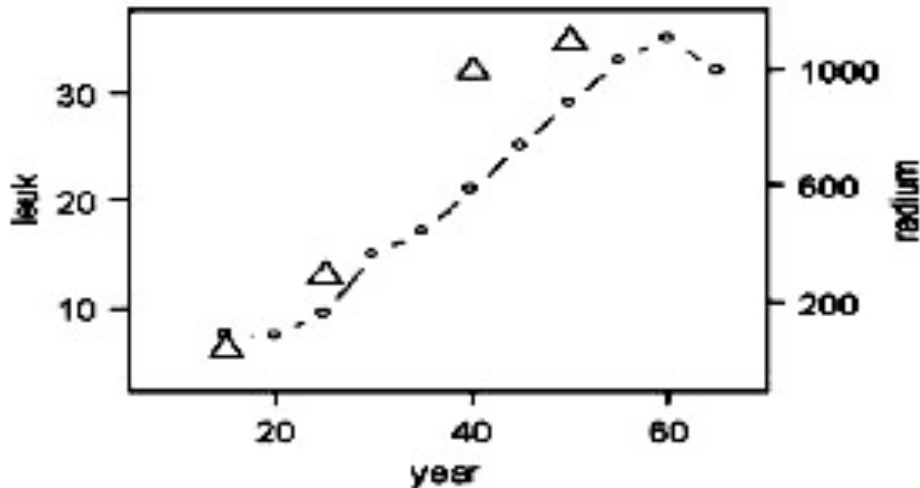
軍隊も原子力産業も内部においてウランの被ばくをその物質の取り扱いについて配慮する限りでは非常に深刻に捉えているという事実は興味深い。例えわずかな量であっても、こぼれたものは放射性物質によって汚染されたものとして厳密に取り扱われる。軍隊においても同様であって、その内部文書では健康への影響について警告している。しかしながら、ウランが大砲から撃ち出され戦場を汚染すると間もなく、それについてのあらゆる報告書の中で、軍隊とそのリスク評価機関において、政府に属するリスク評価機関で、それは突然にして無害なものになった。

ウランへの被ばくの効果は、もちろん、DUやパッシブ兵器 (passive weapons) の降下物に限られたことではない。核施設の周辺で、同位体分離工場の周辺で、燃料製造工場の周辺で、ウラン鉱山の周辺で、原子爆弾や熱核兵器の核分裂降下物の下で、核実験場の周辺と離れた場所で、ウランは増々環境を汚染し続けている。ウランはそれが農業用化学肥料のかなり大きな成分であるため、食物や飲み水の中で増えていることが知られている。したがって、化学肥料工場やリン鉱山の近くで、リン鉱石や農産物の輸送においてウランは見つかっている (Eisenbud & Gesell 2000, Busby & Schnug 2008)。ウランの鉱業は前世紀に始まった。そして時を同じくして小児白血病という新しい疾病が生じたが、その病気は胎内における突然変異の結果であると信じられている。この疾病の発生とウランの生生産 (ラジウムでモデル化) との間の時間的相関は、下の図 1 2. 1 に示すように、驚くべきものである。これにもかかわらず核施設周辺の汚染においても、核実験降下物と疾患との関連においても、チェルノブイリの影響においてもウランは調査において忘れられてきた。それは隠れた見えない物質である。新しい核施設の敷地での計測では変わった同位体の濃縮が示され、魚類のプルトニウム濃度は消えようとしている、しかし、核施設から出てくるウランについては計測が行われていない。セラフィールドの小児白血病のCOMAREによる分析では、プルトニウムが子供の気道内リンパ節に与える被ばく線量は高いが、天然放射性核種からの線量の方がさらに高いので、例えこれらがその疾患の原因だとしても核施設に責任はないと結論されている。チェルノブイリ原発事故後には大量のウランが燃料粒

子として放出されたが、チェルノブイリ降下物に関するどの報告書にもウランの測定は見当たらない。

ECRRは2001年にウラン兵器の問題を審議する委員会を立ち上げた。この章ではその結論を簡単に説明し、DUとウラン効果についての証拠を概観し、そして勧告を行う。

図12.1 小児白血病の死亡率の傾向（破線／左）と世界のラジウム生産（三角／右）
（出典：Busby 2002 acknowledging Bramhall R）



第12.2節 劣化ウラン：ウラン兵器

劣化ウランは、天然のウラン鉱石中の核分裂性同位体U-235を濃縮して原子炉燃料に含まれる「豊化ウラン」を製造する、核産業における副産物である。この工程で除かれる同位体はU-238であり、その長い半減期（45億年）とその弱いガンマ線（48 keV）のためにリスク評価機関からは、一般的に、低い放射線有害物質であるとクラスされている。しかしながら、それはアルファ放射体であり、したがってアルファ飛跡の高い電離密度とそれらの高い突然変異誘導効率によって摂取時のリスクを有している。これに加えて、そこにはベータ放射体である娘核種のトリウム-237（β線最大エネルギー：0.26 MeV、半減期24日）やプロトアクチニウム-234m（β線最大エネルギー：0.23 MeV、半減期6.75時間）からのリスクがある。これらの壊変を通じて、半減期24万7千年（ 2.47×10^5 y）のアルファ放射体であるウラン-234が生じる。したがってウラン-238の全体としての放射能強度はベータ線を発する娘核種が増長するにつれて高くなり、30週間までに永続平衡に到達する。キログラム当たりの放射能を表12.1に示す。その長い半減期のために、ウラン-238の比放射能は12 MBq/kgと低く、環境中において放射線被ばくをもたらす濃度としてはリスク評価においてはほとんど放射性核種であると考えられていないが、その化学的濃度はかなりのものである。83 mgのウラン-238が1 Bqであり、組織中における1 Bq/gは 3.5×10^{-4} Mという濃度に相当し、生理学的濃度としては著しい。

数世紀にわたってU-234の比放射能は親核種であるU-238のそれと同じであるはずであり、したがってこれらの同位体の環境中濃度もその起源が天然であれば一般的には同じである。よって全比放射能はおよそ37 MBq/kgである。最近になって欧州の戦場において見つかったDU物質が、プルトニウムやネプツニウム、核分裂生成物の同位体を少量含んでい

ることを指摘しておくべきである。しかしながら、その量は非常にわずかなものであって本委員会としては深刻な放射線影響を与えるものとは認めない。より関心を引くのは兵器が富化ウランである兆候を示している報告であって、最初にレバノンにおいて、ガザでそして最近では1996年のボスニア戦場にいた軍人から採取された生物試料物質中に見いだされている (Busby & Williams 2006, 2008, Ballardie *et al* 2008)。実際に国連環境計画 (UNEP) によって公表された紛争後の環境試料中の同位体比のテーブルは、ボスニアで富化ウランが使用された証拠をはっきりと示している (UNEP Bosnia report 2002)。(UNEPは富化ウランを発見したことを一貫して否定し続けており、この誤りについては指摘された後に直ぐさま隠された：そのテーブルはUNEPのウェブサイトから削除されたままである) こうした理由に基づいて、ECRRはこの問題を明らかにするために兵器由来ウランチーム (WDU) を提起する。

表 1 2. 1 劣化ウラン中においてU-238からU-234までの壊変によって生じる娘核種の比放射能 (MBq/kg)

週	U-238 (α, γ)	Th-234 (β)	Pa-234 (β)	U-234 (α, γ)
0	12.43	0	0	0
5	12.43	7.89	7.84	0.001
10	12.43	10.77	10.75	0.004
20	12.43	12.21	12.21	0.01
30	12.43	12.4	12.4	0.017

その高い密度 (金属で 19 g/cm^3 、酸化物で 10.96 g/cm^3) とその金属が自然発火性 (大気中で燃える) であるために、その物質は装甲貫通弾やミサイル先端部、徹甲弾として用いられる。それは航空機のバラスト材としても用いられている (例えば、ヘリコプターの回転翼、商用旅客機のカウンタウエイト/平衡錘)。兵器としては、着弾時にDUは燃焼して、異なった実験結果や標的からの距離に依存するが、平均直径がおよそ $1,000 \text{ nm}$ (1マイクロメートル) から 100 nm 未満の酸化ウランのセラミック粒子の微細なエアロゾルになる。これらの粒子は環境中で (そして組織中で) 長くとどまり、着弾位置から数千マイルも移動する (Busby & Morgan 2005)。それらは大気中に再び浮遊し、攻撃地点からかなり離れた地点のカーエアコンのフィルターからも見つかっており、呼吸される。 1000 nm 以下と、それらの直径は非常に小さいので、それらは肺からリンパ系に侵入することができる、そして原理的には、身体のいたるところに寄宿する。こうしてそれらは同じ箇所数年間にわたって留まる。そのようなウラン粒子の生物学的半減期は知られていないが非常に長い。動物実験によるとそれは13年以上である (Royal Society 2001)。

一発のアブラム120ミリ戦車弾は、およそ 3 kg のDUを含み (111 MBq の放射能に相当)、 30 mm GAU3A-Aサンダーボルト・ガトリング銃弾には 275 g が含まれている。これらの軍用品は第1次湾岸戦争で使用された。より最近になって巡航ミサイルや地中貫通爆弾の弾頭に使われているという証拠が明らかになっているが、それぞれが1トンまでのウランを内包している。2003年の第2次湾岸戦争で使用されたウランの量は $1,700 \text{ トン}$ に達する (Al Ani & Baker 2009)。

軍事用貫通弾は硬い標的との衝突において約 80% の変換効率で「セラミック」の性質を持った直径数ミクロンのウラン酸化物粒子になる。ウラン酸化物である UO_2 や U_3O_8 は非常に不溶解性であるので、これらの粒子は移動性に富んでおり環境中で極めて長く活動

する。それらは吸引されそのサブミクロン直径の粒子は肺からリンパ系に移動し、気管や気管支のリンパ節に滞留し、それらに対してマクロファージは機能しないので体のあらゆる部分を循環する可能性がある (Kalinich *et al.* 2002)。それらは皮膚やほとんどのガスマスクのフィルターを透過することができる。これらの粒子からのアルファやベータ壊変によって、極めて高く繰り返される線量がその壊変からの飛程ないの細胞にもたらされる、すなわちアルファ線の飛程は約30ミクロンであり、ベータ線のそれはおよそ450ミクロンである。DUの着弾による初期の ($t=0$ における) 粒子サイズの分散は、合衆国のアベルディーン基地においてグリスメイヤーらによって特別なカルケード・インパクト捕集器を用いて得られた (Glissmeyer *et al.* 1979)。標的の背後において捕集された平均の幾何学的直径は0.8マイクロ ($0.8 \mu\text{m} = 800 \text{ nm}$) であった。最近になって欧州連合SHER2010年報告書は、粒子の31%は0.18マイクロ ($0.18 \mu\text{m} = 180 \text{ nm}$) 以下の直径であると述べている。このサイズの粒子は実際的には気体状であり皮膚を通過し身体のあらゆる箇所へ浸透する。そのような凝縮した形態はこれまで存在しておらず研究もなされてきていないので、ウラン被ばくに関する歴史的な研究と比較することが不可能である：これらは新規に評価しなければならない全く新しい被ばくである。

DUが採用されたのは、その兵器がキモをつぶすほど上手く機能し、戦車とその装甲を無力化し、軍事作戦に革命をもたらしたことが理由である。加えて、その使用は原子力産業が、他の方法では廃棄に費用を要する、廃棄物から逃れる道筋を表している。しかしそのマイナス面はその物質が見境のない放射線障害を明らか引き起こしていることである：戦場はどんどん汚染されており市民が被ばくにさらされている。

ウランがモデル化されているよりもはるかに遺伝子毒性であるという証拠を別にすれば、それを以下に概観するが、すぐさま放射能の量が議論になる。土壌中に含まれる天然ウランの平均濃度は10~20 Bq/kgであり、ここでは全てのウラン同位体を含めている。食物や飲料水中の天然ウランの吸収の結果として、尿中における平均的なウランの排出は10 nBq/l以下である (英国の事例)。コソボでは、純DUはキログラム当たり12.4 MBqのU-238を含んでおり、国連環境計画 (UNEP) の分析ではいくつかの土壌サンプルは250,000 Bq/kgであった (UNEP 2001, Annex)。第1次湾岸戦争で用いられた350トンのDUは、4.3 TBq ($4.3 \times 10^{12} \text{ Bq}$) のウランのアルファ放射能を意味する (娘核種のベータ線を含めると $13.0 \times 10^{12} \text{ Bq}$ である)。2003年の戦争で用いられた1,700トンは、63 TBqの放射能が人々が暮らす100 km²の地域にまき散らされたことを意味する。したがって放射能の平均密度は、630,000 Bq/m²である。これらの総和は啓示的でありまとめて表1 2. 2に示す。

全体的な放射能汚染状況を描くためのある比較を見いだすことは可能である。アルファ放射体であり環境中で長く生き続けるウラン粒子は、セラフィールドから放出された放射性核種でアイリッシュ海の主な汚染物質であるプルトニウム-239と比較することができる。環境中のプルトニウムもまたサブミクロンサイズの酸化物の形態で存在する。表1 2. 3にそれらの比較を行っている。

DUと同様に、これらのプルトニウム酸化物は長寿命であり移動性である。セラフィールドから放出されたプルトニウムは、英国各地の検死の試料で計測されており、セラフィールドから同緯度の100 km離れたイングランド東海岸までは羊においてその濃度が距離とともに低下しており、10代の子供の抜歯においてもその敷地から南東のイングランドにおいて200 kmについて濃度の低下が確認されている。U-238は45億年という非常に長い半減期を持っているので、その2万4千年というより短い寿命のために、Pu-239の比放射能は非常に高く、2.3 TBq/kgに達している。しかしこのことは350トンのDU (すなわち4.30 TBq

のU-238)は(放射線の量という)放射能においては、2 kgのプルトニウム-239と等価であることを意味する。居住区に対して2 kgのプルトニウムを意図的にまき散らすということの倫理的な重大さについては容易に想像できる。

表 1 2 . 2 第 1 次及び第 2 次湾岸戦争とコソボ紛争において使用された劣化ウランDU による、U-238とベータ壊変する娘核種のPa-234mとTh-234からの寄与を含む、平均付着放射能密度とその他の放射能汚染との比較

事象	放出放射能あるいは沈着評価量	平均放射能密度 Bq/m ² (面積)
コソボでのDU 10トン	0.37 TBq	3,700
イラク (1次)での350トン	13 TBq	130,000 (100 km ² 内に)
イラク (2次)での1700トン	63 TBq	630,000 (100 km ² 内に)
北半球における北緯50度から60度におけるストロンチウム-90 (Sr-90) (UNSCEAR 2000)	73.9 PBq	460
チェルノブイリの強制避難区域30 km圏での測定値 Sr-90 (IAEA)		37,000 から 111,000 以上
英国ウェールズ北部の羊の放射能汚染制限値 セシウム-137 (Cs-137)		15,000 から 30,000
UNSCEAR による汚染地域の定義 (Cs-137)		> 37,000
セラフィールドから放出されアイリッシュ海に蓄積したプルトニウム 1952 - 1996 (Busby, 1995)	1,350 TBq	20,000

表 1 2 . 3 環境中のPu-239とU-238の比較

	ウランU-238	プルトニウムPu-239
環境における化学形態	0.2-2 μm 酸化物粒子	0.2-2 μm 酸化物粒子
物質の密度 g/cm ³	(UO ₂) 10.9 ; (U ₃ O ₈) 8.3	(PuO ₂) 11.46
溶解性	不溶解性	不溶解性
環境での寿命	長寿命	長寿命
主たる放出放射線	アルファ + ベータ + ベータ	アルファ
アルファ線エネルギー	4.19 MeV	5.15 MeV
半減期	45.1 億年	2万4400年
比放射能	37.2 MBq/kg (α+β)	2.3 TBq/kg (α)
主な汚染源	DU	セラフィールドのような再処理工場
放射能が同じになる質量	175 tons	1 kg

第12.3節 ウランへの被ばくがもたらす損害の証拠

兵器が生み出すウラン酸化物のナノ粒子への被ばくは、ウランのバックグラウンド放射線が高い地域に住んでる人々や、ウラン鉱山の鉱夫や技師として働く人のウランへの被ばくの損害と同じ種類のものではない。それらの被ばくは性質やあり方が全く異なっている。

ウラン鉱山におけるダストへの鉱夫の被ばくで吸入する粒子を比較すると、それらはウラン濃度がずっと低く、また、サイズはかなり大きい。湾岸戦争における退役軍人や住民の場合には、ウランはほとんど純粋なものであった。ウラン兵器における被ばくにおいては組織内の局所線量と濃度は何千倍も高く、そして、その極めて小さい粒子サイズのために、ウランは肺を通じて、あるいは鼻からは直接的に中脳に、皮膚を通じても、すなわち全く進化的とも言える新しい経路を通じて体内に素早く取り込まれてしまう。そのナノ粒子は個々の細胞内にも侵入する。したがってDNAの存在する細胞の中で最も高い濃度の状態が生まれ、そしてその濃度は血液の供給蓄積部に向かって低下するという、食物からウランに汚染した溶液を摂取した場合に起こることとは反対のことが生じる。ウランの尿中排泄物あるいは血液中の濃度を比較して同様な被ばくのレベルの見当をつけようとして、平均的な線量換算係数にしたがって計算するというやり方は、この理由のために根拠薄弱となる。外部からの放射線と内部からの放射線とを比較して関係づけようとするこれ以外のあらゆる諸々の場合と同様に、これもひとつの問題のある平均化である。しかしながら、そこには重複するところもあるので、兵器由来ウラン (WDU: Weapons Derived Uranium) の被ばくは、他のタイプのウラン被ばくとも並行して考察する。我々は多くの影響が発見されることを予期できるが、WDUについて言えば、はっきりとしているものではない。上に述べた警告 (*caveat*) に留意しなければならない。

第12.3.1節 健康への効果：疫学

ウランは第一義的に遺伝子毒性 (*genotoxic*) である。ウランへの被ばくは遺伝子の変異やゲノムの変異をもたらし、ほ乳類のほとんどの組織に強い影響を与える。特に標的として問題になるのが腎臓であり、脳であり、そして生殖器系である。ウランへの被ばくに関係する症状の一覧は、アブ・クアレとアダブ-ドニア (Abu Quare & Abou-Donia 2002) そしてクラフトら (Craft *et al* 2004) によって与えられている。ロザリー・バーテルは、2005年の報告においてその分野を概観し、知られているところと最近になって数多くの著者が国連レポート (UNIDIR 2008) にある問題に関して議論しているところとのギャップに注意を喚起した (Bertell 2005)。

ウラン兵器のエアロゾルへの被ばくによる催奇形性 (*teratogenicity*) は、ヒンディンらによってレビューされている (Hindin *et al.* 2005)。第1次及び第2次湾岸戦争に続くイラクにおける子供らの先天性欠損 (*congenital defect*) についての数多くの報告は (例えば、Hamburg 2003)、WHOやその他の責任当局によるいかなる研究によっても追跡されていない。報告されているウランへの被ばくに関係する主な疾患と症状について表12.4にまとめる。

どのような集団に対してもウランへの被ばくが甚大な影響を与えているのは明らかであり、その影響は全ての疾患の範囲に広がっている。

これにも関わらず、ウラン兵器による被ばく汚染について疫学研究は本当に行われてきていない。ひとつの例外は、イタリア軍当局の要請によって実施されたバルカンの平和維持軍内での発がんの研究である。その最初の報告ではボスニアとコソボに駐在した平和維持軍の間に白血病の有意な過剰 (8倍に相当) が示された (Italian report 2001)。より最近の調査では主としてボスニアに駐屯した人たちから見つかっており、その相対リスクは約14倍超であった。その最新の状況については秘密にされたままである；報告によるとこのコホートにおけるガンの水準は驚くほど高く検査が続けられている。議会質問によって第一次湾岸戦争に参戦した英国の退役軍人の間で白血病が増えているというデータが出て

きたにも関わらず、英国と合衆国の退役軍人の間でガンや先天的障害についての責任ある研究は公表されていない。最近、英国で行われた検死陪審によって湾岸戦争の英国人退役軍人であるスチュアート・ダイソン (Stuart Dyson) がイラクでの劣化ウラン被ばくを原因とする大腸がんによって死亡したことが明らかになったことを、担当大臣が英国検死法 (UK Coroners Act) 第43条にしたがって公表した (Dyson 2009)。証拠についてはECRRそして英国国防省の科学者から採用されたが、当陪審がその被ばくによって生じたガンであると確信したのは明らかであった。

表 1 2 . 4 ウランへの被ばくに関係すると報告されている疾患と症状

突然変異誘発物質：生殖器：催奇形性と遺伝子毒性；受胎率の低下、流産、子供における遺伝的欠陥、死産、小児がんと小児白血病、を引き起こす。ヒトと動物が反応する疑似エストロゲン。
突然変異誘発物質：被ばくしたヒトと動物及びそれらの子孫にガンや白血病が増加。
腎臓病一般、100 ng/g以下の濃度で健康問題、腎糸球体及び尿細管障害、腫瘍化変異、クレアチニンレベルの線量による変化、腎糸球体構造の変化、IgE腎症とIgG腎症、持続性の構造及び機能障害
血液：細胞毒性及び白血病誘発性；赤血球の減少。
脳：脳を標的とし脳深部と脳幹機能の損傷に関係する広汎な影響を引き起こす。心理検査に現れる影響。湾岸戦争症候群の基礎。兵器由来ウラン粒子は鼻から直接中脳に侵入する。
集中：カルシウムと同じ親和性を持つウラニルイオンとして循環するので、DNAや神経組織、骨、精子に結合し標的とする。このためにほとんどの組織が影響される（細胞内のエネルギー転換に影響するミトコンドリアDNA）。
ウランに被ばくした人たちに染色体異常を確認；その効果はICRPの外部被ばくに対して計算された線量との釣り合いはなかった。
突然変異誘発物質：ウランの上に居住するナバホ族で網膜芽腫の発症率が最大。追跡調査：セラフィールドの労働者の子孫やウランで汚染されたロサンゼルス近くのロケットダイン工場周辺でも発症率が高い。
突然変異誘発物質：男性ウラン鉱夫の子孫に見られる性比の効果。炎症：ウラン工場における酸化ストレスに関係する。
発がん物質：BNFLの燃料製造労働者におけるガンの増加

ボスニアのサラエボからのガンデータが報告されており、多くの地域においてガンの発症率が顕著に（最大で20倍）増加していることが示されている (Hamburg 2003)。ギリシャにおける子宮頸管がん (cervical cancer) のコホート研究は、子宮頸管塗抹標本 (cervical smear) の医学検査結果で示されたこととしてウランのエアロゾルへの被ばくが統計的に有意な発症率上昇の原因であると結論した (Papathanasiou *et al.* 2005)。1991年と2003年終わりの爆撃後のイラクにおける高いレベルの発がんについて数多くの報告があるが、系統的な研究は出されていない。マクダミードら (McDiarmid *et al.* 2002) による初期の研究では第一次湾岸戦争の合衆国退役軍人のガンのリスクが高くなったという証拠は見つかっていないが、（一般に湾岸戦争症候群と呼ばれる）多くの病気の症状が報告された。

湾岸戦争症候群そのものは、ロス・ペロー (Ross Perot) 出資された、合衆国のハーレイらによる精巧な因子分析 (Factor Analysis) において分析された (Haley *et al.* 2000)。症候群は多くの症状を網羅しており、英国では軍とその顧問らは問題をストレスのせいに行っているが、ハーレイはそれらが共通して脳幹と脳下部のハウスキーピング機能（訳注：恒常的に細胞で発現ないし機能している機能）の損傷がもたらしている結果であることを明

らかにした。ハーレイは合衆国退役軍人の磁気共鳴像のケースコントロール研究によってこれが事実であることを示そうとした。P-31とH-1を対象にした研究によって脳のハウスキーパー機能に関連する脳内細胞の生存率の著しい低下、すなわち湾岸戦争症候群そのものであることが示された。ハーレイはウランによる脳と脳下部の攻撃について気づいていないが、彼が発見したのは有機リン酸塩の被ばく影響だと主張した。しかしながら、ハーレイの研究から数年後に実施された研究によって脳のこの領域がウランによって激しい攻撃を受けることを示した、そして、吸引されたウランは脳のこの領域に嗅脳 (olfactory lobe) を通じて直接達したのが事実であることを示した (以下を参照)。

イラクの状況は深刻になっている：被ばくしたウランの遺伝子毒性によってガンや先天性疾患 (congenital disease) が増加した。これは1998年のIAEAの総会において報告され、アル・アニ (Al Ani) とベイカー (Baker) によって包括的に概観されている (Al Ani & Baker, 2009)。同じ報告の中に、これらの著者はウランによって汚染されたイラクのそのような地方において遺伝性疾患やゲノムベースの疾患が増加しているという他の証拠を概観し、また、汚染のレベルや健康指標を報告する数多くの研究を引用している。しかしながら、これらの報告は全くリスク評価機関によって検討されなかったし、それに加えて、その問題を精査するためにイラクの住民に対する西側主導の研究もない。本委員会はイラクにおけるガンと先天性出生欠損 (congenital birth defects) についての調査に現在従事している。

英国のスプリングフィールド燃料工場におけるえ統計的に有意なウランの影響が報告されている (McGeoghegan & Binks 2000)。ウランの被ばくと結びつく強い結合関係がホジキンスリンパ腫と非ホジキンスリンパ腫にあると報告されたが、著者は吸収線量が低すぎるので因果関係のある関係とは考えていない。

第12.3.2節 遺伝的損害：染色体異常

染色体異常分析は電離放射線への初期被ばくの日印として使用できる。実際、低LETなのか高LETなのかといった放射線の種類についての仮定をして (二動原体や環といった、染色体異常の種類に基づけば)、線量を再構成することも可能である (Hoffman & Schmitz Feuerhake 1999)。

ザイール (Zaire) らによってナミビアのウラン鉱夫における予期しない高いレベルの染色体異常が報告された (Zaire *et al.* 1997)。湾岸戦争症候群に苦しんでいる一連の湾岸戦争退役軍人の染色体異常についても研究もシュレーダーらによって行われた (Schroeder *et al.* 1999)。結果を見ると、その損害はおおよそ150 mSvの初期被ばくに相当するレベルを示したが、検査を受けたこれらの退役軍人らは預託線量で100 mSvを上回る被ばくを劣化ウランから受けてはいなかった (訳注：預託線量は50年間の累積線量を示す。)。これらの研究からウランの被ばくについての線量計算にはおおよそ1000倍の誤りがあることが示された。染色体異常はおおよそ2年間の半減期で身体から消えてゆくが、湾岸戦争退役軍人らは被ばくから10年間を経てこの損害を示した事実注意到注意を払うべきである、これはウランの生理蓄積物が長寿命であることを示唆している。2001年に王立協会は、ある種のウランの身体内における半減期は10年以上でありおそらく無期限であると見なせるとする見方を支持する文献を引用した。染色体異常は、被ばくからおおよそ40年後の (実験場ではウランにも被ばくした) ニュージーランドの核実験退役軍人のケースコントロール研究においても発見された。

ボスニアにおける染色体異常分析では、ある生態学研究において有意なウランへの被ばく影響を見いだしている (Ibrulj *et al.* 2007)。その研究は、NATOがウラン弾を含めて砲

撃した（そして2002年にUNEPの測定でウランの存在が示された）ハジチ（Hadzici）の住民とほとんど被ばくしていない参照地域とに別れた双方から、84人の個人について末梢リンパ球（peripheral lymphocyte）を調査している。結果によると、砲撃から数年が経過した2007年に、被ばくした集団に統計的に有意な染色体異常の増加が示された。ウランに被ばくした同じ集団には末梢リンパ球の小核（micronuclei）もまた増加していた（Ibrulj *et al.* 2004）。

ボスニアのハジチはウラン兵器に被ばくした人たちの遺伝的損害を評価するためにクルニックらによって研究されている（Krunic *et al.* 2005）。著者らは過剰な末梢リンパ球中の小核をヘルツェゴヴィナ西部の参照群との比較によって示している。

細胞培養実験では、ミラーらが50 mM（200 ng/l）の劣化ウランに24時間さらしたヒトの細胞中に2動原体染色体異常と腫瘍性形質転換（neoplastic transformation）を誘導させた（Miller *et al.* 2002）。これは極めて低い濃度であり、細胞内でのアルファ線放射は確率的にあり得ない。異なったウラン同位体を使用することで比放射能に関係した効果のあることが示され、腫瘍性形質転換の頻度に放射能が役割を果たしている結論された。しかしながら、被ばく線量は低くこの結果は第6章において概要を与えた2次光電子増強の議論を支持するものであり以下において議論する。

これらの研究から次のように結論することができる：ウランへの被ばくはヒトの集団に染色体異常と小核形成をもたらすが、その際の放射線被ばくのレベルは（従来の評価では）その効果を説明するのに必要な線量の1000分の1である。同様の結果は実験室での細胞培養についての研究からも報告されている（Darolles *et al.* 2010）。著者らは極めて低い濃度レベルにおいて、細胞培養中での富化ウランと劣化ウランとの間の違いを見いだしている。基本に戻ると、富化ウランが染色体異常をもたらす一方で、劣化ウランは染色体異数性（aneuploidy）と小核形成とを引き起こした。もちろんこれは先のメカニズムの議論において暗示された2種類の作用から期待されるものである。U-235がより高い放射能を持っているので、富化ウランと劣化ウランの両方において溶液中の主要な核種はU-238のウラニル（訳注： $[\text{UO}_2]^{2+}$ ）である。したがって、そこにはかなりのU-238のウラニルと染色体との結合があることになり、リン酸塩の背骨に沿ってU-238原子が結合している位置では、光電子が放出されることで染色体が全体として破壊されるに至るのであろう。U-235の効果はしたがって、通常アルファ線飛跡の高い電離作用であって、そこでは染色体は切断され（二重鎖切断）、後に発見されるような変則的な再結合をする。著者は（フランスのIRSNに勤務しているが）U-238によって生じる染色体異数性は他のガンの誘導についての報告と関連していることを指摘しており、彼らはウランの発がん性の再評価を呼びかけている。

第12.3.3節 生殖効果と多世代間遺伝効果

ウランへの被ばくがもたらす催奇形性はヒンディンらによって概観されてきており、証拠に基づいてウランに催奇形性の危険があると結論されている（Hindin *et al.* 2005）。数多くの報告が、ウラン兵器が使用された地域から現れているが、死産や特に警告すべき通常の種類ではない先天性形質異常（congenital malformations）の規模の大きな増加が確かに続いている。それにも関わらず、責任ある西側の研究は委任も調査も何ら行われていない。英国核実験参加退役軍人の子供や孫におけるあるケースコントロール研究は、全国的参照集団と比較して、子供について9倍以上、孫について8倍の先天性症状（congenital conditions）の過剰を明らかにした（Busby & de Messieres 2007）。これらの退役軍人が主としてウラン

に被ばくした、というのは彼らのガンマ線用フィルムバッジの線量は広く知られており、分析によって相当量のウランが実験上に存在していることが示されたからである。

天然及び劣化ウランの生殖毒性 (reproductive toxicity) についてのドミンゴによるレビューは、それらをマウスに経口及び皮下に与えた場合に発育毒性 (development toxicant) を示すと結論している (Domingo, 2001)。繁殖性の低下 (decreased fertility) や胎児毒性 (embryo toxicity)、催奇形性、発育障害が生じることが示された。パラナインらは既に影響なしの線量と比べて5 mg/kg 程度の線量でマウスに発育と出生数に影響があることをしめしている (Paternain *et al.* 1989)。ゼブラフィッシュ (*danio rerio*) のふ化成功や発育、初期段階の生存に対するウランの影響に関する研究がボウラッチョらによって報告されている (Bourrachot *et al.* 2008)。著者らは、溶液中で200 – 500 mg/l (およそ3 Bq/l) の劣化ウランの範囲で研究しており、放射線ストレスよりもむしろ化学的ストレスの効果であろうと彼らが考えているところを確かめるために、比放射能の高い同位体U-233もまた使用している。両方の実験体系において最も低い被ばく量においても有意な発育効果が観察された。濃度250 mg/lにおいて、ふ化時間の中央値が、参照群に対して43%低下した。この濃度の劣化ウランで15日間被ばくすると幼魚の段階で (at the pro-larval stage) 100%が死んだ。放射能がより強いU-233はより大きな影響を与えたが、両方の同位体はこのように非常に低い濃度で効果を示した。これが生じた放射線量は消えてしまうほど低いものであり、現在のリスクモデルに基づけば害をなすものではない。

レイモンド-フィシュらは米国環境保護庁 (EPA) の基準以下の飲料水が、メスのマウスにエストロゲン受容体 (estrogen receptor) 依存反応をもたらすことを見いだした

(Raymond-Whish *et al.* 2007)。著者らは妊娠したメスのマウスに0.5 mg/lから28 mg/lの飲料水で被ばくさせ、一次卵胞 (primary follicles) の選択的減少、子宮重量 (uterine weight) 増加、子宮内腔上皮細胞高さ (uterine luminal epithelial cell height) の増大及びその他の症状を含む、エストロゲン受容体効果を見いだした。ウランを含む水を与えたメスのマウスは形態学的には正常は子供を産んだが、それらは正常な水を与えたメスから生まれた子供に比べると、一次卵胞が少なかった。

第12.3.4節 腎臓

腎臓はウランの持つ毒性の標的であると以前から多くの研究によって認められている；初期の研究は王立協会の報告書にレビューされている (RS, 2001, 2002)。より最近ではウラン兵器による被ばくに関する憂慮に関心が移っており、研究の焦点は腎毒性

(nephrotoxic) 効果を生み出すのに要するレベルにおかれている。数多くの適切な研究を表12.5に示す。

もっとも適切で興味深いバラディらの研究では、ある範囲の腎臓の症状を示しており多くの湾岸戦争症候群の症状も有するバルカンの退役軍人に対する包括的な医学的及び理学的分析結果を与えている (Ballardie *et al.* 2008)。この男性に見られる症状の広がりをもストレスの結果であると仮定するというよりも、マンチェスター王立病院 (Manchester Royal Infirmary) とセラフィールド大学 (University of Sheffield) の医者と科学者のチームは、その原因を努力して発見するためにあらゆる分析に着手した。生体組織検査分析

(biopsy analysis) によって彼らは彼の腎臓が富化ウランによって汚染されていることを発見し、ウランはそのミトコンドリア組織に一様に散在していた。重金属キレート剤処理は治療の作用があった。これは湾岸戦争とバルカンの退役軍人らの病の原因に関する議論に

おける主要な証拠部分であり、先に述べた湾岸戦争症候群に苦しみ大腸がんによる早すぎる死を迎えたスチュアート・ダイソンの検死官による検死の因果関係に関する陪審員を説得させるにおいて重大であった。

表 12. 5 腎臓の構造と機能に及ぼすウランの効果についての最近の関連する研究

研究	結果
Prat <i>et al</i> 2005	ウランへ被ばく後に18組の腎臓が調節解除したのを確認；カルシウムの通路が高度に関係していた；腎芽腫細胞腫 (nephroblastoma) 遺伝子が関係。
Berradi <i>et al</i> 2008	ラットを40 mg/lのDU溶液中で9ヶ月被ばく。腎臓悪化と赤血球数の減少 (腎性貧血)。
Goldman <i>et al</i> 2006	ラットの腎臓でDUが周辺の小胞を払いのける効果を確認。タンパク質中140 mg/mg のウラニルがグルコースの輸送を阻害。
McClain <i>et al</i> 2002	ゲッ歯動物にDU (榴散弾) の小片を埋め込んだ効果。埋め込んだ位置から離れた骨や腎臓、筋肉、肝臓にその小片起源のウランを発見。ラットの海馬中の神経生理学的パラメータを変化、胎盤のバリアを透過、胎児の組織に侵入、の変化。埋め込みから6ヶ月後で生まれるゲッ歯動物のサイズが小さくなった。適応を示唆する腎臓効果は見られず。
Fukuda <i>et al</i> 2006	体重あたり0.2、1、2 mg/gでウランを被ばくさせたラットの毒性及び生化学指標。低い線量で骨や腎臓における多くの指標に測定可能な変化。
Zhu <i>et al</i> 2008	外科的にウラン片を埋め込んだラットにおける長期にわたる慢性被ばくで腎機能障害 (Renal dysfunction)。
Zimmerman <i>et al</i> 2007	体重あたり0.1、0.3、1.02 mg/gで一回注入したラットにおける臨床化学的及び微視的な腎作用。全ての線量で腎毒性。

第12.3.5節 脳

脳に対するウランの効果は最近になってのみ現れてきた。既に概観してきたように、ハーレイらの研究は脳下部の機能と湾岸戦争症候群の症状の広がりとの結合関係を実証した。ウラン兵器起源のエアロゾルによるウランのナノ粒子の吸入には、鼻腔 (nasal passages) と嗅球 (olfactory bulb) との生理的接続を通じて直接的に脳下部に通じるルートが用意されている。フランスにおける研究 (IESNほか) はおそらくウランの神経組織への集積を見いだした最初の研究であり、おそらくはカルシウムイオンCa⁺⁺にウラニルがよく似ているために、親和性があると見られる。フランスのIRSNのモンローらは吸入被ばくさせたラットの脳内部でのウラン濃度は次の溶であったことを示した：嗅球>海馬>前頭部皮質>小脳。ウランは通常であれば低腸伝達因子 (low gut transfer factor) のために身体の新システムから排除される (Monleau *et al.* 2005)。進化論的に純粋なウランが環境中に存在したような時期はかつてなかったし、ウラン鉱山においてはダスト中のウラン濃度は非常に低いためにウラン鉱夫であっても同様な程度では被ばくしてきていない。最近の研究の一覧を表12. 6に示す。

レスタエバルらの研究によれば腎毒性が無いレベルにおいても、注入によって体重あたり144 mg/kgで被ばくさせたラットの挙動における観察可能な変化が存在する。まとめると、これらの研究は湾岸戦争症候群はマイクログラムのウランを吸入した効果であり、その物質の異常なまでの神経毒性 (neurotoxicity) への注意を喚起している。

表 1 2 . 6 ウランの神経学的効果についての最近の研究

研究	結果
Monleau <i>et al</i> 2005 IRSN, France	ラットによるウランの吸入。脳内部のウラン濃度：嗅球>海馬>前頭部皮質>小脳。 行動上の変化を示す。
Barillet <i>et al</i> 2007 IRSN, France	水中でU-238とU-235に被ばくした成魚の雄のゼブラフィッシュに酸化ストレスと神経毒性。両方の同位体への被ばくにおいて酸化ストレスと神経生理学的変化（アセチルコリンAChの増加）。
Pellmar <i>et al</i> 1999	ラットに埋め込んだ劣化ウラン片が海馬切片（hippocampal slice）に電気生理学的（electrophysiological）変化をもたらす。
McDiarmid <i>et al</i> 1999	湾岸戦争退役軍人の研究で、生殖システムの機能と中枢神経システムの機能にわずかな効果を発見。
Briner and Murray 2005	劣化ウランを含んだ水をラットに75ないし150 mg/lで与えた。2週間後に行動上の変化；脂質酸化の増加
Lestaeval <i>et al</i> 2005 IRSN France	劣化ウラン被ばくに脳が攻撃を受ける。ラットに144 µg/kg注入すると腎臓でのレベルは2.6 µg/g。このレベルは通常は腎毒性以下の線量であるだろう。しかしながら、これによって食物摂取減少と睡眠サイクル障害をもたらされた。
Barber <i>et al</i> 2005	体重あたり1 mg/gを腹腔内に注入したラットの脳内の短期間のキネティクス。ウランは脳内に素早く侵入し最初海馬と線条体（striatum）に濃縮。排出はおそい；7日後海馬や小脳、大脳皮質の濃度は依然として高かった。

第12.4節 動物実験と培養細胞、メカニズム

吸収線量と日本の原爆被ばく集団から選ばれたガンのリスク係数を採用する、ICRPモデルに基づく机上の解析（Royal Society, WHO, SHER, RAND, ATSDR等）は、観察結果を予測しないので放棄しなければならない。ウランへの被ばくは明らかに大きくより危険なものである。細胞培養や動物実験はそこに含まれているメカニズムを開発し理解するための有益な情報をもたらしてきている。それら全ての研究に示されているのは、ウランの内部被ばくは、それが微粒子の形態であってもまたイオンの形態であっても、それ本来が有する固有の放射能に基づくよりも、あたかもかなりの程度より高い放射能を有しているかのように作用しているように見える。したがってU-238に被ばくすると、酸化ストレスやゲノム不安定性、染色体損傷、小核形成、そして電離放射線被ばくのあらゆる結果が引き起こされるが、いくつかの実験においては核壊変が少なすぎるために確率的に放射線被ばくがない低い濃度であっても、そのような作用が生じている。この発見は様々に解釈されてきた、化学的突然変異誘発効果や重金属効果、放射線と化学作用とのシナジーなど。もちろんひとつの再発見はウラニルイオン（ UO_2^{++} ）のカルシウムイオン（ Ca^{++} ）サイトへの親和性であり、これは1960年代には知られており、この物質が電子顕微鏡用の染色剤として使われはじめていた。その親和定数は1992年にネールソンらのエレガントな流体実験によって測定されており、 $10^{10}M^{-1}$ のオーダーであった（Nielsen *et al.* 1992）。これは質量作用平衡項について、極めて低い濃度において（100 ng/l）、相当量のウランがDNAの背骨であるリン酸塩に結合していることを示唆しているだろう。これはここで概観している生物学的効果の実験による観察とよく一致しているように思われる。ECRRモデルはDNAに結合する放射性核種（ストロンチウムSr-90、バリウムBa-140）に特別の注意を払っており、それはそれらのベータ線放射体がDNAの中で崩壊し、それらの電荷を変化させ、イオンと場

合によってはオージェ電子を生み出しながら、放射性の娘核種に転換するからである。電荷の変化だけでもDNA上にひとつの電離を引き起こす。したがってウランはこの範疇に入るものであり、荷重する結果となる（第6章参照）。

しかしウランは高い原子番号を持っているという事実もまたあるので、したがって自然バックグラウンドのガンマ線を増幅する（そして混合物の中では、他のウラン同位体からの光子放射線に加えて、自体が光子放射線を生み出す）。委員会の結論は、そのようなメカニズムによって本章とこの節で概観した数多くの異常な発見を自然に説明することができるということである。この増強の程度については実験的な分析を待たなければならないが、このような実験は回りくどいものではなく、ウランと様々なエネルギーを持ったX線による同時の照射が含まれる。希薄なウラニル塩をX線の増強剤に使用することは、ガンの放射線治療を目的とする2007年の英国特許申請に示唆された（Busby 2008）。その研究によると200 mMあるいは84 ng/lにおいて著しい結合が試験管内で生じることは明らかである。この濃度は現在においては毒性であるとは見なされていないが、同じ程度のものが多くの飲み水や湾岸戦争退役軍人の尿中に見られる。

イオンと粒子の双方の形態におけるウランの異常な増強についてのメカニズムの問題に関連しているいくつかの研究を表12.7に示す。

表12.7 異常な危険性の可能なメカニズムに関する情報を与える細胞培養と動物実験におけるウラン効果の研究

研究	結果
Gueguen <i>et al</i> 2007	ラットの薬物代謝がDU被ばくの後に変化； CYPチトクロームP450酵素の発現誘起。
Miller <i>et al</i> 2005	DUペレットに内部被ばくしたマウスの造血細胞の白血球変異。
Miller <i>et al</i> 1998	DUへの被ばく後にヒトの造骨細胞が腫瘍性に変化；0.0014%の細胞がアルファ線にヒット。放射線効果の無いことを示唆する。
Miller <i>et al</i> 2002	ウランとタンゲステンがともにヒトの造骨細胞系中の小核と腫瘍発生形質転換を誘導し得ることを示した。
Yang <i>et al</i> 2002	ウランへの被ばくでヒトの気管支上皮細胞が悪性転換；DUは試験管内で発がんを示す。
Kalinich <i>et al</i> 2002	マウスのマクロファージにDUがアポトーシスを誘導。
Gueguen <i>et al</i> 2006	肝臓の新陳代謝酵素にウランの肝臓作用効果。
Pariyakaruppan <i>et al</i> 2006	肺の上皮細胞にウランが酸化ストレスを誘導。
Grignard <i>et al</i> 2008	ラットのステロイド代謝に劣化ウランと富化ウランの汚染が異なる効果。
Tissandie <i>et al</i> 2006	短期間のDU被ばくがラットのビタミンD代謝に効果。
Yazzie <i>et al</i> 2003	アスコルビン酸塩が存在する下で試験管内で、酢酸ウラニルがDNAの単鎖切断を誘導。DNAへの親和性はスコルビン酸塩よりも強いことを示唆。
Busby 2005a	DNAリン酸塩に結合したウランの2次光電子効果を提案し定量化を試みる。DNAに対するウラニルの親和性に注意を促す。
Busby 2005b	ウラン粒子に対して上記を提案。
Stearns <i>et al</i> 2005	200 μM (80 ng/l)においてチャイニーズ・ハムスターの卵巣細胞にhprt変異とDNA結合体を誘導。

Busby and Schung 2008	観察された効果の説明としてイオンの形態にあるウランのSPEについて考察
Elsaesser <i>et al</i> 2007	異なるサイズのウランと金、水のナノ粒子のモンテカルロ計算によってSPEによる増強を確認。
Wan <i>et al</i> 2006	劣化ウランの試験化内の免疫毒性：マウスのマクロファージへの効果。50と100 μM 。マクロファージの活動度が200 μM の2時間で変化。
Pattison <i>et al</i> 2008	組織中のウラン粒子のモンテカルロ計算でSPE効果が「顕著である」がBusbyによって提案されたものよりも低いことを確認。
Hahn <i>et al</i> 2002	埋め込んだDU片がラットの筋肉中の軟部組織肉腫を誘導。
Darolles <i>et al</i> 2010	劣化ウランと富化腐乱の異なった毒物学的プロファイル：U-235は染色体異常をもたらす（アルファ線）、U-238は染色体異数性をもたらす（光電子毒性がこの広がりの説明する）。

第12.5節 結論

ウランは放射線リスクに対する物理学ベースのアプローチがもたらすECRR2003が注意を喚起してきた問題についてのひとつの完璧な例であると結論する必要がある。ICRPにしたがって吸収線量の見地から線量が計算される時、環境中に通常見つかるウランの量は、自然のバックグラウンド放射線と比較すると非常に低い線量を与える、そして原爆の被ばく集団のガンに関連するレベルと比較してもかなり低い。しかしこのアプローチでは誤りが膨大なものになるのは明らかであり、というのはそれは次の学問を避けている、より正確には、化学についても、生物学についても、生理学についても、薬理学についても何も知らないからである。このような科学は、ある深く哲学的で情緒的であると感じられる流儀において（何れにしても物理学者によって）、歴史的に物理学や数学よりも重要性が低いと見なされてきた。これは合理的な分析における欠陥である：それはそのデータと同じくらい優れているだけであり、そうだとした場合、問題を解くためには、解が主張することのできるレベルを下げなければならず、その答えはしばしば間違っている。

本委員会はひとつの現実的な答えを提示することでこの極めて現実的な問題を扱わなければならなかった；この場合にはその解とはウランの被ばくを通常のバックグラウンドレベル（100 nGy/h）を1000倍に荷重することである。これは2次光電子効果の実験結果が使える段階になれば改訂されるだろう。ウランの効果が広い範囲にあることは明らかであり、ウランの被ばくの遺伝的効果のみを考察するのは全くの間違いであろう。異なったタイプの被ばくには異なった範囲の症状が現れるだろう。

体内のウランがもたらす伝統的なリスク評価においては、基本的に外部被ばくとの比較であって、その誤りは他のどのような物質よりも議論してきたようにより大きなものである。ウランのエアロゾルはあたかもそれが無限に大きな生物学的影響を持っているとして扱うべき十分な証拠が今では存在している。したがって本委員会は、例えリスク係数が観察結果を近似するために荷重によって改訂されているとしても、ウランに被ばくした集団や個人における因果関係を評価するためのリスク係数の使用は、極めて厳しい注意を持ってなされるべきだと確信している。もしもウランへの被ばくの後にある病気や症状、あるいは、何らかの遺伝的影響が増加しているように見るとすれば、その被ばく前後の集

団の線量の違いの大きさや、被ばくした集団と被ばくしていない集団との線量の違いの大きさに関わらず、因果関係を認めるべきである。