

放射能汚染地の減価率に関する検討

株式会社アースプレイザル 山縣 滋

論文要旨

(背景および目的)

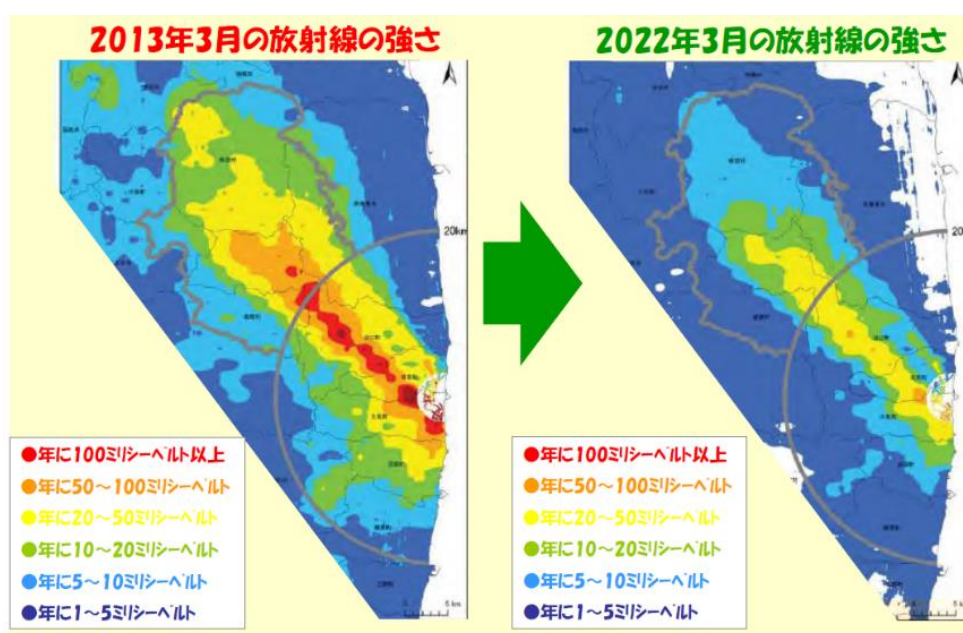
平成 23 年 3 月 11 日に勃発した東日本大震災(以下「震災」という)から 5 年が経過した。この震災では死者・行方不明者合計で 1.8 万人余に達する人的被害をもたらし、その経済的損失は 26 兆円にも上り、いまだに約 17.4 万人が避難生活を余儀なくされている。

また、この地震による津波で福島第 1 原子力発電所は炉心溶融により、大量の放射性物質が飛散された。そのため、周辺圏内は災害対策法に基づく避難指示地域に指定され、現在も立ち入りが制限されている。

この震災では人的・物理的にも様々な被害を被ったわけであるが、最も大きな被害をもたらしたのは環境的被害、即ち、放射能汚染であろう。なぜなら、通常の物理的被害は時間と資金をつぎ込めば復旧可能であるが、放射能汚染については目には見えないもののその健康被害の程度は命に係わるまでに深刻であり、また、その影響が広範囲でかつ、消滅するまでに途方もない時間が必要であるとみられているからである。

本稿ではこの放射能汚染問題の根源である放射能についての基礎知識とその影響及び除染対策を俯瞰するとともに、放射能が残存することでの地価への影響について放射能汚染のない地域と比較してどの程度の減価率が妥当かを検討することとしたものである。

放射性物質は同心円状に拡散されているものではなく、事故当時の風向きにより原発から北西方向に拡散しており、地表面においてセシウム ^{137}Cs , ^{134}Cs が 60 万 Bq 以上の高濃度に蓄積した汚染地域は 800 平方 km^2 に及ぶといわれている。さらにその外周部においても日本人の年間平均放射線被曝量 1.5mSv を超える汚染地域は更に広範囲にわたっているものと推測され、その影響は下図の通り今後数十年に及ぶものと推定されている。



出所：環境省 HP

(計算ロジック)

政府は平成 23 年 8 月から除染作業を行っており、年間線量が 20mSv 以下の地域では一定の成果を収めているが、それ以上の高線量の地域ではその効果は限定的である。

地域格差は現在の線量が多いほど減価が大きくなるはずで追加的被曝が年間 1mSv にまで減衰するまでの間の時間的価値が減価の本質と考え、その計算の前提条件を次のように組み立てた。

線量減衰計算前提条件

計算前提条件	核種	Cs134	Cs137	=10.0 合計 =3.7 合計 Bq(原子力保安院推定) (東京電力発表値)
	吸収線量率	7.3	2.7	
	相対強度	2.7	1	
	半減期	2.0648	30.1671	
	排出量	1.8×10^{16}	1.5×10^{16}	
	排出比率	1	1	
	リスクフリーレート	0.01085	=y	

計算ロジックとしては次の通りである。即ち、現在放射性物質として測定されるのはセシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs の二つであるが、ここで、両物質の吸収線量率の違いを考慮に入れ、更にウェザリング効果を織り込んで減衰率を計算し、これを時間的価値で割り引いて減価率を算出することとした。

これを一般化した減価率 Gn_t 計算式は次の通りである。

$$Dn_t = \left[\left({}^{134}\text{Cs}_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n_t}{T_{134}}} \times \frac{2.7}{3.7} \right) + \left({}^{137}\text{Cs}_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n_t}{T_{137}}} \times \frac{1}{3.7} \right) \right] \times (1 - Wt)$$

- Dn_t n_t 期における減衰率
- ${}^{134}\text{Cs}_0$ セシウム134の事故当初線量
- T_{134} セシウム134の半減期=2.0648年
- ${}^{137}\text{Cs}_0$ セシウム137の事故当初線量
- T_{137} セシウム137の半減期=30.1671年
- Wt 期間 t におけるウェザリング効果

この算式から国が安全圏の基準とする $ray_T \leq 2.015\text{mSv}$ となる T を求め、

$$Gn_t = \left(\frac{1}{(1 + R_f)^{n_t - n_i}} - 1 \right) \times 100$$

- Gn_t n_t 期における格差率
- R_f リスクフリーレート
- n_i 格差率を判定する期
- n_t 線量が年間2.015mSvとなる期

を計算することにより、減価率を定めようとするものである。

上記の計算結果を簡略化してまとめたのが下表の減価率表である。

線量状況別減価率表(案)

①	初期線量 T_0 mSv	200mSv	100mSv	50mSv	40mSv	30mSv	20mSv	15mSv	10mSv	5mSv	3mSv
②	今期理論値線量 T_9 mSv	67.9mSv	33.9mSv	17.0mSv	13.6mSv	10.2mSv	6.8mSv	5.1mSv	3.4mSv	1.7mSv	1.0mSv
③	同上変換 μ Sv/h	7.7 μ Sv	3.9 μ Sv	1.9 μ Sv	1.5 μ Sv	1.2 μ Sv	0.8 μ Sv	0.6 μ Sv	0.4 μ Sv	0.2 μ Sv	0.1 μ Sv
④	0.23 μ Sv/hまでの n	144n	113n	83n	74n	61n	43n	31n	14n	3n	2 $n_{年}$
⑤	0.23 μ Sv/hまでの $n-5$	139n	108n	78n	69n	56n	38n	26n	9n	0n	0n
⑥	地域減価率	-78	-69	-57	-53	-45	-34	-24	-9	0	0

この表から、たとえば現在の毎時 0.6Sv/h(当初線量 15mSV/y)の地域は汚染状況重点調査地域の解除条件を満たすまでにはあと 26 年かかることになるので、その間の割引現価と現価との差額の $\Delta 24$ が減価率ということになる。

ここで重要なことは事故発生当初の線量と現在の線量とが同じであっても、現在の線量の減衰速度は当初線量と比較して対数的に減少していくためその意味が異なるということである。

この減価率表はあまり高濃度の地域についてはほぼゼロとなってしまうので、現在年間 20mSV/y 以下の線量の地域における除染等の人為的な作業によって自然減衰速度を速めることができそうな比較的低濃度の汚染地域については十分妥当するものと考えられる。

(妥当性と限界)

この減価率表は極めて簡便なロジックによる単なる計算の域を出ないのではないかと批判もあろう。しかしながら、この減価計算は化学的法則に基づき厳密に算出された自然減衰率を基礎としており、線量推移の予測計算としての妥当性はある。また、対象は宅地地域、とりわけ主として用途的な同質性を有する住宅地域を前提にしており、この減価率表だけで減価を決定することは無理としても、汚染基準の達成されている住宅地域との地域間の放射線量による格差を推し量るのに用いるには参考程度にはなるのではないか。

減価率表は宅地のなかでも主として住宅地域を前提に作成したものであるが、林地地域についても林業の成立している地域については収益が測定できるので、妥当する局面もあろう。農地地域については作物の線量基準があるので、これをクリアしないと耕作不能であるからそのまま当てはめることはできない。但し、宅地の中でも農地地域にある農家住宅については隣接する林地と一体として利用されていることも多いので、その居住空間だけの線量で減価率を推し量ることはできない。

割引率にリスクフリーレートを用いることは不動産の収益力を反映したものではないので、低すぎはしないかという指摘もあろう。確かに収益力喪失を測定するの

であれば収益力を反映した資本コストが妥当とも考えられる。しかしながら、資本コストでは各事業者によって異なるので、一律の減価率にはならなくなるという致命的な欠陥があり、不都合である。リスクフリーレートは資産除去債務の債務現在負担を計算する割引率としても利用されており、公正性が担保されている。また、相続税財産評価基準の法令解釈通達にある平成 27 年の基準金利は 0.5～0.75% である。

減価率の根拠とした減衰率はあくまで放射性物質の化学的法則を利用した計算上のものであり、除染等の人為的な減衰効果を織り込むことができないのではないかと指摘もあろう。確かに除染作業により線量は概ね 1/4～1/5 に減少し、居住可能となった地域も多い。しかしながら、これらの地域は本来それほど線量が高くなく、自然減衰の効果も相俟って除染効果が発揮された地域で、高線量の地域については効果的な除染方法を試行している段階であり、自然減衰機能を基礎として計算することは無意味ではないであろう。

除染により剥ぎ取った表土等については長期間にわたり放射能が残存するので、その中間保管所及び最終処分場の立地が問題となっている。これは地中に残存する放射性物質を含んだ土壌が残存する土地についてはいわゆるスティグマと称される風評被害に係る減価要因もあるのではないかと考えられているからである。しかしながら、重金属などによる自然に消滅することのない土壌汚染とは異なり、放射性物質は長期間かかるが必ず消滅するものであり、その減価要因は土壌汚染よりも低率であろうと推測される

(結語)

この減価計算は放射性物質の化学的法則とその挙動に基づき算出された自然減衰率を基礎としたものであるが、実際の減衰状況を把握するには線量データの裏付けが必要である。この点、各種のモニタリングデータが存在するが、これらのデータを一括集約して地域別・時系列に整理することと、除染効果の測定を継続的に行っていくことで減価率計算もより精緻なものとなろう。放射性物質によるこれほど大規模な環境汚染は初のことでありその地価に対する影響については様々な側面からの検討が必要であり、今後のさらなる研究が俟たれるところである。

(以上)

放射能汚染地の減価率に関する検討

1.はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に勃発した東日本大震災(以下「震災」という)から 5 年が経過した。この震災では死者・行方不明者合計で 1.8 万人余に達する人的被害をもたらし、建築物の全半壊は 40 万戸以上、津波による農地の冠水は 21 千²、と未曾有の地震災害となり、その経済的損失は 26 兆円にも上り、いまだに約 17.4 万人が避難生活を余儀なくされている。

震源は岩手沖から千葉沖までの延長 500 km におよぶ海底プレートの崩壊によるものと推定されており、本震で発散された地震エネルギー規模はマグニチュード 9 と兵庫県南部地震の 350 倍以上と史上最大規模のものであった。

地震の影響は震源から遠く離れた首都圏にも及び、特に東京湾の千葉県側沿岸、江戸川・利根川沿いの広範な地域に地盤の液状化現象をもたらし、東京都に隣接する浦安市では市域全体の実に 3/4 に及ぶ面積が液状化し、電気・ガス・上下水道・道路等のインフラの復旧費用は 734 億円にも上った。

日本列島には多数の火山や活断層が存在し、また、地球上に 14~15 枚あると分類されているプレートの内、ユーラシア、北米、太平洋、フィリピン海と 4 つのプレート境界が交錯するという特異な立地条件にある。そのため、有史以来、頻発する地震を受けてきたわけであるが、今回の震災ほどの規模と範囲で被害をもたらした地震はおそらく始めて経験するものであろう。震源から 500 km も離隔した地域においても建物への直接の地震動ではなく地盤の液状化によって建物が「全壊」¹するなどということはこれまで想像もつかないことであった。

また、この地震による津波で福島第 1 原子力発電所は冷却用の電源が全て喪失し、炉心熔融（メルトダウン）という「レベル 7」に該当する最悪の事態を招来し、1986 年のチェルノブイリ原発事故に次ぐ量の放射性物質が飛散された。そのため、周辺圏内は災害対策法に基づく避難指示地域に指定され、現在も立ち入りが制限されている。

以上のようにこの震災では人的・物理的にも様々な被害を被ったわけであるが、最も大きな被害をもたらしたのは環境的被害、即ち、放射能汚染であろう。なぜなら、通常の物理的被害は時間と資金をつぎ込めば復旧可能であるが、放射能汚染については目には見えないもののその健康被害の程度は命に係わるまでに深刻であり、また、その影響が広範囲でかつ、消滅するまでに途方もない時間が必要であるとみられているからである。

本稿ではこの放射能汚染問題の根源である放射能についての基礎知識とその健康被害を俯瞰するとともに、放射能が残存することでの地価への影響について放射能汚染のない地域の土地と比較してどの程度の減価率が妥当かを検討することとしたものである。

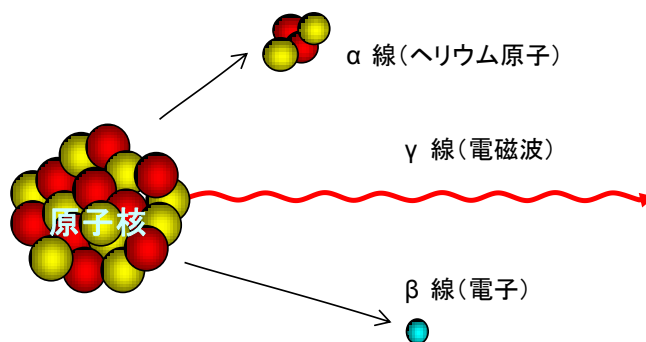
¹ ここでの「全壊」は「倒壊」や「崩壊」ではなく地盤の不同沈下により家屋が傾き、あるいは一部分が地中に埋没し、使用不能となることを指す。

2.放射能・放射線の基礎知識

2-1放射能と放射線

放射能とは放射線を放出する能力を指し、この能力を持つ物質を放射性物質という。放射性物質の原子は逐次崩壊していき、その際に放出されるエネルギーが放射線である。放射線には α 線、 β 線、 γ 線、中性子線等がある。それぞれの性質は次の通りである。

- ◆ α 線・・・Heの原子。線質係数大きい透過力は小さく、紙・アルミ箔で遮蔽可能。また、空気中ではせいぜい10^{cm}程度の飛翔力しかない。
- ◆ β 線・・・原子核から放出された電子。透過力はそれほど強くはなく、厚さ数ミリのアルミ板で遮蔽可能である。また、空気中の飛翔力は15^m程度といわれている。
- ◆ γ 線・・・電磁波の一種。透過力が強く、遮蔽には厚さ10^{cm}以上の鉛板が必要。空気中の飛翔力は数百^mから数千^m以上になる。
- ◆ 中性子線・・・透過力が非常に強く、線質係数も大きい。被爆を防ぐには1^m以上の鉛板でないと遮蔽不能である。



これらの性質の違いから放射線の影響力の強さは同じのものではないのでこれを同列に比較するために「線質係数」という概念が用いられる。

線質係数は α 線：20、 β 線：1、 γ 線：1、中性子線：20である。

線質係数からすると α 線は β 線や γ 線よりも20倍も強力なものであるが、上記の通り、 α 線は透過力、飛翔力が弱いのでこの係数は必ずしも各放射線の危険度に比例したものではない。

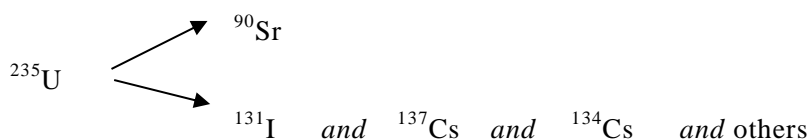
2-2放射性物質とその挙動

放射性物質はもともとの元素と原子番号は同じであるが中性子の数が標準原子よりも多い同位体である。たとえば、通常炭素原子は ^{12}C であるが、その同位体として炭素 ^{13}C 、炭素 ^{14}C がある。このうち、炭素 ^{14}C は放射線を放出する放射性同位体である。また、水素も通常の水素 ^1H の他、水素 ^2H 、水素 ^3H があり、このうち三重水素 ^3H （トリチウム）は水素爆弾の材料となる。放射性同位元素は原子核を構成する中性子と陽子や電子との組み合わせがアンバランスであるため不安定な存在であり、これを安定させようとして自ら原子核を崩壊させ、その際に放射線を放出する性質がある。

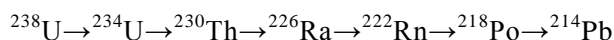
このような放射性同位元素には様々なものがある。代表的なものとしては炭素 ^{14}C ウラン ^{238}U 、プルトニウム ^{239}Pu 、ヨウ素 ^{131}I 、セシウム ^{134}Cs 、 ^{137}Cs などである。

代表的な放射性物質であるウラン ^{235}U は核分裂により、真二つに分かれるのではなく、質量が 135 と 100 前後と異なる二つの物質に分裂する性質がある。分裂した物質はそれぞれが放射性物質となり、放射線を放出する。

福島第 1 原発の炉心溶融では燃料であるウラン ^{235}U が核分裂して燃料棒内部に蓄積されていたストロンチウム ^{90}Sr 、ヨウ素 ^{131}I 、セシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs などの放射性物質が水素爆発により空中に大量に放出された。



放射性物質は様々な種類の放射線を出しながら崩壊し、次々と他の原子へ変遷していく。たとえば ^{238}U の場合の崩壊過程は次のようで最終的には数億年をかけて鉛 ^{214}Pb になって安定する。



2-3 半減期

半減期とは放射性物質を構成する原子全体の半数が崩壊するまでの時間を指す。すなわち、半減期においては放出される放射線量は当初の半分になっているということの意味するが、安全物質に変わったということでは決してない。概して自然界に元々存在していた物質の半減期は長く、人工的に生成された物質の半減期は短いという傾向がある。主要な放射性物質（放射性同位体）とその半減期、放出される放射線の種類は次の通りである。

主要な放射性同位体と半減期等

核種	名称	半減期	主要放射線	用途	生成
^{14}C	炭素	5730 年	β 線	年代測定	自然
^{40}K	カリウム	12.8 億年	γ 線	降圧・排泄	自然
^{60}Co	コバルト	5.27 年	γ 線	放射線治療	人工
^{90}Sr	ストロンチウム	27.7 年	β 線	核廃棄物	人工
^{131}I	ヨウ素	8 日	β 線	^{127}I は消毒薬	人工・自然
^{134}Cs	セシウム	2 年	β 線・ γ 線	核廃棄物	人工
^{137}Cs	セシウム	30 年	β 線・ γ 線	核廃棄物	人工
^{238}U	ウラン	45 億年	α 線	燃料・武器	自然
^{239}Pu	プルトニウム	2 万 4 千年	α 線	原発燃料	人工

2-4半減期計算と無害化の時期

2-4-1放射性元素の平均寿命

放射線の強度の減衰過程はこれを放出する放射性元素の崩壊の数と崩壊速度と同義であり、その減衰状況は指数的な時間の減少関数として把握される。

放射性元素が無害化するにはどれくらいの時間を要するのか。放射性元素の平均寿命は、半減期 $\times(LN2)^{-1}$ =半減期 $\times 1.443$ として計算される。

この計算式をあてはめると、ヨウ素 ^{131}I の各々1個の原子は平均約12日間で放射線を出し終えるが、セシウム ^{137}Cs の各々1個の原子は平均で43年経過することが必要である。しかしながら、これは個別の原子の平均のことで物質を構成する原子全体から見るとそれほど短い時間で無害になるということではない。

2-4-2物理的半減期による減衰式

放射線全体の減衰をみるには次の通り物理的半減期を用いて放射性原子全体の数の減少を捉えることで推し量る必要がある。

当初の放射線の強さを A_0 とし、 t 時間経過後の強さを A とする。この原子の半減期を T とし、崩壊係数を λ とすると、減衰関係式は $A = A_0 \times e^{-\lambda t}$ となる。

ここで $t=T$ とすれば半減期計算 $A_0/2 = A_0 \times e^{-\lambda T}$ から $\lambda = -LN(1/2)/T$ と求められ、これを上記減衰関係式に入れて整理すると次のように変形できる。

$$A = A_0 \times (1/2)^{\frac{t}{T}} \quad \dots (1) \text{ 式}$$

したがって、半減期が判明していれば(1)式を t について解いた次の関係式(2)式から当該放射性物質が無害となる時期もほぼ判明する。

$$t = T \times \frac{LN(A/A_0)}{LN(1/2)} \quad \dots (2) \text{ 式}$$

(計算例)

毎時 $5\mu\text{Sv/h}$ の ^{137}Cs が年間 1mSv に減衰するまでの時間は次のように計算される。

$A = \text{年間 } 1\text{mSv} \div 365 \text{日} \div 24 \text{時間} = 0.114\mu\text{Sv/h}$ 、 $A_0=5$ 、 $T=30$ なので、

$t = 30 \times LN(0.114/5) \div LN(1/2) \approx 164 \text{年}$ となる。

2-4-3生物学的半減期

以上は自然界にある状態での半減期であるが、人間の体内に取り込まれた放射性物質も同じだけ長期間影響を与える訳ではない。人間の体内では代謝・排泄機能があるためそ

れほど長くはとどまっていない。体内での放射性物質の半減期は生物学的半減期といい、これを考慮した放射線の影響は実効半減期といい、次の式で計算される。

$$T_{effect} = \frac{T_{phys} \times T_{biol}}{(T_{phys} + T_{biol})} \dots (3) \text{ 式}$$

(実効半減期： T_{effect} 、物理的半減期： T_{phys} 、生物学的半減期： T_{biol})

セシウム 137Cs の場合の物理的半減期は 30 年、生物学的半減期は 110 日なので、上記 (3) 式から実効半減期は 109 日と計算される。体内での実効半減期は物理的半減期よりはるかに短時間ではあるが、これは後述するように内部被曝の状態が継続する時間なので、影響度は半減期の時間に比例するわけではない。

3.放射線測定法

3-1シンチレーション測定法

現在の放射線測定の準公定法はシンチレーション (Scintillation) 検出法といわれる方法で、国や各自治体の発表線量数値はほとんどがこの計測器を用いて測定したものである。シンチレーションとは放射線が蛍光物質に衝突したとき、ごく短時間発光する現象をいい、そこから出た



出所：公益財団法人原子力安全研究協会

蛍光を光電子アンプ等で電子に変換して測定する仕組みである。

シンチレータと呼ばれるセンサーは、放射線に照射されることで蛍光を放つが、 γ 線についてはヨウ化ナトリウムやゲルマニウム酸ビスマス、中性子線については水素を含む蛍光物質を用いる。

計測対象の放射線は主として γ 線でその場所にいるとどれくらい被曝するかという空間線量 (あるいは空中線量) を測定するものである。測定単位は $\mu\text{Sv/h}$ である。

この計測器は廉価なものでも 80 万円程度、通常は 100~300 万円程度と高価なものである。

3-2GM 計数管測定法

放射線を簡易に測定する機器には様々なものがあるが、最も一般的に普及しているものは GM 計数管（ガイガー・ミュラー計数管：右写真）といわれる携帯用の計器である。計器には電場センサーが装備されており、これによって β 線・ γ 線からの電子を電場で加速して電離（イオン化）させ、その流れを電気として検出・調整して線量当



量（＝吸収線量×線質係数）を測定する計器。測定単位は通常 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ である。

写真提供：株式会社アースアプレイザル

測定された値が写真のように $5.13\mu\text{Sv}/\text{h}$ ならば年間被曝線量は $5.13\mu\text{Sv}/\text{h} \times 24\text{h} \times 365\text{Day} \div 1000 = 44.9\text{mSv}/\text{年}$ ($4,494\mu\text{Sv}$) ということになる。

価格は廉価なもので 5 万円程度、通常は 10～30 万円程度である。

なお、この他に原子力施設内監視用の電離箱式、個人携帯用の半導体式などがある。

3-3放射線測定手順

同一地点の空中放射線量を 2 高度において測定する。各計測地点では地表面から 50 センチ（幼児が呼吸する高さ）と 1 メートル の高さにおいて計測するが、埋土を行った場合には地表面で測定することもある。測定においては計測器を水平に保持し、約 1 分間継続計測し、数値が安定するのを待って記録する。記録する値は最高値と最低値の 2 つの数値になる。1 箇所について 1 時間程度の時間を空けて 2 回計測するのが通常である。

一般的に雨水の溜まりやすい地点や、屋根の樋からの雨水が流れ込む雨水枡周辺、ゴミ焼却炉の周辺はセシウムが流れ込んで集積しているので数値が高くなる傾向がある。また、アスファルト舗装地よりも草むらや裸地の方がセシウムを吸着しやすいので、そういった地点では 2 高度の放射線量格差が大きくなる傾向にある。

3-4放射線測定単位

- ◆ グレイ・・・吸収線量の単位。物質に吸収された放射線のエネルギー量で、1Kg の中で何ジュールのエネルギーが吸収されたかを表示する。単位は $1\text{Gy}=1\text{J}/\text{Kg}$

- ◆ ベクレル・・・放射線量の単位。1秒間に何個の崩壊原子による放射線が放出されているのかを表示する単位。1Bq=1個/sec
- ◆ シーベルト・・・放射線が人間に吸収されたときの影響量。吸収線量(Gy)×線質係数×組織荷重係数=実効線量としたもの。単位は μSv , mSv を用いる。

各単位の関係はベクレルが放射線の線源量で放射線を発生する強さとすれば、シーベルトは人間が受ける放射線の影響量である。グレイは人間に限らず放射線が物質に与える影響量である。ベクレルからシーベルトの変換はつぎのように計算できる。

(経口摂取の場合)

計算例：キャベツ 1kg にヨウ素 ^{131}I が 4000Bq あり、これを全量摂取した場合。
 $4000 \text{ Bq/kg} \times 2.2 \times 10^{-5} \text{ (実効線量係数}^2\text{) Sv/Bq} = 0.088 \text{ Sv/kg} = 88\text{mSv/kg}$ ということになる。

(吸入摂取の場合)

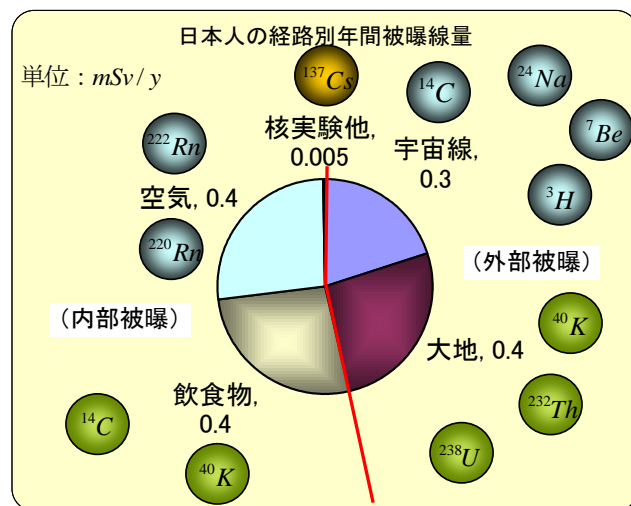
計算例：大気濃度 100Bq/cm^3 の三重水素 ^3H (トリチウム)1日²を吸い込んだ場合。
 $100\text{Bq/cm}^3 \times 1,000 \times 1.8 \times 10^{-10} = 0.00018 = 180\mu\text{Sv/日}$ となる。

4.放射線の害と被曝の限度

4-1 自然起源放射性物質(NORM)

福島第1原発から放出された放射性物質は人工のものであるが、これとは別に地球誕生時から存在するウラン ^{238}U に代表される自然起源放射性物質 (NORM : Naturally Occurring Radioactive Materials) がある。

自然起源の放射性物質は、起源の違いによって地球形成過程で宇宙空間から地球に取り込まれた放射性物質と現在も宇宙線によって自



原子力安全協会「生活環境放射線(1992)」を元に作成

² 各臓器や組織への発ガンの影響推定度を加重平均した値で、各放射性元素別の詳細は文部科学省告示第154号「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」を参照。
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2009/04/22/h121023_05.pdf

然に生成される放射性物質がある。前者は呼気や飲食物を通じて体内に取り込まれることで内部被曝の原因となり、炭素 ^{14}C 、カリウム ^{40}K 、ラドン $^{220/222}\text{Rn}$ 等がある。後者は宇宙空間から飛来した宇宙線から生じたり、マントル内部から地表面へ漏出してきたりするもので、人間の皮膚がこれに照射されることで外部被曝の原因となるものであり、トリチウム ^3H 、ベリリウム ^7Be 、ナトリウム ^{24}Na 、炭素 ^{14}C 、ウラン ^{238}U 、トリウム ^{232}Th 、カリウム ^{40}K 等がある。

このような自然起源の放射性物質によって上図の通り日本人一人当たり平均で約 1.5mSv/年 （世界平均は 2.4mSv/年 ）の被曝を受けていることになる。

なお、この他に人によっては CT スキャンや PET、胸部レントゲン検査等による医療被曝が 2mSv/年 程度ある。

4-2 外部被曝と内部被曝

被曝には外部被曝と内部被曝とがある。外部被曝は人体表面から直接に放射線を照射され被曝することで被曝は放射線を受けているときに限られ、防護服を着用することや遮蔽物で被曝そのものを回避することも可能である。内部被曝とは呼吸による摂取や主として食品や飲料水を通じて経口摂取³した放射性物質などで人体内部から被曝することである。

危険性の高いのは内部被曝で、これは体内に取り込まれた放射性物質が存在する限り被曝を受け続けることになる。特に放射線のうち、 α 線は飛翔力や透過性が弱い放射線であるが、線質係数は β 線や γ 線の 20 倍もあり、これが体内で至近距離から周辺の臓器を被曝させることになるので極めて危険である。 α 線は体内では細胞 1 個分 ($40\mu\text{mm}$) 程度の距離しか飛ばないため広範囲に影響はないが、そこにとどまり強力な放射線を出すので汚染物質周辺の組織細胞をことごとく破壊ないしは異常化させることになる。

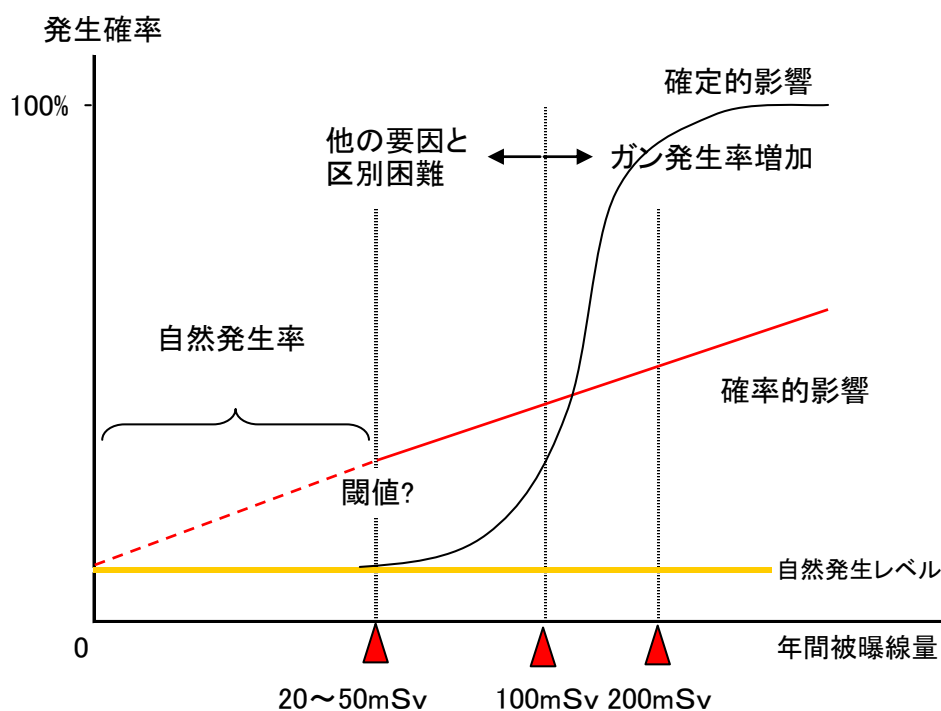
また、ほとんどの放射性物質には体内での蓄積性があり、食物連鎖の頂点に位置する人間にとっては肉・魚等の食物から高濃度の放射性物質が体内に入ることもあるので注意しなければならない。

4-3 被曝の影響と閾値

放射線が人体の健康へ与える影響については確定的影響と確率的影響の二つがあるとされている。このうち確定的影響は影響の現れる被曝量が閾値として判明しているとするものであり、確率的影響は閾値が無く被曝量に比例して影響の出る確率が増加するというものである。現在のところ判明しているのは脱毛、不妊、白内障等が確定的影響で、ガン、遺伝障害が確率的影響だと説明されている。

³ 但し、放射性ヨウ素は皮膚からも浸透被曝する。

放射線の線量反応関係



※1 確定的影響: 閾値を超えると症状が現れ、線量に比例して重くなる。

(脱毛・紅斑・水疱・潰瘍・白内障・不妊・白血球減少等)

※2 確率的影響: 閾値が存在するかどうか定かでない、線量増加により発生確率が大きくなる。

(白血病を含む癌、遺伝的癌等)

確率的影響については被曝量の閾値がないとするものの、被曝の影響が出ないとする水準については様々な説がある。最も低い水準は放射線影響協会による年間 5mSv でこの値は慢性的被曝による労災の認定基準⁴と同じ値になっている。電気事業連合会では広島・長崎の調査結果を根拠に「影響が出るのは数百 $\text{mSv}/\text{年}$ であり、 $100\text{mSv}/\text{年}$ 以下では影響は出ない。」と発表⁵している。文部科学省では閾値は $200\text{mSv}/\text{年}$ で、それ以下では影響は出ない⁶としている。

とはいえ、放射線についてはその影響の度合いが明確に判明しているわけではないので必要のない被曝はできるだけ避けなければならない。したがって、放射線防護の目標は、確定的影響については被ばく量を閾値以下にすることでその影響の発生を防止し、確率的影響については、その発生確率が自然発生率と同程度に容認できるレベルに抑えることとしている。

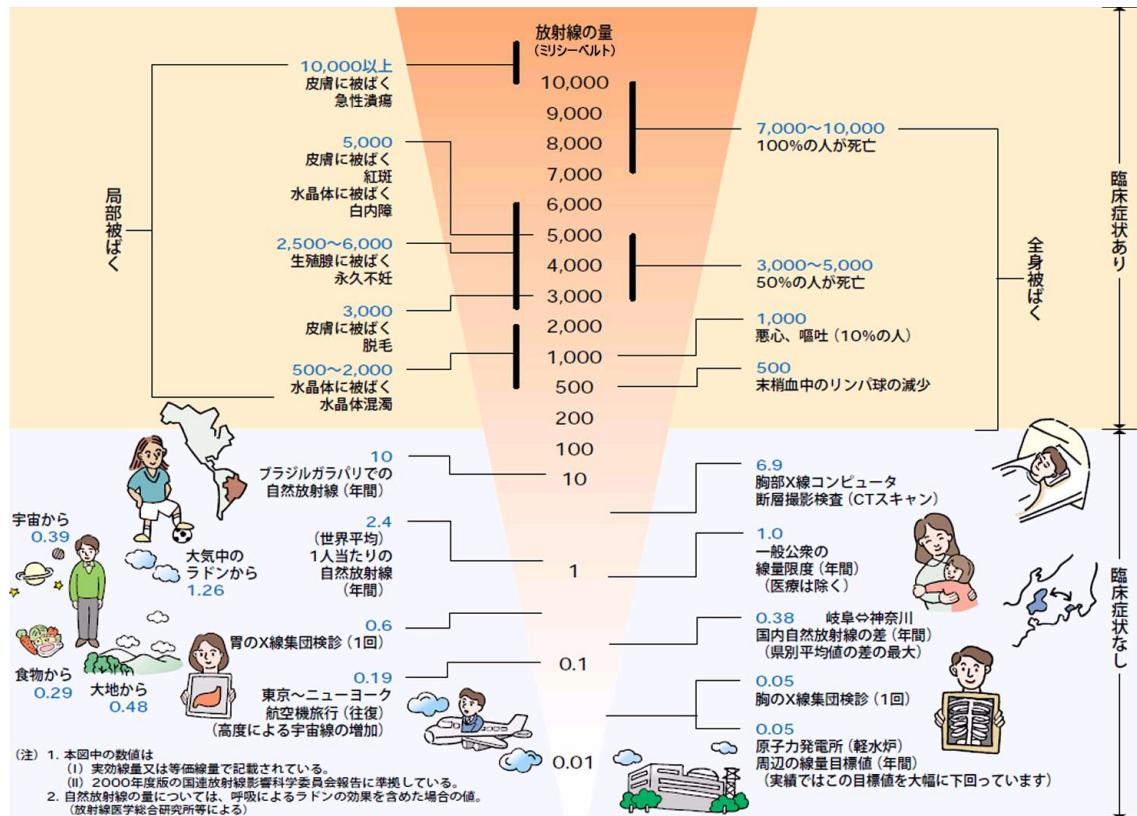
⁴ 「電離放射線にかかる疾病の業務場外の認定基準について」(昭和 51 年 11 月 8 日: 基発第 810 号)

⁵ http://www.fepec.or.jp/faq/1189695_1457.html

⁶ 他のリスク因子による影響と区別がつかないという意味であって安全であるということではない。

4-4放射線量とリスク説明

現在の福島市内での空中線量は震災当初の 1/10 に相当する $0.1\sim 0.2\mu\text{Sv/h}$ 程度であり、年間に換算すると 2mSv 以下で日本人の平均被曝量 1.5mSv を上回るものの、後述する ICRP による職業人に対する被曝限度の勧告以下の数値でもあり、確定的影響を与える水準からははるかに低く、「直ちに健康被害に影響を与える水準ではない」という説明になっている。しかしながら、これは影響が確定できないというレベルであるということであり、確率的影響の見地からの説明ではないことに留意する必要がある。



出所：公益財団法人原子力安全研究協会「緊急被曝医療研修 HP」

一般的な放射線被曝量のレベルと症状の有無・程度、具体的症状との関係は上図の通りである。確かに年間 100mSv では臨床症状がないことにはなっているが、放射性物質は体内への蓄積性があるので、単年度の被曝量が低くても安心できるものではないことに留意する必要がある。

4-5放射線被曝限度基準

我が国では国際放射線防護委員会 (ICRP) の 1962 年勧告にもとづき「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」が制定された。この法律によって放射線を取り扱う原子力発電所や病院などでは放射線レベルが法定基準を超える可能性のある場

所を「放射線管理区域」とし、管理区域で作業する者を放射線業務従事者として健康管理、教育訓練を行うことが定められた。

1990年には放射線を取り扱う職業人に対する被曝線量限度を5年間平均1年当たり20 mSv（但し単年度で50mSvを超えないこと）がICRPによって勧告され、これが現在の基準になっている。

なお、一般人に対する被曝線量限度は放射線等管理基準により全身に対し年間1mSv、目の水晶体で15mSv、皮膚で50 mSvと定められている。

5. 福島第1原発からの放射線の影響

5-1 核物質の飛散の状況

福島第1原発は震災による津波を契機とした電源喪失により、冷却機能が失われ、炉心溶融という最悪の事故となり、压力容器建家に充満した水素爆発により放射性物質が一気に広範囲に散布された。そのため、原発周辺は災害対策基本法に基づく警戒区域に指定され、住民は立ち入り禁止となり、20~50 ㎞圏内は計画的避難区域等（その後、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域に再編）に指定されいまだに7万人余が避難生活を送っている。

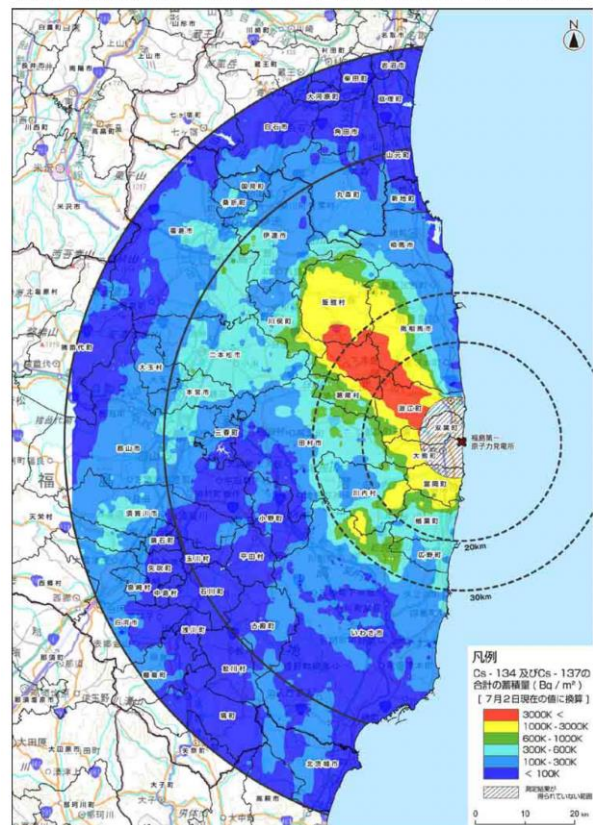
放射性物質は同心円状に拡散されているものではなく、事故当時の風向きにより原発から北西方向に拡散しており、地表面においてセシウム ^{137}Cs , ^{134}Cs が60万 Bq 以上の高濃度に蓄積した汚染地域は800 平方 ㎞に及ぶといわれている。

さらにその外周部においても日本人の年間平均放射線被曝量 1.5mSv を超える汚染地域は更に広範囲にわたっているものと推測される。

5-2 原発周辺における現在の危険放射性物質

前記の物理的半減期計算式を用いて計算するとヨウ素 ^{131}I の放射能の影響が測定時点の1/1000 となるのには約80日、セシウム ^{134}Cs については20年、セシウム ^{137}Cs につい

文部科学省による航空機モニタリングの結果
(福島第一原子力発電所から80km圏内のセシウム134, 137の地表面への蓄積量の合計)



出所：H23.7.8 公表「文部科学省および米国DOEによる航空機モニタリングの結果」

ては約 299 年を要すると計算される。

となると、ヨウ素 ^{131}I はすでにほぼ無害となっているはずであり、長期にわたって放射能を出し続けるセシウム ^{134}Cs と ^{137}Cs が問題となる。特に 10 mSv/h といった高濃度の汚染源となっている原発周辺については人体に影響のない年間 1 mSv 以下の放射線量になるには 10 万分の 1 の濃度にしなないとならないことになるが、これには計算上 498 年かかることになるので、自然減衰を待っているわけにはいかない。

5-3 原発に起因する損害賠償

福島第 1 原発による事故損害についての賠償は特別法である「原子力損害の賠償に関する法律」により原子力損害賠償紛争審査会が指針を出し、これに基づき損害賠償額が査定される仕組みになっている。同審査会は平成 23 年 8 月 5 日に福島第 1 原発の事故による被害についてその損害賠償の範囲と金額とについて目安となる中間指針⁷を出した。この中には避難区域・警戒区域等で生じた避難損害、営業損害、精神的損害を始め広範囲な損害について賠償の対象となる事項について定めているが、このうち不動産に関する事項の主な内容は次の通りとなっている（下線は筆者加筆）。

- (1) 放射性物質に汚染されたことによる財物（動産・不動産、以下同様）の価値喪失・下落分については合理的範囲で賠償する。
- (2) 除染費用については当該財物の客観的な価値の範囲内で賠償する。
- (3) ただし、農地等の代替性のない財物についての除染費用は例外的に合理的な範囲内で当該財物の客観的価値を超える金額の賠償も認められ得る。
- (4) 損害算定の基準となる財物の価値は原則として事故発生時における時価を基準とし、時価算出が困難である場合には会計慣行に従った簿価を基準とする。
- (5) 不動産売買・不動産賃貸借（＝不動産関連契約）においては事故発生前から売買交渉が進行しており、事故の影響で契約価格が下落した場合には事故がなければ契約価格で成立したであろうことが確実である場合にはその差額を合理的な範囲内で賠償する。
- (6) 不動産関連契約の成立後に事故の影響で契約破棄となった場合には事故がなければ契約価格で履行されていたであろうことが確実であれば合理的な範囲内で賠償の対象とする。

6. 除染基本方針

政府は平成 23 年 8 月 26 日に原子力災害対策本部名で「除染推進に向けた基本的考えか

⁷ 「原子力損害の判定に関する中間指針」原子力損害賠償紛争審査会

た」を発表した。

6-1基本方針の骨子

- (1) 年間推定被曝線量が 20mSv を超過している地域については国が主体となってこれを 20mSv 以下にすべく除染を進める。
- (2) 年間推定被曝線量が 20mSv を下回っている地域については市町村が主体となって住民の協力を得てこれを 1mSv に近づけるよう除染を進める。
- (3) 学校・公園については優先的に除染を進めて年間推定被曝線量を 1mSv 以下にすることを旨とする。

6-2除染実施方針

- (1) 年間推定被曝線量が 20mSv を超過している地域を段階的に縮小していく。
- (2) 長期的目標として年間推定被曝線量が 20mSv を下回っている地域については追加被曝線量が年間 1mSv 以下にする。
- (3) 2年後までの被曝線量を自然減衰とウェザリング効果で 40%と見込み、除染作業により 10%追加して合計で半減させる。
- (4) 子供の生活圏についてはウェザリング効果を含めて 2年後までに 60%の減少を図る。

6-3除染実施ガイドライン

6-3-1生活圏

(1) 家屋・庭

庭木の剪定、軒下の除草、雨樋の清掃等。線量の高い地域では屋根の高圧洗浄、庭土の表土除去、側溝の高圧洗浄。

(2) 道路

舗装道路は高圧洗浄、表面の削り取り・最舗装等

(3) 学校・保育所・公園

校庭等は一応完了しているので、遊具等について高圧洗浄ないしは洗剤によるブラッシングにより洗い落とす。

(4) 街路樹

常緑樹は剪定し、落葉樹は落ち葉の回収を行う。

項目		高線量地域の除染手法	低線量地域の除染手法	
		比較的線量の高い地域において実施可能な手法	比較的線量の低い地域において実施可能な手法	
主な作業内容	屋根・壁	拭き取り、高圧水洗浄	(清掃、拭き取り) *必要に応じ	
	雨樋	拭き取り、汚泥の除去、高圧水洗浄	清掃、洗浄、汚泥の除去	
	庭	表土	削り取り、客土	土壌の除去・天地返し (局所的汚染箇所)
		草木・芝	剪定、落葉等の除去 剥ぎ取り又は深刈り	選定、落葉等の除去、深刈り (草根まで除去)
	舗装面(コンクリート等)	ブラシ洗浄、高圧水洗浄等	ブラシ洗浄	
側溝	汚泥除去、高圧洗浄	汚泥除去、ブラシ洗浄		

出所：除染に関する有識者との意見交換会ファクトブック

6-4基本方針に対する批判とその後の状況変化

この方針については次のような批判が続出した。その主な点は①可住時期が20年先になる地域もあるがどういう根拠が明確でない点、②国が責任を持つと言いつつながら年間20mSv以上の地域だけ主体としている点、③大半を占めるそれ以下の地域については地方自治体に丸投げではないかという意見のある点、等々である。

このような批判もあり、方針決定は紆余曲折を見せたが、その後、除染対象区域を区分し特に放射線量の高い地域を除染特別地域として国の責任において除染を進めることとなり、既にモデル事業として着手している。ここに至る経緯を整理すると下表の通りであり、線量の比較的低い汚染状況重点調査地域については平成29年内に完了させる予定となっている。

除染関係情報の経緯整理

年	日付	出所	事項	内容
	3月11日	東電	地震発生	福島第1原発、津波により全電源喪失・メルトダウン開始。
	3月15日	東電	水素爆発	推定800平方Kmの広範囲に放射性物質飛散・拡散。
	6月6日	原保安	放出量推定	放出物質は77テラベクレルと推定(チェルノブイリは520万ベクレル)。
	7月19日	原安委	基本的考え方	ICRP勧告(20mSV~1mSV)の下限值1mSVを除染長期目標とする。
	8月26日	原災本部	除染基本方針1	年間20mSV以上の地域は国、それ以下は自治体で進める。
	8月30日	文科省	土壌汚染マップ	空間線量測定と土壌採取分析による放射性セシウム汚染図公表。
	8月30日	環境省	除染特措法公布	除染を国の責任で行う法的根拠・汚染原因者の費用負担を制定。
H23	9月14日	農水省	農地除染	表土剥離、反転耕等の除染方針を提案。
	10月6日	文科省	文科省	年間1~20mSVの範囲で極力可能な低い値を段階的に設定する。
	10月10日	環境省	除染方針見直し	学校・公園を優先除染。最終目標値を年間1mSVにする。
	10月14日	IAEA	除染方針提言	除染目標値を年間1mSVにするという過剰な除染は避けるべきと提言。
	12月5日	福島県	山林除染方針	宅地隣接の山林は20 _{Bq} までを除染→長期的には1mSV以下を目標
	12月16日	原災本部	冷温停止状態宣言	工程表St2達成⇒St3(燃料取り出し作業)への移行へ。
	12月26日	原災本部	除染基本方針2	除染特別区域を3区域に区分、順次除染方針。
	12月27日	農水省	稲の作付方針	新基準100Bq/Kg超については隔離出荷制限。
	1月1日	環境省	除染特措法発効	責任費用負担を明確にし、本格作業開始。
H24	1月26日	環境省	除染ロードマップ	避難指示解除準備区域:年間20mSV以下⇒1mSV以下を長期目標 居住制限区域:年間20~50mSV⇒段階的に20mSV以下に順次実施 帰宅困難区域:年間50mSV超⇒除染モデル事業実施後対応協議
	12月27日	環境省	重点調査地域一部解除	福島県昭和村、群馬県片品村、みなかみ町
H25	6月25日	環境省	重点調査地域一部解除	宮城県石巻市
H26	11月17日	環境省	重点調査地域一部解除	福島県三島町
H27	10月1日	環境省	除染廃棄物処理促進	8000Bq以下の廃棄物については焼却処理方針とする。
	11月13日	環境省	除染の進捗状況調査	重点調査地域の生活圏についてはほぼ完了、H28~H29までに終了予定。
H28	3月11日	大津地裁	原発停止仮処分	関西電力高浜原発3,4号機の稼働停止仮処分決定、即日停止。

注1)除染特措法:『放射性物質による環境汚染対処特別措置法』注2)原安委:内閣府原子力安全委員会

注3)原保安:経済産業省原子力安全・保安院 注4)原災本部:原子力災害対策本部

7. 除染の具体的方法

除染については宅地、農地、林地等に分類してそれぞれに方針を出して着手しているが、本稿では紙面の関係で宅地にのみ言及することとする。

7-1 宅地の除染

7-1-1 除染の目標基準

宅地は日常生活の根拠地であり滞在する時間が最も多いはずであり、そのため、目標とする放射線量も極力低い値にしなければならない。とはいえ、年間被曝線量 $20mSv$ の汚染地域を国の目標基準である年間 $1mSv$ 以下にするのは短期間では不可能であることは放射性物質の化学的性質からみて明らかである。場所的な濃淡はあろうが、居宅周辺は様々な除染措置によりなんとか年間 $1mSv$ 以下にできたとしても、それ以外の地域は現実的には 10 年以内に原発周辺地域外で年間平均 $5mSv$ 以下に遡減するところまでであろう。

原発から北西方面の居住制限区域及び帰還困難区域等は数十～数百 mSv という高濃度に汚染されており、多少の除染措置では効果が見込めず、悲観的に考えれば今後数十年間は居住することは不可能であるため、このような地域は「放射線管理区域」として国が厳重に管理し、放射性物質の拡散と被曝を防止しなければならない。

7-1-2 除染方法

宅地については汚染表土の敷地内埋立て⁸を行うほか、表土削り取り、高圧洗浄等を試行したうえで最も効果的で即効性がある物理的手法を中心とした除染作業を実行してきた。宅地は農地（水田）とは異なり、地表面が水分で満たされているわけではなく、また畑地よりは土壌粒子の密度が高いため放射性物質は地表面から数センチ以内にとどまっているからである。

ただし、宅地は建物の敷地として利用されている場合が多く、重機を持ち込んでの効率的な作業のできる区域は限定される。特に問題となるのは次のような場所である。

- (ア) 建物の雨樋の直下や雨水ピット
- (イ) 駐車場や庭の隅の土砂や雑草の繁茂している区域
- (ウ) 土砂の堆積した側溝や雨水枡
- (エ) アスファルト舗装された取り付け道路、等々である。

このうち、(ア)～(ウ)については手作業で行う他はないが、放射性物質が堆積しているため、場所によっては空中線量が数十～数百 $\mu Sv/h$ を超えるような超高濃度になっ

⁸ 福島県では県内の学校や幼稚園 1752 施設の内、334 施設で表土除去、敷地内埋立により除染が完了している (2011.8.11 毎日新聞)。 <http://mainichi.jp/select/science/news/20110812k0000m040066000c.html>

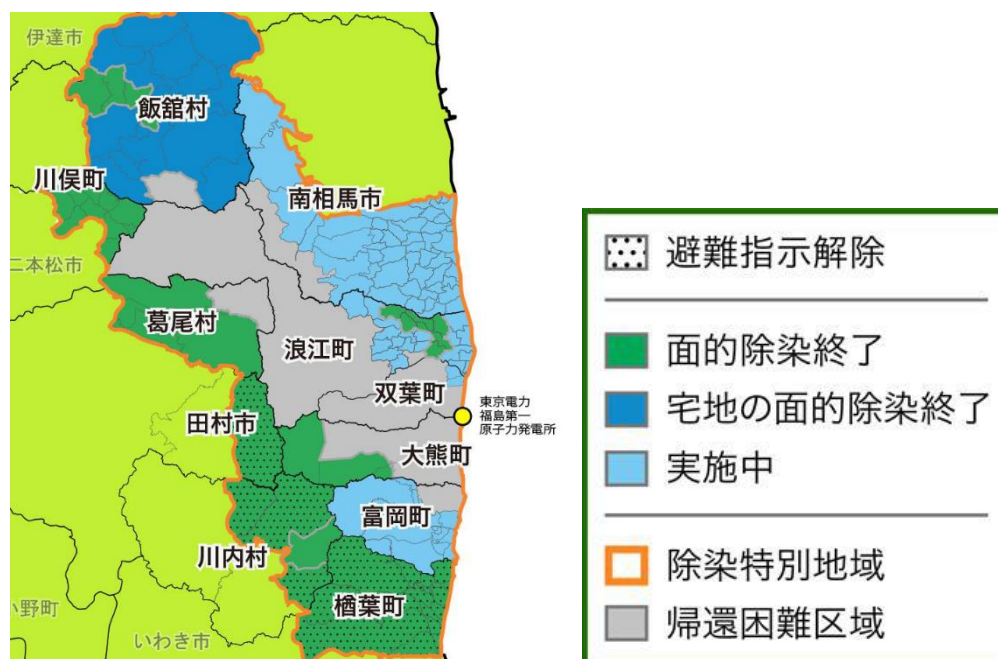
ている場合もあるので事前に十分に放射線量を測定し、それに応じた装備をして作業を行っている。

除染作業に際しては農地の場合と同様に PVA（ポリビニールアルコール）液やポリイオン溶液の土壌硬化剤を散布して放射性セシウムを飛散させないよう固定した上で、これを剥がすようにして地表面から 5 ㌢程度の土壌を除去している。

（エ）についてであるが、水に溶解しやすいため高圧洗浄を行えば洗い流すこともできそうであり、ある程度は除去できる。しかしながら、乾燥後はアスファルトに密着するため、ある程度時間が経過しているところの方法では洗浄はかなり困難であつたろう。また、注意しないとたとえその部分から洗浄できたように見えても、それは放射性セシウムの所在が他へ移動して新たなホットスポットを作り出すだけであり、かつ、洗浄水という低レベルの汚染水を生じさせるだけに過ぎないことにもなる。したがって、この場合でも重機を用いてアスファルト舗装の表面を削り取るか、舗装が薄い場合にはこれを全面的に引き剥がして除去しているのが現状である。

7-2 除染進捗状況

5 年近くに及ぶ除染作業の結果、地方自治体が行う汚染状況調査重点地域については概ね 8～9 割が完了したが、国直轄の除染特別地域については平成 28 年 2 月段階では下図の通りの進捗状況で、帰還困難区域については基準達成時期のめどが立っていない⁹。



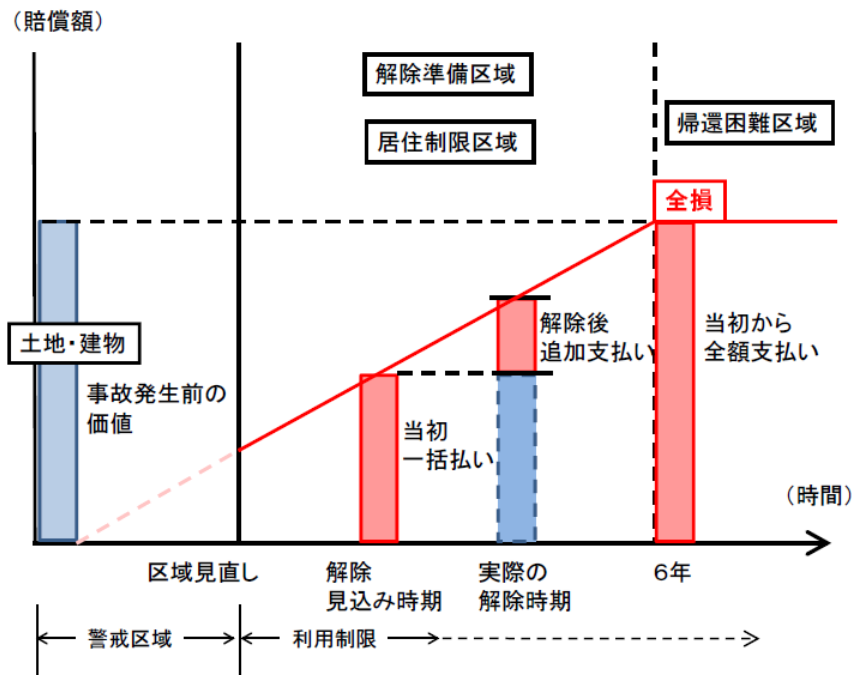
出所：環境省 HP

⁹ 平成 28 年 3 月 4 日の環境省発表資料によると、除染作業の結果、平均低減率は 60%程度であり、線量は 20 mSv を下回っていない。

8.放射能汚染地の減価率

前述のように汚染状況調査重点地域についての除染は進んでいるが、国の目標基準である追加的暴露が年間 $1mSv$ をはるかに上回る地域は相当広範囲に現存している。このような地域についての宅地の減価率をどのように設定するかが課題である。

平成25年3月に出された「新しい賠償基準」によると帰還困難区域における不動産（宅地及び住宅）については当初から全損とみなして全額を損害賠償として支払い、その他の地域については実際の解除時期に応じて損害賠償することとなった。事業



用不動産についても一定の基準を決めているが、事務作業が膨大で思うような進捗を見せていないのが実情である。

出所：経産省「新しい賠償基準について」H25.3

重要な点はこの賠償基準はあくまでも原子力損害賠償法に基づく損害賠償であって、使用不能な不動産の売買ではないということである。すなわち、賠償額は災害発生前の固定資産税評価額の1.43倍という一律の基準により評価しており、不動産の状況に応じた価値評価ではないということである。

では、放射能汚染地の不動産の価値評価はどのようにすればよいのか、放射能の線量は不動産の価値にどのような影響を与えるのか。先行研究として大阪府不動産鑑定士協会¹⁰や福島県不動産鑑定士協会¹¹による実証研究があるが、分析結果に十分な精度をもたらすほどのデータが揃わない等の事由により、いずれも試行論であるという慎重な結論となっている。

本稿においても膨大なデータを分析して結論を導出することは到底不可能であるので、放射能の化学的法則に基づいた計算上の考え方を提示するにとどまらざるを得ないが、諸般の事情もあり、やむを得ない。

¹⁰ 「不動産に係る原子力損害額の評価」震災対応特別委員会中間報告

¹¹ 「放射能汚染による不動産価値損失測定の可能性を考える」

8-1 考え方と計算方法

8-1-1 地域要因か個別的要因か

まず、放射能汚染は必ずしも均等ではないものの、広範囲にその影響を及ぼすものであり、個別の不動産についてのもものだけではとどまらないのでこれを地域要因とすることについては特段の異論はないと思われる。但し、地域全体が同じ線量かというところではなく、いわゆるホットスポットといわれる高濃度の汚染箇所が散在していたりと場所的な濃淡はあろう。また、宅地と農地、林地では放射性物質の挙動が異なるので、同じ地域でも土地の種別によって異なる値となるのが通例である。とはいえ、かなり広範囲の地域全体の効用が損なわれるという意味では地域要因と考えるのが妥当であろう。

8-1-2 線量減衰計算

地域格差は放射線量に相関があることを前提として、現在の線量が多いほど減価が大きくなるはずであると考えられる。なぜなら線量が多いほど追加的被曝が年間 1mSv にまで減衰する時間が長くなり、不動産の利用不能期間も長期にわたり、その間の時間的価値が減価の本質と考えられるからである。

線量減衰計算前提条件

計算前提条件	核種	Cs134	Cs137	=10.0 合計 =3.7 合計 Bq(原子力保安院推定) (東京電力発表値)
	吸収線量率	7.3	2.7	
	相対強度	2.7	1	
	半減期	2.0648	30.1671	
	排出量	1.8×10^{16}	1.5×10^{16}	
	排出比率	1	1	
	リスクフリーレート	0.01085	γ	

原発の水素爆発により飛散した放射性物質の主なものにはストロンチウム ^{90}Sr 、ヨウ素 ^{131}I 、セシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs などがあるが、このうち、ヨウ素 ^{131}I については半減期が 8 日間と短期であることからほぼ消滅し、影響はない。今現在放射性物質として測定されるのはセシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs の二つであり、これらの合計が線量として問題となる。

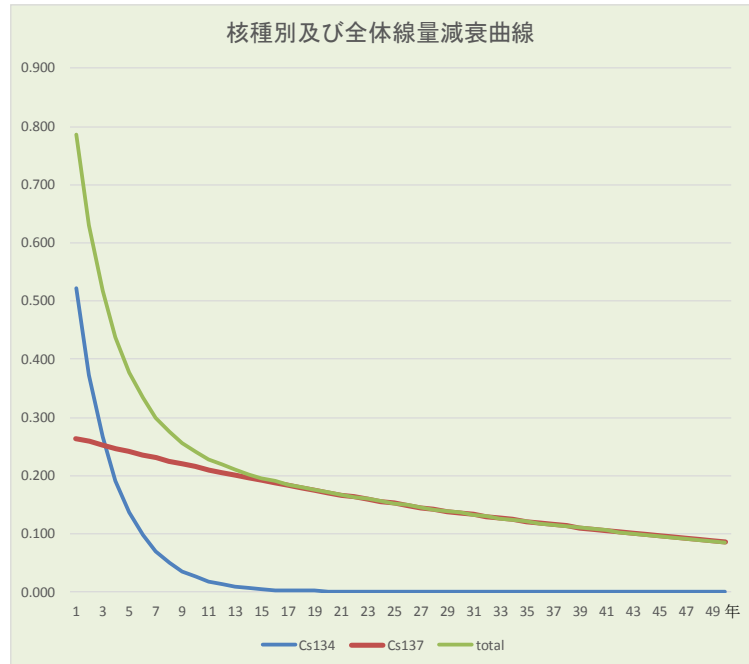
ここで、セシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs の吸収線量率の違いを考慮しなければならない。すなわち、同じ放射性同位体であっても線量の相対強度が異なるので、セシウム ^{137}Cs : セシウム ^{134}Cs = 1 : 2.7 で、その比を計算に入れる必要がある。

次に、排出量であるが、これには諸説あり、当初原子力保安院ではセシウム ^{134}Cs が 1.2 倍多く排出されたと推定したが、現在ではこの比は 1 : 1 であったというのが関

係者共通の認識となっている。この関係を考慮に入れた減衰状況を示すのが右図である。

最後に追加的被曝線量が年間 $1mSv$ にまで減衰する時間的価値を測定する割引率であるが、これにはもっとも一般的な10年物国債の10年平均を採用することとする。

なお、この計算ではシーベルト SV でなく、ベクレル Bq が算出されるが線量の強さと放射性物質の崩壊量とはほぼ正比例しており、計算上は Bq を SV の代理変数として用いている。



8-1-3 計算方法

計算方法は次のプロセスによる。

●減衰率 Dn_t の一般式は次の表に表現できる。

$$Dn_t = \left[\left({}^{134}Cs_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n_t}{T_{134}}} \times \frac{2.7}{3.7} \right) + \left({}^{137}Cs_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n_t}{T_{137}}} \times \frac{1}{3.7} \right) \right] \times (1 - Wt) \dots (4) \text{ 式}$$

- Dn_t n_t 期における減衰率
- ${}^{134}Cs_0$ セシウム134の事故当初線量
- T_{134} セシウム134の半減期=2.0648年
- ${}^{137}Cs_0$ セシウム137の事故当初線量
- T_{137} セシウム137の半減期=30.1671年
- Wt 期間 t におけるウェザリング効果

●減価率 Gn_t は次の式で計算する。

$$Gn_t = \left(\frac{1}{(1 + R_f)^{n_t - n_i}} - 1 \right) \times 100 \dots (5) \text{ 式}$$

Gn_t …… n_t 期における減価率
 R_f …… リスクフリーレート
 n_t …… 格差率を判定する期
 n_T …… 線量が年間2.015mSv以下となる期 ※1.※2.

※1.割引期間($n_T - n_t$)は当初線量から $(^{134}\text{Cs}_0 + ^{137}\text{Cs}_0) \times Dn_t = ray_t$ により n_t 期における線量 ray_t が定まり、 $ray_T \leq 2.015\text{mSv}$ となる T を別表により求めその期間差である $(T - t)$ が割引率のべき乗数となる。

※2.線量年間 2.015mSv の意味は次の通りである。

追加的被曝線量は年間 $1\text{mSv} \doteq 0.19\mu\text{Sv/h} \times (8\text{h} + 0.4 \times 16\text{h}) \times 365\text{day}$ 、即ち1日のうち8時間は外で活動しているので、 $0.19\mu\text{Sv/h}$ を被曝するが、屋内にいる期間は建物で遮蔽されるので、遮蔽効果を0.4、時間を16時間として計算している。したがって、 $0.19\mu\text{Sv/h}$ が追加的被曝線量であるということになる。これに大地等からの自然放射線が $0.04\mu\text{Sv/h}$ あるので、これを合計すると空間線量は $0.23\mu\text{Sv/h}$ 、即ち $0.23\mu\text{Sv/h} \times 24\text{h} \times 365\text{day} \doteq 2.015\text{mSv}$ になり、これを一応の安全圏とみなして汚染状況重点調査地域の解除条件としているのである。

(4) 式から事故発生年の線量を 20mSV/y とし、5年目にあたる現在の減価率を計算してみる。

まず減衰率 Dn_5 はどの程度になっているかを計算する。

$$\begin{aligned}
 Dn_5 &= \left[\left(^{134}\text{Cs}_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{2.0648 \times 5} \times \frac{2.7}{3.7} \right) + \left(^{137}\text{Cs}_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{30.1671 \times 5} \times \frac{1}{3.7} \right) \right] \times (1 - 0.1) \\
 &= (0.522 + 0.264) \times 0.9 = 0.34
 \end{aligned}$$

すなわち、約66%減衰¹²していることになるので、現在の線量は $20\text{mSV/y} \times 0.34 = 6.8\text{mSV/y}$ と計算できる。

ウェザリング効果については0.1としたが、これについては明確な測定方法がないものの、各所モニタリングポスト、航空機線量調査の結果等で年間約10%程度であったというのが、関係者共通の知見となっているので、ここではその数値を採用した。

¹² この数値は平成28年2月3日に原子力規制委員会が原発から80*₀圏内の放射線量減衰率が65%となったという発表と符合する。平成28年2月4日付日経新聞

次に減価率 Gn_t は (5) 式から計算する。事故発生年の線量が 20mSV/y であればこれが 2.015mSv/y 以下になるには事故発生から 43 年目¹³ (後掲別表減衰率参照) であるから

$$\text{べき乗数は } 43-5 \text{ で } 37 \text{ となる。したがって、} Gn_5 = \left(\frac{1}{(1+0.01085)^{43-5}} - 1 \right) \times 100 = \Delta 33.6$$

となるので、減価率は $\Delta 34$ ということになる。

8-2 減価率表

上記の計算過程により EXCEL によりマトリックス表を作成し、それを簡略化したのが下表の減価率表である。

線量状況別減価率表(案)

①	初期線量 $T_0\text{mSv}$	200mSv	100mSv	50mSv	40mSv	30mSv	20mSv	15mSv	10mSv	5mSv	3mSv
②	今期理論値線量 $T_5\text{mSv}$	67.9mSv	33.9mSv	17.0mSv	13.6mSv	10.2mSv	6.8mSv	5.1mSv	3.4mSv	1.7mSv	1.0mSv
③	同上変換 $\mu\text{ Sv/h}$	7.7 $\mu\text{ Sv}$	3.9 $\mu\text{ Sv}$	1.9 $\mu\text{ Sv}$	1.5 $\mu\text{ Sv}$	1.2 $\mu\text{ Sv}$	0.8 $\mu\text{ Sv}$	0.6 $\mu\text{ Sv}$	0.4 $\mu\text{ Sv}$	0.2 $\mu\text{ Sv}$	0.1 $\mu\text{ Sv}$
④	0.23 $\mu\text{ Sv/h}$ までの n	144n	113n	83n	74n	61n	43n	31n	14n	3n	2n
⑤	0.23 $\mu\text{ Sv/h}$ までの $n-5$	139n	108n	78n	69n	56n	38n	26n	9n	0n	0n
⑥	地域減価率	-78	-69	-57	-53	-45	-34	-24	-9	0	0

この表の見方であるが、たとえば現在の毎時 0.6Sv/h (当初線量 15mSV/y) の地域は汚染状況重点調査地域の解除条件を満たすまでにはあと 26 年かかることになるので、その間の割引現価と現価との差額の $\Delta 24$ が減価率ということになる。

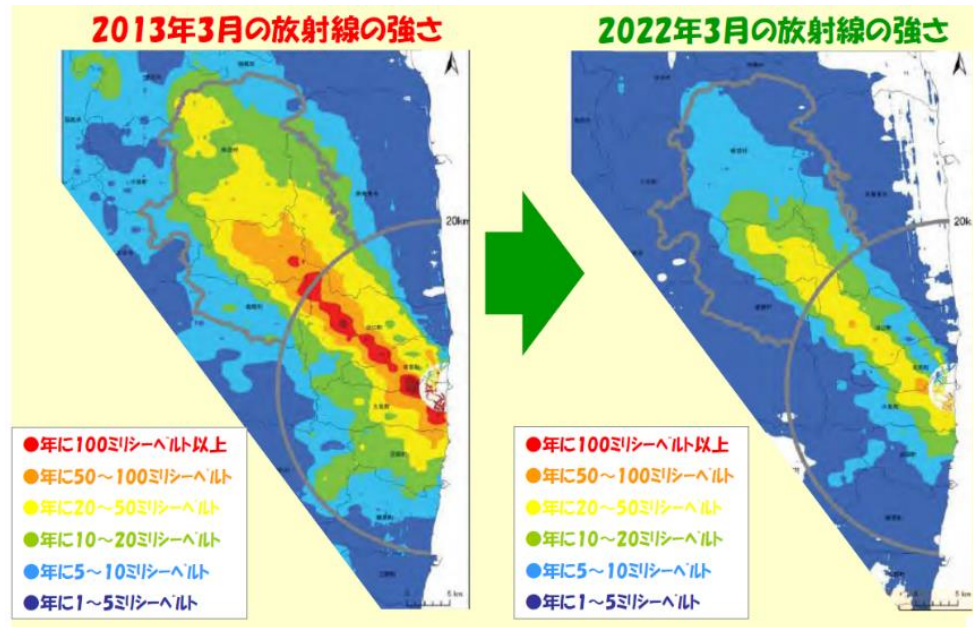
ここで重要なことは事故発生当初の線量と現在の線量とでは意味が異なるということである。すなわち、上表の毎時 $0.4\mu\text{Sv/h}$ は当初線量が 10mSV/y であり、基準達成までの年数は 9 年であるが、当初線量が 30mSV/y であれば現在の線量は 10mSV/y となるが、この地域が基準達成までに要する年数は実に 56 年という計算になり、事故発生時の線量と現在の線量とが同じであっても、現在の線量の減衰速度は当初線量と比較して対数的に減少していくということである。

表では当初線量が年間 200mSV/y までしか掲載していないが、原発周辺地域では当初線量が 500mSV/y を超える地域も広範囲にあったはずであり、これらの地域では基準達成までに数百年かかることになるので、あまり意味のない計算になる。

¹³ セシウム ^{137}Cs 単体の半減期計算上は $T=30.1671 \times \text{LN}(2.015/20) \div \text{LN}(1/2) \approx 99$ 年となるが、(4) 式による相対強度を織り込んだ結果 43 年となる。

そこまでいかなくとも当初線量が年間 200mSV/y を超えるような地域については基準達成に要する年数が長すぎて減価率を算出することすらあまり意味がない、即ち実質的には全損状態の土地であるということを意味している。

右図は現在の居住制限区域を中心とした線量の予測であるが、2022年になってもほぼ全域が年間 $5\sim 50\text{mSV/y}$ の線量が残存



しており、長期にわたって利用に 出所：環境省 HP
 支障をきたす地域が広範囲にあることを示している。

したがって、この減価率表は現在年間 20mSV/y 以下の線量の地域における除染等の人為的な作業によって自然減衰速度を速めることができそうな比較的低濃度の汚染地域については妥当するものと考えられる。

9.検討と総括

9-1 妥当性

この減価率表は極めて簡便なロジックによる単なる計算に過ぎないという批判もあろう。しかしながら、この減価計算は化学的法則に基づき厳密に算出された自然減衰率を基礎としており、線量推移の予測計算としての妥当性はある。また、対象は宅地地域、とりわけ主として用途的な同質性を有する住宅地域を前提にしており、この減価率表だけで減価を決定することは無理としても、汚染基準の達成されている住宅地域との地域間の放射線量による格差を推し量るのに用いるには全く無益なものではないだろう。他の価格形成要因とは分離して、放射能汚染地域の地価を直接的に求めるのではなく、他の地域との相对比较によりその水準を推し量るための参考程度にはなるものと考えられる。

9-2適用範囲

減価率表は宅地のなかでも主として住宅地域を前提に作成したものであるが、林地地域についても林業の成立している地域については収益が測定できるので、妥当する局面もあろう。農地地域については作物の線量基準があるので、これをクリアしないと耕作不能であるからそのまま当てはめることはできない。但し、宅地の中でも農地地域にある農家住宅については隣接する林地と一体として利用されていることも多いので、その居住空間だけの線量で減価率を押し量ることはできない。

9-3事業用不動産

宅地の中でも問題となるのは事業用の不動産である。即ち、事業用不動産は住宅用不動産とは異なり、他の経営資本と一体となった収益力が価値の源泉であり、かつ、その収益力は事業によって異なるからである。減価率に収益力の格差を反映させようとすると異なる割引率を適用することになり、減価率が個別に異なることとなり、地域要因と位置付けた減価率とは異なった取扱いとなるので適用困難である。ちなみに平成 25 年の「新しい賠償基準」によっても評価方法については継続検討としている。

9-4適用割引率

割引率にリスクフリーレートを用いることは不動産の収益力を反映したものではないので、低すぎはしないかという指摘もあろう。確かに収益力喪失を測定するのであれば収益力を反映した資本コストが妥当とも考えられる。しかしながら、資本コストでは各事業者によって異なるので、一律の減価率にはならなくなるという致命的な欠陥があり、不都合である。リスクフリーレートは資産除去債務の債務現在負担を計算する割引率としても利用されており、公正性が担保されている。また、適用したリスクフリーレートは約 1%で現在の住宅ローン金利とも同レベルであり、住宅地の価格の格差率の割引根拠としては必ずしも的外れとは言えないのではないだろうか。ちなみに、相続税財産評価基準の法令解釈通達にある平成 27 年の基準金利は 0.5~0.75%である。

9-5除染効果について

減価率の根拠とした減衰率はあくまで放射性物質の化学的法則を利用した計算上のものであり、除染等の人為的な減衰効果を織り込むことができないのではないかの指摘もあろう。確かに除染作業により線量は概ね 1/4~1/5 に減少し、居住可能となった地域も多い。しかしながら、これらの地域は本来それほど線量が高くなく、自然減衰の効果も相俟って除染効果が発揮された地域で、高線量の地域については効果的な除染方法を試行している段階で、自然減衰機能を基礎として計算することは無意味ではないであろう。

9-6追加的被爆の格差

国の基準である年間 1mSv/y というのは追加的被爆の線量であって、これを格差率 0 とし、追加的被爆のない地域との格差を設けないのは不備ではないかという批判もある。しかしながら、年間 1mSv/y の追加的被爆によっては健康被害が増大するということは現在の疫学的見地からもまず考えられないので、日常生活の環境としてはリスクに差がないとしても支障はないと考える。

9-7林地について

除染については宅地のみと言及してきたが、林地についてはほぼ手つかずの状態であり、自然減衰が妥当するケースが多いと思われる。セシウム ^{137}Cs 、 ^{134}Cs は第 1 族のアルカリ金属でプラスに荷電する性質がある一方、土壌を構成する年度金属はマイナスイオンなので、落ち葉に付着しても風雨で飛散することは少なく数年で土壌に固着してその場にとどまると考えられる。したがって、何もしなければ計算通り自然減衰していくことになるので、化学的法則を計算根拠とすれば妥当性はある。

9-8スティグマ

除染により剥ぎ取った表土等については長期間にわたり放射能が残存するので、その中間保管所の立地が問題となっている。同様に天地返しによって地中に残存する放射性物質を含んだ土壌が残存する土地についてはいわゆるスティグマと称される風評被害に係る減価要因もあろうと考えられる。しかしながら、重金属などによる自然に消滅することのない土壌汚染とは異なり、放射性物質は長期間かかるが必ず消滅するものであり、その減価要因は土壌汚染よりも低率であろう。

10. (結語)

この減価計算は放射性物質の化学的法則とその挙動に基づき算出された自然減衰率を基礎としたものであるが、実際の減衰状況を把握するには線量データの裏付けが必要である。この点、各種のモニタリングデータが存在するが、これらのデータを一括集約して地域別・時系列に整理することと、除染効果の測定を継続的に行っていくことで減価率計算もより精緻なものとなろう。放射性物質によるこれほど大規模な環境汚染は初のことでありその地価に対する影響については様々な側面からの検討が必要であり、今後のさらなる研究が俟たれるところである。

(以上)

12. 参考

(参考資料)

「暮らしの中の放射線」放射線化学センター

<http://rcwww.kek.jp/kurasi/>

「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」厚生労働省医薬局保健部

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfm.pdf>

「疫学研究の現状としきい値問題」放射線影響協会

<http://homepage3.nifty.com/anshin-kagaku/kaneko.pdf>

「放射能による環境汚染と放射性廃棄物の対策についての意見書」日本弁護士連合会

http://www.nichibenren.or.jp/library/ja/opinion/report/data/110729_2.pdf

「文部科学省による第3次航空機モニタリングの結果について」文部科学省

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/__icsFiles/afieldfile/2011/07/11/1305819_0708.pdf

「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」文部科学省

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2009/04/22/h121023_05.pdf

「原子力損害の判定に関する中間指針」原子力損害賠償紛争審査会

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/anzenkakuho/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2011/08/11/1309711_1_3.pdf

王効拳・李法雲・杉崎三男「ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復の現状と展望」

http://www.h.chiba-u.ac.jp/helloeps/homepage/seminar/semi_4-5.pdf

「除染に関する緊急実施基本方針について」、「市町村による除染実施ガイドライン」経済産業省

<http://www.meti.go.jp/press/2011/08/20110826001/20110826001.html>

「除染に関する有識者との意見交換会ファクトブック」

https://josen.env.go.jp/material/session_140615.html

「新しい賠償基準について」経済産業省

<http://www.katsurao.org/uploaded/attachment/449.pdf>

「帰還困難区域除染モデル実証事業後の空間線量率の推移について」環境省福島環境再生事務所

http://josen.env.go.jp/area/model2_after.html

「放射線と健康」館野之男 岩波書店

「放射能の基礎知識」齋藤勝裕 ソフトバンククリエイティブ

「放射線と放射能」安齋育郎 ナツメ社

「原発の仕組みと放射能」ニュートン別冊

(参考 HP)

「独立行政法人：放射線医学総合研究所」<http://www.nirs.go.jp/index.shtml>

「財団法人：日本分析センター」<http://www.jcac.or.jp/index2.html>

「文部科学省」、「東京電力」、「原子力安全・保安院」、「内閣府」他