

福島の人たちと放射線を測る

Measurement of Radiation for People in Fukushima

山下雅道

Masamichi Yamashita

宇宙農業サロン

〒192-0361 八王子市越野 40-10

080-3753-2311 gadomy@gmail.com

放射能のなにがむずかしいのか

ビッグバンで宇宙がはじまり、素粒子がうまれ、電子が陽子に捕獲されて水素原子ができ、ムラムラに膨張する宇宙の濃いところに物質があつまり、星がつくられその内部の高エネルギー・高密度の条件で水素やヘリウムより重い元素が合成された。星が一生を終えるとその内部で合成された多くの元素が星の爆発により周囲に撒き散らされる。何度かの星の輪廻がめぐり、太陽系が作られ、その惑星のひとつに地球ができた。

生命体を作る物質の前駆体は、恒星からの短波長の紫外線や銀河起源の高エネルギーの放射線である宇宙線によりひとは合成され また並行して壊されていく。地球の上での生命の始まりや進化は、短波長の紫外線や宇宙線からは保護された海中や地中でした。地球に強い磁場が形成され宇宙線がいくぶん遮蔽されると浅い海に生命が進出し、光合成による酸素の放出がはじまり、大気に酸素をあたえ、上層でオゾン層ができて短波長の紫外線を吸収する。およそ 10～8 億年まえからのマントルへの海水の引き込みは、海を浅くして大陸をつくり、弱酸性の雨で陸上の岩石から溶かし出された栄養塩が沿岸部にながれこみ、活発な生命活動を可能にして多細胞生物への進化を可能にした。生物の陸棲化はこのような地球の周辺・内部のイベントにより条件が整えられた。

生命にとって、放射線は変異原として進化を駆動してきたし、淘汰圧の一つとして見ることもできるかもしれない。生物は進化の産物として、遺伝的な安定性を確保するさまざまな仕組みを編み出してきた。放射線による遺伝子の障害に対しても、アポトーシスにより取り除いたり、あるいは遺伝子を修復する仕組みが作られている。放射線の生物影響としては遺伝子そのものへの損傷ばかりでなく、その周辺、さらに細胞質への影響も知られている。

ところで化学のキモは、物質の質量は原子核を構成する陽子と中性子の総数がきめ、大きさや形は原子(分子)の電子軌道がきめるということにある。最外殻の電子軌道が化学結合や反応を規定し、さらに生命現象は複雑な化学反応と分子のあいだの相互作用に織り込まれている。エネルギーの範囲でみればその上限はおよそ 100eV である。一方、放射線は原子核の物理だって、核子の相互作用は核子あたり 1MeV である。錬金術は否定され元素は不変の前提で「煮炊き」している日常から、原子核の物理の世界に切り替え、しかもその生物影響を考えるという挑戦である。

放射線を測り、そのリスクを判定することの難しさに対して、どのような貢献が可能かを考え活動している。

測るべき放射性核種の濃度

放射線の生物影響を測る単位は Sv であり、単位質量あたりの物質を放射線が透過する際に吸収される放射線のエネルギーである Gy に放射線の生物影響の重大さを反映する係数を乗じた単位が使われている。放射線が生体内でどのような現象をさまざまにひき起こすか またその仕組みが詳しく解明されてきており、細かな議論が可能である。

さて、放射線の問題のひとつは、その影響の激越なことにある。放射線を測る単位は、Bq という、1 秒あたりの放射性核種の崩壊により出てくる放射線の数があてられている。いわば（崩壊する）原子の数で放射線の強度を測っている。その放射性核種の存在量（濃度）は、その核種の半減期によってきまる。半減期が短ければ、その核種の存在量は少ない。放射性セシウム； ^{134}Cs , ^{137}Cs の半減期はそれぞれ 2.06 年、30.1 年で、福島原発事故（2011 年 3 月）ではおよそ 1:1 の割合で放出・汚染された。半減期の短い ^{134}Cs は少なくなり ^{137}Cs が主たる放射性核種となっていく。

セシウムイオンに包接することで緑色の蛍光（カリウムイオンでは青色）を発する試薬が開発され、除染作業などに活用するのが可能ではないかとの発表が物質・材料研究機構からなされた。ところで、もしこれを汚染された土において放射性セシウムを可視化するとしたらつぎのような問題がある。土のなかに含まれる安定同位体のセシウムの濃度は、0.3 から 25ppm (カリウムは 400 から 30,000 ppm) であり、植物体では乾量ベースで 0.2ppm である。空間線量率が $10\mu\text{Sv/hr}$ の場所（福島でも汚染度の高い部位である。東京での空間線量率は $0.1\mu\text{Sv/hr}$ ）の土は、およそ 100,000 Bq/kg の放射性 セシウムを含むと推定される。 10^5 Bq の ^{137}Cs 原子は 10^{14} 個、 10^{-10} モル、 10^{-8} g に相当し、 $10\mu\text{Sv/hr}$ の場所では 10^3 g の土のなかに 10 ppt の放射性セシウムを含むことである。土中の安定 Cs 同位体（3 ppm）より 5 桁、K (10^4 ppm) より 9 桁少ない。すなわち、比較的高汚染の状況であっても放射性セシウムの濃度をこの方法で可視化するのは自然に存在する安定同位体に隠れてしまい困難と判断される。

放射性ストロンチウムはガンマ線を出さずベータ線のみを放出する。ストロンチウムは内部被曝するとカルシウムと化学的な性質が似ているために骨に集まり、そこで飛程の短いベータ線を発し、骨髄での造血機能に障害を与える。幸いなことに、福島原発事故での放射性核種の放出では、爆発イベントでの温度が低かったことに起因して、気化温度の高いストロンチウムの放出は、セシウムやヨウ素と比べると少なく、放射性ストロンチウム（ ^{90}Sr ; 半減期 30 年）の陸上での放出量はセシウムのおよそ 1% ほどと いくつか場所での測定で示されている。海中での汚染についても同様なようである。放射性ストロンチウムを分析しようとする、その標準的な方法では化学的な処理プロセスを含み、多くの日数を要する。これに対して、質量分析により放射性ストロンチウムを短時間で検出する手法が産業技術総合研究所の研究者により開発されている。試料を処理してからジピコリン酸を加え、MALDI によりイオン化して分析する手法とのことである。

安定同位体 ^{88}Sr は土中に 50-1,000ppm、生物体内には 20ppm 含まれる。放射性ストロンチウムが放射性セシウムの 1 % とすれば、放射性同位体の ^{90}Sr は空間線量率

10 μ Sv/hr の場所での濃度は 0.1ppt と推定される。提案されている方法で安定同位体のピークから 2 amu 高い場所に 10⁻⁸ から 10⁻¹⁰ 小さなピークを検出することができれば、放射性ストロンチウムの分析に上記 質量分析の手法を活用することができる。

電離放射線計測の原理

物質を電離させる能力をもつ放射線は、化学現象におけるエネルギーとは桁違いに大きなエネルギーの関与する原子核のなかの相互作用で発生する。アルファ線、ベータ線や宇宙線は高エネルギーの粒子であり、ガンマ線は波長の短い電磁波である。放射線の生物影響はガンマ線そのものを分子が吸収しておこるのではなく、ガンマ線が散乱させる電子によるとみることができる。ガンマ線のエネルギーを幾ばくか移した電子がラジカルや過酸化物を生成し、それが生体分子と反応し さまざまな障害を引き起こす。

過飽和の蒸気を満たした中に宇宙線やアルファ線が入射すると、その飛跡にそって機体が電離する。イオンは格好の凝縮核となり、蒸気は凝縮して飛跡が可視化される。電離箱は放射線による電離を測定するもので、積算線量計としてもはたらく。ガイガー管式線量計は、放射線の入射による放電現象の頻度をもとに線量率をもとめる。福島原発事故以前には、通常使用される線量計のほとんどはガイガー管式であった。入射窓材を薄くすることでアルファ線、ベータ線、ガンマ線に感度があり、入射窓を適当に遮蔽すればガンマ線成分のみを測定することも可能である。しかし、ガンマ線のスペクトルから詳しく核種を同定することはできない。

ガンマ線のエネルギーによって検知センサーからのパルス波高やパルス部の積分面積が変わることを利用してスペクトルをもとめ、ガンマ線を出す核種を判定する線量計は、PIN フォトダイオードをセンサーにしたり、あるいはいくつか種類のあるシンチレータがガンマ線入射により光るのを PIN フォトダイオードやフォトマルチプライヤーで計測する。シンチレータが大きければ感度も高く、食品の放射能成分分析器や放射性核種による体内被曝を検査するホールボディカウンタ(WBC)で微小な放射線を検知・定量するのに用いられている。エネルギースペクトルの分解能が高いのは Ge 半導体式のセンサーであり、多様な放射性核種が含まれる時や低濃度の放射性核種を分析するのに威力を発揮する。

福島での原発事故があってから、放射線計測の技術やその理解は大きく進んだ。はじめは、チェルノブイリ原発事故のあとに開発され使われてきたり、原発など管理区域で使われてきた機材が、個人用の線量計、食品用の計測装置、WBC などに利用された。ところが、体内被曝をとっても、自家栽培野菜や野生のイノシシやキノコなどを食用した住民の方々を除けば、体内被曝の程度はとても低く、ガンマ線による外部被曝がリスク管理の対象としてある状況であった。ただし、住民の体内被曝の不安に応える WBC 検査をおこなうには、自然放射能として食品から摂取しているカリウム 40 の線量率（体重 60kg で 3,000 Bq）の一桁低い放射性セシウムからの放射線 300 Bq を検出限界として設定する必要がでてきた。不安の対象が、子供ということであるので、体の小さい分、さらに低い感度が要求される。原発などでの作業者のスクリーニングで用いられてきた WBC は意図的な線源持ち出しを防ぐという目的もあって、感度はあまりなく、核種判定もされないことが多かったようである。除染作業者の被曝管理で使われた WBC ではカリウム 40 も「込み」の値が出力されていたのだが、こ

のころ核種判定できる高感度の WBC にかわり、放射性セシウム非検出という検査レポートが出てくるようになり除染現場では戸惑いがみられている。

食品に含まれる人工放射能の基準は、自然放射能にヒトを含む地球生物は適応しているというロジックから人工放射能を加えても人工放射能分の 2 倍までにとどめるというのが基本の考えとして設定されている。生涯（100 年）で自然放射能 100mSv に被曝、100mSv 以下の低線量被曝の生物影響は有意にあるのかは科学としてわからない（ほどに影響はない）というので、放射線影響には閾値はなく、高線量での影響をもとに 0 近くは比例係数をそのままのばそうというのが規制のベースになっている。放射性核種の種類によってどの臓器に集積するかしないか、どの経路をとって摂取された時に生物学的な半減期（体外への排出速度）は詳しく調べられている。セシウムでは生物学的半減期は大人ではおよそ 100 日、小児ではもっと早い。政府は、福島原発事故後に食品の基準を それまでの 500Bq/kg から 100Bq/kg へと厳しくした。ウシは全頭検査、福島のコメは全袋検査の体制がしかれ、昨秋からは検出限界 25 Bq/kg の検査システムが使われている。

食品のなかで事故後 2 年目でも頻繁に食品基準超えが出ている一つは、茶葉であり、かなり遠隔の地でも放射性セシウム汚染は酷い。菌根菌系のキノコについては、セシウムの移行係数がとても高く、福島から離れた地域で基準を超えるサンプルには、セシウム 137 のみで半減期の短いセシウム 134 が検出されないサンプルがある。これは 1970 年代まで盛んに行われた大気圏核実験で地球全球に撒き散らされた放射性セシウムが残っていて、キノコの子実体のなかにいまでも移行していることを示している。

全頭検査だから牛肉を食べるのがよい とは薦めないが、ことコメに関しては茶葉でセシウムが見つかる地域の谷津田で栽培されたコメよりは、全袋検査されている福島のコメのほうがリスクは低い。事故直後に、検査されていても水道水は不安だとして、放射能の基準が水道より 5 倍以上ゆるいミネラルウォーターを使ったり、ガンマ線が地上より 10 倍、中性子が 100 倍高い航空機で日本から脱出したりといううちぐはぐが見られたのは今後の教訓とすべきである。

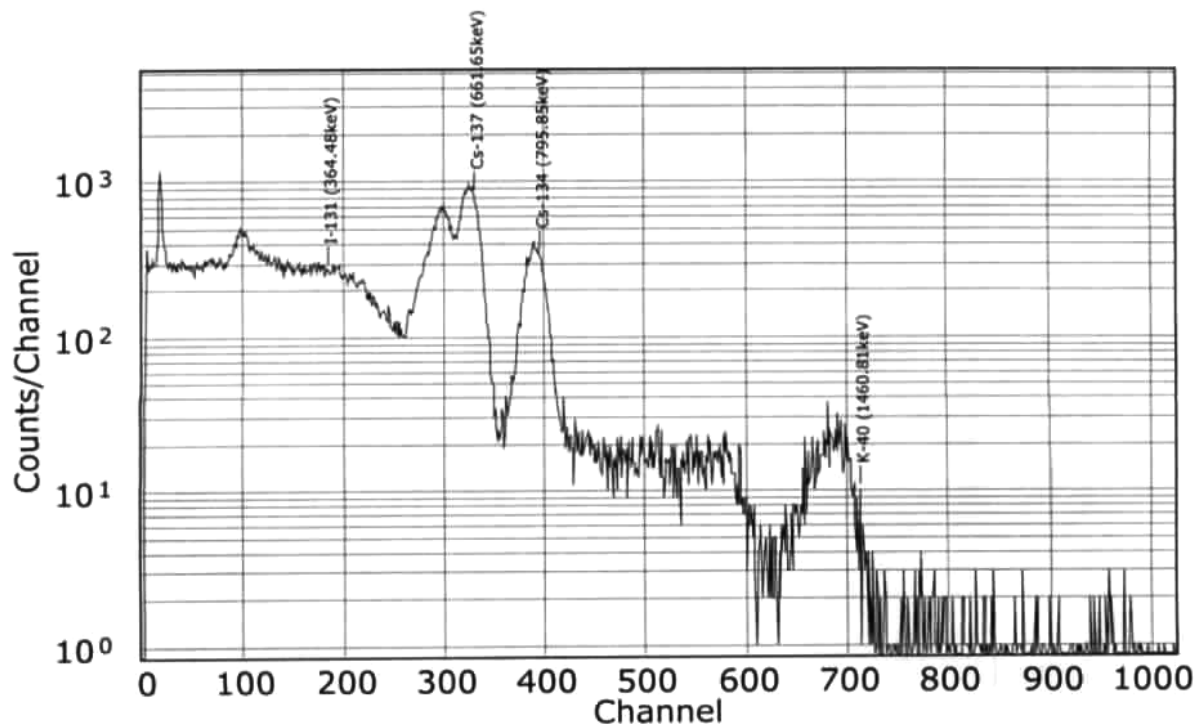
コメやコムギの穀粒のなかに放射性セシウムやストロンチウムがどれくらい混入していたかは、1960 年代から継続して計測されてきているので参考になる。関連した国による継続モニター事業のなかには、原発事故直前に「仕分け」で打ち切りになった事項もあるようで、適正に修正されることが望まれる。

放射線測定の実際

福島県では被害を受けた市町村に食品検査機が配分されて、住民の持ち込むサンプルを検査する体制が整備されている。2 インチの NaI シンチレータをつかった食品検査機の検査結果とそのもとになるガンマ線スペクトルを次に示す。

【 放射能定量結果 】

No	判定	核種名	エネルギー (keV)	ネット面積±誤差 (Counts)		放射能濃度±誤差 (Bq/g)			検出限界 (Bq/g)
1	不検出	I-131	364.48	N. D.		N. D.			8.99
2	検出	CS-137	661.65	18300	± 460	385	± 70.0		5.61
3	検出	CS-134	795.85	8320	± 293	209	± 38.3		11.4
4	不検出	K-40	1460.81	N. D.		N. D.			68.0
Cs合計 (Cs-134 + Cs-137)						593	± 79.8	(17.0) (誤差は3σ)	



パルス波高分析器のチャンネル番号が横軸であり、ガンマ線のエネルギーに変換できる。縦軸はその波高で光ったパルスの頻度である。分析対象の核種としてヨウ素131、セシウム134, 137と自然放射能であるカリウム40が解析されている。それぞれの核種で解析したピークのエネルギー値が図中に記されている。Cs-137のピークの左にあるピークはCs-134に帰属される。

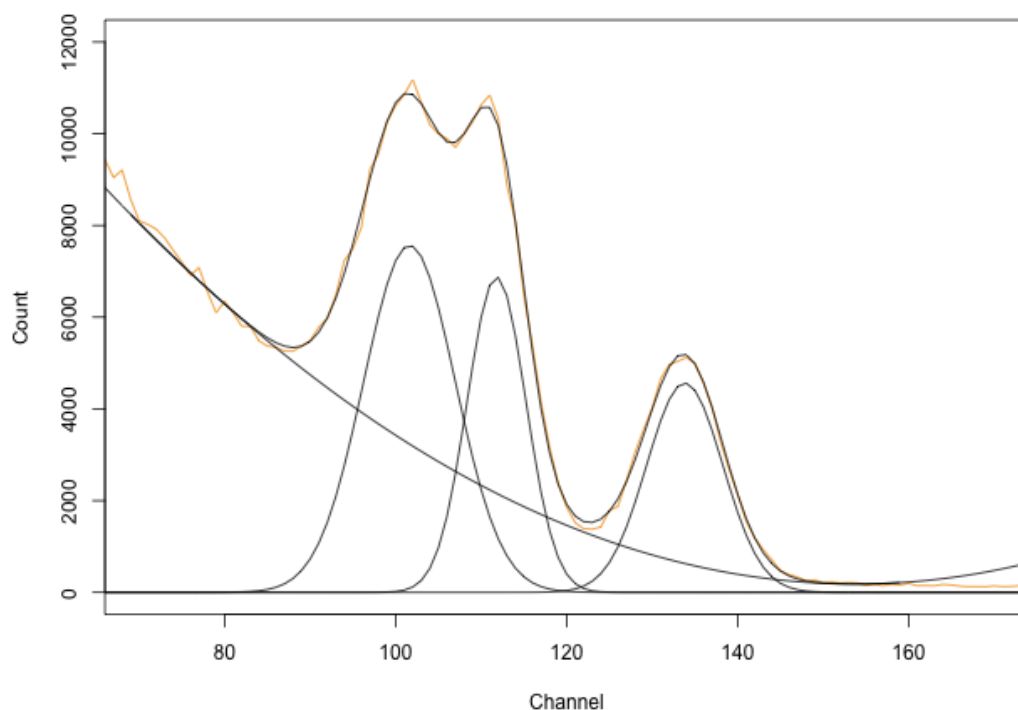
この分析機では、サンプルをなにも入れずにバックグラウンド (BG) のスペクトルを測定し、サンプルを入れて計測したスペクトルから差し引く。測定する核種に帰属できるピークの周辺の部分 (Region of Interest; ROI) でのパルス積算係数値の BG からの差分を求め、それに検量線にしたがう係数を乗じてその核種の分析値とする。

ここに示す分析報告では K-40 が非検出 (ND) とされているが、スペクトルをみると、K-40 のピークはある。チャンネルとガンマ線エネルギーの変換 (エネルギー較正) が不適切であり、K-40 のピークがあるにもかかわらず非検出になっている。(装置の売価の関係から?) 自動エネルギー較正機能が組み込まれていない装置をさほど背景知識の十分でないものが運用している怖さではある。

放射性セシウムで汚染された地域で計測すれば遮蔽しても BG でセシウムの ROI 部でカウント数は多くなる。放射性セシウムを含まないサンプルを計測すると、サンプルによる遮蔽効果で、結果として負の検出値を報告することにもなりかねない。サンプル中に放射性核種が含まれても、サンプルによる自己吸収の効果を正確につかむ

のであれば、例えばコメであれば検量線をもとめるには汚染度合いの知れたコメを同じような量、形態で検査機に詰めて計測する必要がある。

ROI 設定、総係数値を BG と比較するという方式で困るのは、セシウムのピークより高エネルギー側にする K-40 のセシウムのピーク部分への寄与である。1MeV あたりでカウント数が減ずるのは、K-40 のガンマ線のコンプトン散乱の高エネルギー側の端がそのあたりにあるということで、セシウムのピーク部分では K-40 の多寡によりベースラインが上下する。この効果を避けるには、ベースラインや3つのピークをフィッティングすることにより、ピークの情報のみを取り出して定量することである。そのひとつの例を下に示す。ここでは R を用いて、ピークの形状はガウス分布、ベースラインは2次式を仮定してフィッティングしている。エネルギー較正が



十分になされておれば、ピークを中心位置は固定してフィッティングすることができる。

測定と統計

ただしい分析結果を出すのが究極の目的ではあるのだが、生産者と消費者では利害が相反するのも確かである。生産者にとっては放射能物質が「ない」のに「ある」と測定するリスクに目が向くし、消費者は「ある」のに「ない」と判定されるのは困る。政府などが制定する「検査のしかた」などでは、測定にかかわる統計がその基本の一つになっている。スクリーニングでの検出限界は食品基準 100 Bq/kg に対して 25 Bq/kg が求められる。測定値は正規分布をとるのが一般的であり、もし正規分布なら 3σ で判定を外す確率は 0.3% である。 2σ では 4% は外す確率がある。

実験の結果を統計的に処理して確からしさを判定する 作業仮説を立てたあとでどのように対照群を設定したり実験設計するかは科学の分野を問わずたいせつなことだ。

高校生を対象とする国際生物学オリンピックの問題でも統計は必ずでてくるのだが、日本の高校の理科では履修されていないし統計の手法を会得している教師の割合はとても低い。放射能の計測を一つ契機にして測定と統計について学習する機会が増えるとういと考えている。基本は、自分たちが計測して自分たちに対するリスクを自ら判定する能力をつけることである。リスクに無頓着であったり、逆に 1Bq/kg であれ有限の値が示された時に、他のリスク要因にはおかまいなしに過敏に反応するといったことに対しては正していきたい。

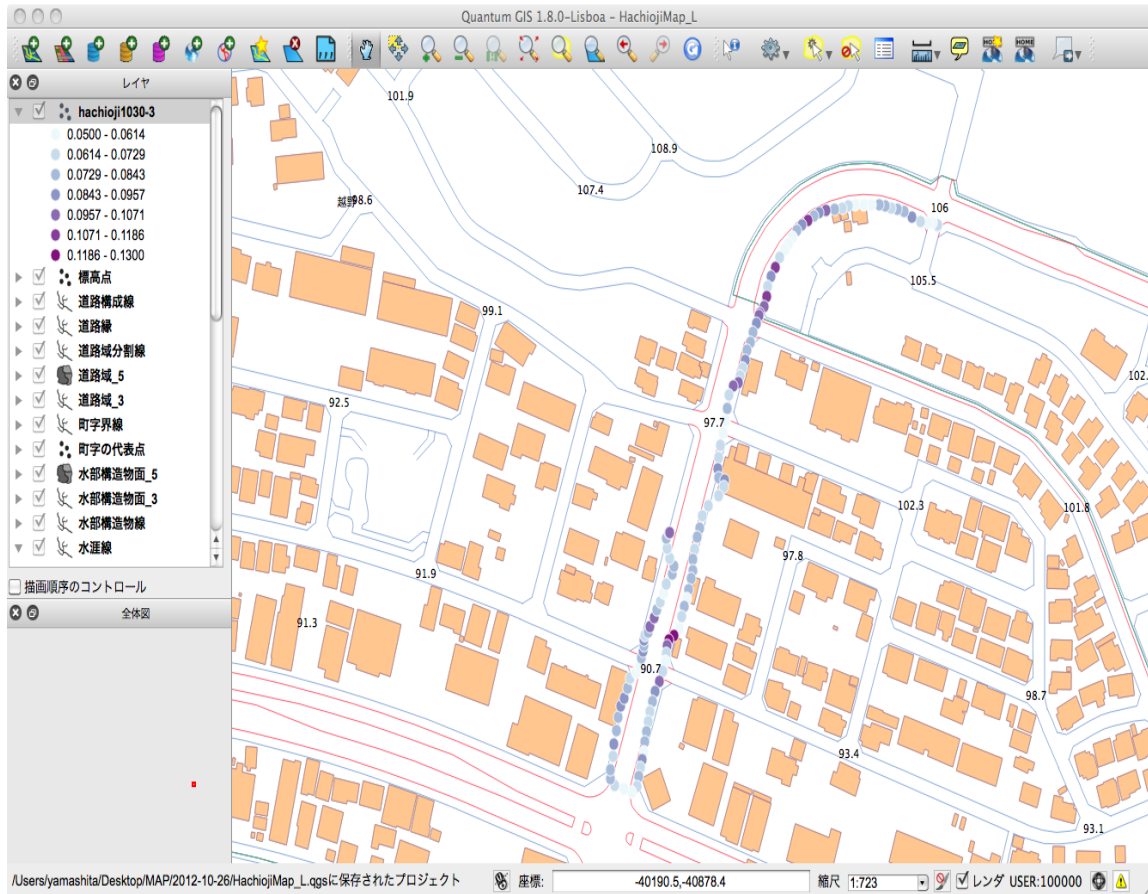
放射線マッピング

住民が避難させられてきた地域の幾つかで、除染したとしても生活環境が回復できないと判定される区域、除染して被曝基準をクリアできそうな区域、再事故のリスクも低まった現在 除染すれば帰村できる区域に区分けされ、一部では帰村が進んでいる。国による放射線継続モニタリングや定期的な線量測定の結果と判定をそのまま受け入れる気風は薄い。やはり自分たちの手で測定し、判断する能力を保持することが望まれる。

そこで、簡易な方法を住民に提供できないかといろいろ検討している。市販の線量計の幾つかには GPS レシーバーを内蔵したり、あるいは GPS 内臓のスマートフォンと一緒に動かすことにより、線量計測と測位を同時におこなうものが市販されている。共通する問題のひとつは、Google Map やスマートフォンに付属する地図アプリケーションが使われていたり、製作会社のサーバーに測定データが（一般公衆に公開されないにせよ）集められることにある。収集されたデータはその後さまざまに使われるリスクがあるし、そもそも携帯電話キャリア会社のアンテナがまばらな山中では線量計測・測位アプリケーションを使うことができない。

線量計の感度は、移動計測をおこなう手段により要求が決まる。車で走行しながら細かな線量マッピングを行い、ホットスポットの発見などを行う場合には、シンチレータが 1 インチ以上の大きさの高感度（線量あたりの計数率が高い線量計）を用いる必要がある。測定エリアを徒歩で走査する場合には 1ml サイズのシンチレータでもよいかもしれない。PIN フォトダイオードのみの線量計や小さなガイガー管式ではこの目的には感度が不足する。

地図としては国土地理院が提供し地方自治体がよく利用する Geological Information を開発した。ここに示す例は八王子市の公道の歩道での計測結果である。一部表示点が私 System (GIS)を用い、線量計測・GPS 測位情報を処理して GIS の地図の上に表示する手順有地に食い込んでいるところはあるが、数千円の価格の GPS 受信機であっても、捕捉する GPS 衛星の数に依存するのだが、十分な即位精度を得ることが出来る。



生活用水の線量計測

帰村の進んでいる地域では、沢水・井戸水を生活用水として利用してきた地域が多くあります。水試料を濃縮あるいはろ過して測定することにより、測定感度の上昇、線量測定時間の短縮をはかることを提案しています。

飲用水の基準 10Bq/kg を適用して分析しようとする、Ge 半導体式測定機での長時間にわたる測定が必要です。測定資源に限られると、実時間でその水を利用するかどうかの判定ができません。住民による簡易な水測定を可能にすることにより、大雨が降った後はどうだといった点を評価するための生活用水について継続的なモニターも可能です。

家庭用のフィルターとして市販されている 1) RO (逆浸透膜) 式フィルター、2) $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ミクロン孔径のフォローファイバーによる簡易な浄水器により試料の水をおよそ 1,000 倍に濃縮して線量計測します。放射能汚染のモニターばかりでなく、RO フィルターあるいは浄水器により清浄とした水を生活用に使うこともできます。

さまざまに福島での問題に取り組んでいます。いろいろご助言・支援いただけると幸いです。