

講演

福島の内被ばくと外被ばく 福島のロングテール

東京大学 早野 龍五

東京電力福島第一原発の事故により、福島県を中心とする地域の土壌は高濃度に汚染され、住民が内部被ばくと外部被ばくのリスクに曝された。特に、チェルノブイリ事故の経験に照らすと、平均的な内部被ばくは数 mSv に達すると、当初予測された。しかし、実際に大規模なホールボディカウンター測定を行ったところ、住民の平均的な体内放射性セシウム量は、冷戦時代よりも少ないことが明らかになってきた。福島における内部被ばく・外部被ばくの実測データを紹介し、今後を考える。

I. はじめに

1. 背景—特に給食検査

私は、ジュネーブの CERN 研究所で反物質を研究している実験物理学者ですが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災、それに続く東京電力福島第一原発の事故に関して、ツイッターを用いた情報発信を行っておりました。最近の東北大学の研究によれば¹⁾、当時 7 番目に影響力のあったアカウントだったそうです。

ツイッターには、多くの方々が何を考えておられるか、リアルタイムでフィードバックがあるという、従来メディアには無い特徴を持っています。その中で、2011 年の 6 月頃に、多くの方々が内部被ばく、特にお子さんの内部被ばくを心配しておられました。しかし当時、内部被ばくの実態を明らかにするデータはありませんでした。

そこで、私は、大勢のお子さんの内部被ばくを低コストで明らかにするやり方として、給食の測定を文科副大臣に提案いたしました。給食で出されたものを全部ミキサーにかけて、ゲルマニウム半導体検出器（以下、ゲルマと略記）で測る。これを長期に継続し、給食で摂取したセシウムの総量を知ろうという提案です。

この提案は、平成 24 年度、文科省の給食のモニタリング事業として予算化され、福島県及び周辺県で、測定が始まり、今年度も復興庁が引き継いで測定が行われています。

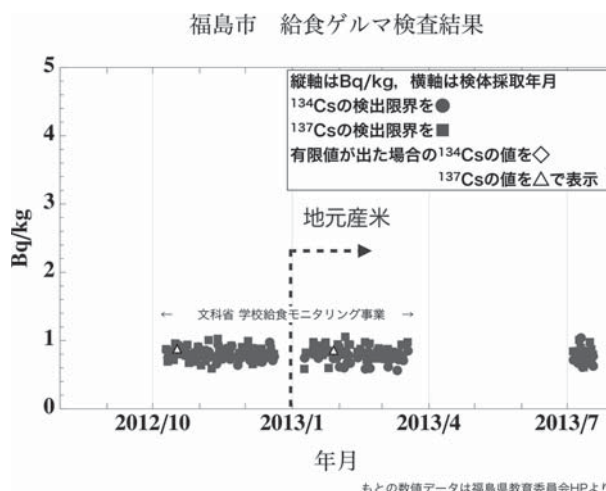
現在までにすでに多くのデータが蓄積されているのですが、その一例として、第 1 図に、福島市における測

定例を示します。給食に含まれる放射性セシウムは検出限界（約 1Bq/kg）未満で、検出されたとしても限界ぎりぎりの値です。福島県内の他の市町村のデータも、同様な結果になっています²⁾。

福島市では今年 1 月から、地元産の米を使うようになり、内部被ばくのリスクが高まるのではないかと心配された方も多かったと聞いていますが、第 1 図のデータを見ると、1 月以降の放射性セシウム濃度に変化は見られません。このようなデータは、今後も長期的に測定・公開していく必要があります。

2. ホールボディカウンター（WBC）

給食検査を提案した、2011 年の夏、県内のお医者さんから、ホールボディカウンター（WBC）検査結果が



第 1 図 福島市の学校給食まると検査の結果
 (^{134}Cs の有限値◇は検出されなかった)
 福島県教育委員会発表資料より作成²⁾

Internal and External Radiation Exposures of Fukushima Residents: Ryugo HAYANO.
 (2013 年 10 月 15 日 受理)

おかしいので、助けてくださいというメールをいただきました。そこで、現場に伺い、病院だけではなく、市民測定所などのデータも拝見し、WBCの測定精度の確立、結果の読み方、伝え方などを、現場の方々と一緒に考えてまいりました。

II. 福島の内被ばく

1. 議論のベースライン

最初に、議論のベースラインとして、自然放射線による日本人一人あたりの年間実効線量を見ておきましょう。「新版・生活環境放射線(国民線量の算定)」³⁾によると、内被ばく(経口摂取)は、鉛210、ポロニウム210から0.80mSv/年、炭素14から0.01mSv/年、カリウム40(⁴⁰K)から0.18mSv/年、合算で約1mSv/年とされています。

一方、成人が長期的に¹³⁷Csを食べ続けて1mSv/年に達した場合、その年間摂取は約70,000Bq(1日の平均摂取は約190Bq)、その方をWBCで測定すると、約27,000Bq/全身(体重あたりの濃度にするると約400Bq/kg)になります。差分の43,000Bqは、尿などから排出される分です。

これらは、目安として覚えておいていただくと良いと思います。

2. ホールボディカウンターの特長

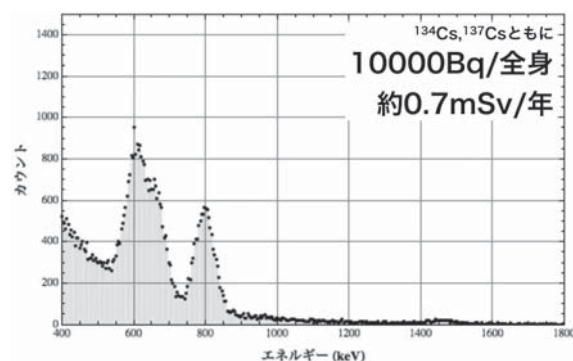
内被ばくされている方を実測すると、どんなデータが見えるか、およその感覚をつかんでいただくために、第2～5図を用意しました。これらは福島県内で最も設置台数の多いWBC—FASTSCAN—の実測に基づいてシミュレートしたWBCスペクトルです。

まず、第2図は¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに10,000Bq/全身という方のスペクトルです。預託実効線量にすると、1mSv/年に近い。¹³⁴Csの2つのピーク(約600keVと800keV)、¹³⁷Csのピーク(約660keV)がくっきり見えます。これだけはっきりしていれば、少々遮蔽等に問題があるWBCで測定しても、見落とすことはありません。

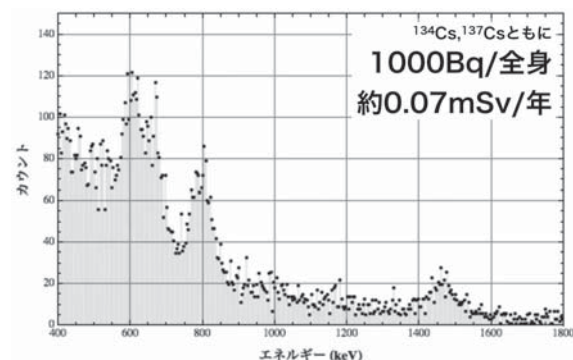
次の第3図は¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに1,000Bq/全身、年に0.1mSv弱ぐらいの方のスペクトルです。約1,500keVのところに⁴⁰Kのピークも見えます。

次の第4図は、¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに300Bq/全身、0.02mSv/年程度で、先に述べた⁴⁰Kによる年間の被ばく量の10分の1ぐらいに相当します。FASTSCANでこういう方を測定すると、ピークが見える時もあるし、見えない時もある。このあたりが、FASTSCANで2分測定した場合の検出限界です。

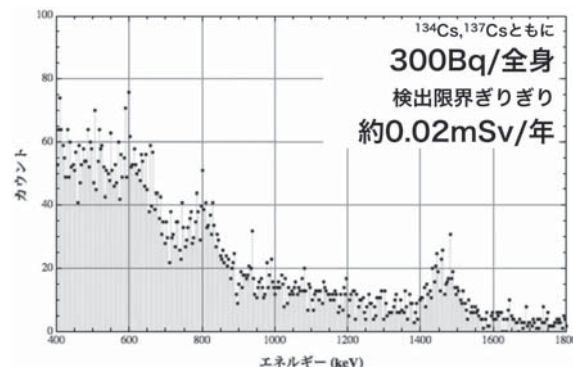
シミュレーションですから、もっと値が低い場合のスペクトルも作ることができます。第5図は100Bq/全身が実際に入っているシミュレーションですが、スペクトル



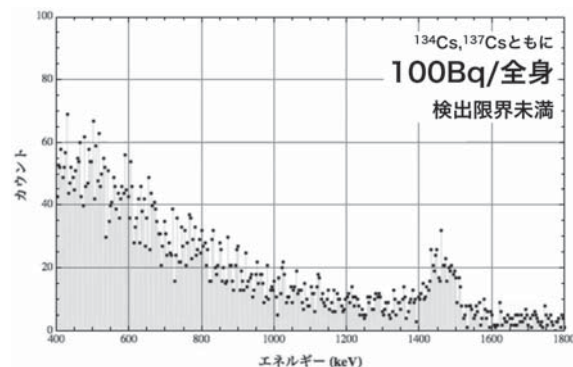
第2図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに10,000Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第3図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに1,000Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第4図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに300Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)



第5図 ¹³⁴Cs、¹³⁷Csともに100Bq/全身の場合 (WBCカウンターのシミュレーション結果)

ルにピークは見えない。検出限界未満です。福島県内で現在 WBC 測定すると、ほとんどがこのスペクトルのように見えます(ゼロですかと言われると、ゼロではないかもしれないと答えるしかないのですが)。

3. 福島県内の土壤汚染

福島県内の土壌は、不幸なことによりかなり高濃度に汚染されました。福島市や郡山市などの人口密集地でも、 ^{137}Cs だけ見ても、典型的に $100,000\text{Bq/m}^2$ あります⁴⁾。

チェルノブイリの事故の2年後に出された国連の科学委員会(UNSCEAR)の報告書⁷⁾には「 ^{137}Cs が $1,000\text{Bq/m}^2$ ある土地に住んでいる方は、汚染食品由来の内部被ばくが、 $20\mu\text{Sv/年}$ になる。」と書いてあります。それに従って計算すると、福島市、郡山市の平均的な内部被ばくは年に 2mSv ぐらい、事故後、数年は ^{134}Cs の寄与も足さねばなりませんから、 5mSv/年 に達するのではないかと、世界中の専門家が心配されたはずです。

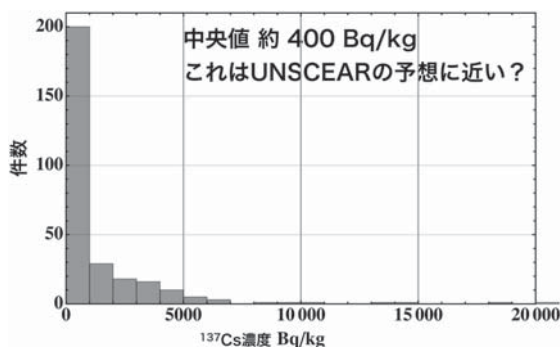
(1) 土壌汚染と比例するような実測データ

実際に、福島で実測されたデータ、第6図を見てみましょう。

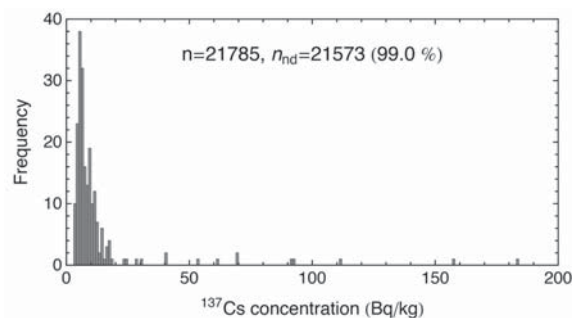
この分布の中央値をとりますと、大体 400Bq/kg で、先に示した UNSCEAR の予想に近い値ですが、これは、人間を測ったデータではありません。福島のイノシシを測ったデータです。もちろん、食物も生物学的半減期も人間とイノシシと違いますので、単純な比較はできませんけれども、確かに土壌は汚染されていて、そこに暮らしている生物は、かなり内部被ばくがあります。

(2) 福島の住民の大規模 WBC 測定結果

それでは住民の WBC 測定結果はどうか。福島県が発表している WBC による内部被ばく検査⁵⁾を見ると、2013年8月までに検査を受けた方149,592人中、149,556人(99.98%)が預託実効線量 1mSv 未満となっており、先に示した数 mSv という予想よりも低いことがわかります。しかし、公表されている統計が 1mSv 刻みというかなり粗いものなので(先に述べたように、 1mSv/年 は $70,000\text{Bq}$ 摂取に対応)、この統計だけから



第6図 福島県内で捕獲されたイノシシ肉のセシウム濃度
(注：食生活も生物学的半減期が異なるので、住民の内部被ばくと単純比較は出来ない)



第7図 ひらた中央病院での WBC データ
セシウム検出者の体内セシウム濃度分布⁶⁾

は、福島県内の内部被ばくの実態を十分に読み取ることにはできません。

そこで我々は、2012年の春から2012年の冬にかけて、福島県内の約22,000人を測定し、最近論文で公表しました⁶⁾。FASTSCANを用いた測定で、セシウムが有為に検出されたのは約1%、子供に限ると0%です。第7図は、検出者の体内セシウム濃度のグラフで、横軸のスケールは、先ほどのイノシシのグラフの100分の1です。

グラフの右端あたりが、 ^{134}Cs も考慮して 1mSv/年 に相当。ピークがおおよそ 10Bq/kg ぐらいにありますが、これは大気圏内核実験の結果として、1964年に日本人の成人男性にあったセシウム濃度⁸⁾とほぼ同じです。

論文6)では、この他に、2012年の秋に三春町の小中学生ほぼ全員(95%)を WBC で測定したところ、セシウム検出者が一人も出なかったということも示してあります。内部被ばくのレベルが低いことが、サンプリング・バイアスによるものでないことを示す重要な結果です。

このように、今の福島の内部被ばくというのは、大多数の人は検出限界未満で、検出される方も、第7図の程度ということがわかってきました。先に述べたように、WBC の検出限界が、おおよそ ^{40}K による内部被ばくの10%程度のレベルだということを、リスクの判断に使っていただければ良いと思います。

Ⅲ. 福島のロングテール

1. 内部被ばくのロングテール

第7図は、福島の内部被ばくが平均的に低いことを示しているのですが、その一方で、平均よりもかなりかけ離れて高い数値を示す方もおられることを示しています。このような「はずれ値」の分布のことを、一般的にロングテールと呼びますが、実は、福島の内部被ばくに関連するデータを見る場合は、ロングテールに注目することが大事です。

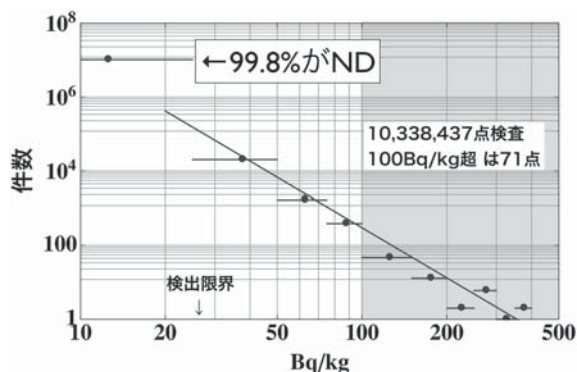
最初の例として、平成24年度福島産玄米全量全袋検査の結果を第8図に示します。データは、「ふくしまの恵み安全対策協議会」が公表⁹⁾しており、2012年度は、

約 1,000 万袋の玄米を測定し、99.8%が不検出、100Bq/kg 超が 71 袋でした。それを、第 8 図のように、両対数で表示してみると、ロングテールがある様子がよく分かります。

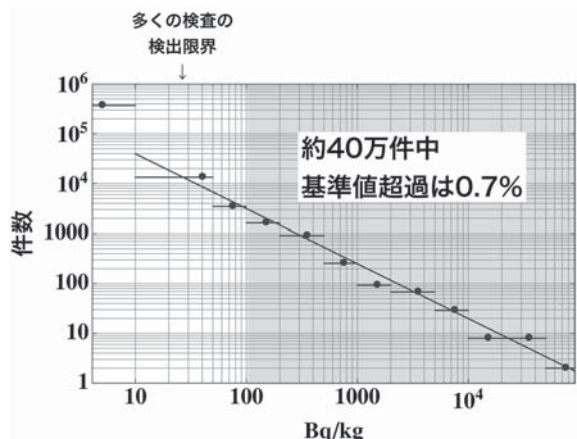
一般食品についても同様です。2012 年 4 月に、一般食品の基準値が 100Bq/kg と定められて以来、全国の自治体で測定された食品のセシウム濃度を、厚労省が連日ホームページで公開しています(全国の自治体で 2013 年 9 月までに約 40 万件以上—ほとんどは非流通食品—を測定し、基準値を超過したのは 0.7%)。それを、第 9 図のように両対数で表示してみると、やはりロングテールが見えます。

内部被ばくを考える上で、もう一つ重要なのは、基準値を超過したのは、どういう品目かということです。2013 年度になって、肉類で 100Bq/kg を超えたものはイノシシ、シカ、ツキノワグマ、ヤマドリだけです。これを常食される方はほとんど居られないでしょう(第 1 表)。農産物で 100Bq/kg を超えているのは、主として山菜で、これも 1 年を通じて、非常にたくさん食べるというものではありません(例外として大豆があります)。

WBC の検査というのは、これらの食品を摂取した結果、人体にどれだけセシウムが取り込まれているかを見



第 8 図 平成 24 年度の福島県産米の全量全袋検査結果を両対数グラフで表示



第 9 図 厚労省 HP 掲載：食品のセシウム検査結果（平成 24 年 4 月～）を両対数グラフで表示

第 1 表 平成 24 ～ 25 年の食品検査で 100Bq/kg を超えた品目（非流通品：平成 25 年 8 月末まで）

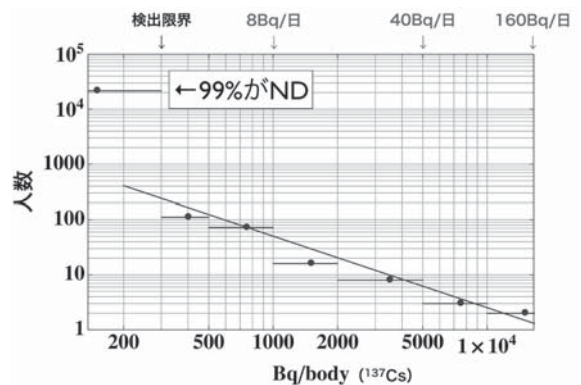
畜産物、鳥獣、卵				農産物			
H24 件数		H25 件数		H24 件数		H25 件数	
イノシシ	373	イノシシ	64	シイタケ	281	コシアブラ	46
ツキノワグマ	95	シカ	15	乾シイタケ	90	大豆	37
シカ	56	ツキノワグマ	10	米	84	タケノコ	32
ヤマドリ	18	ヤマドリ	1	タケノコ	61	タラノメ	25
牛	8			コシアブラ	55	ワラビ	13
キジ	3			干し柿	35	クサソテツ	10
マガモ	3			大豆	23	ゼンマイ	6
カルガモ	3			チチタケ	22	ウワバミソウ	4
ノウサギ	2			クサソテツ	22	乾シイタケ	2
クマ	2			あんぽ柿	21	フキ	2
馬	1			タラノメ	19		
豚	1			ナメコ	15		
				ソバ	14		
				ゼンマイ	12		

ているわけですので、第 7 図のデータを両対数グラフにしてみると、第 10 図のように、ロングテールの存在が明らかになります。

第 7 図の横軸は体内セシウム濃度 (Bq/kg) ですが、図の上には、それに対応した 1 日平均摂取量も示しました。1 日に 100Bq も食べる方というのは、本当に稀であることが分かります。

この 1 年半ばかりの間に、内部被ばくに関してよく分かってきたことは、高い数値になる方は、必ず何か食べているということです。1 日に平均 10Bq ぐらい食べている方は、ほとんどの場合、原因特定が可能です。問診や、その方の食材をゲルマで測定することで、原因が明らかにできます。WBC でセシウムが検出される方は、すでに出荷制限されているような非流通食材を、未検査で沢山食べておられる。そうでない限り、福島で毎日 10Bq の放射性セシウムを食べるのはほとんど考えられない。流通食品の中には、そんなにセシウムが入っていないのです。

第 10 図の一番右側の点は、70 歳の男性で、実効線量で 0.8mSv/年と推定されました。自宅にあった食材を送っていただいて、検査をしてみたら、14 万 Bq/kg の浪江町原木シイタケを常食しておられたということが分かりました。



第 10 図 ひらた中央病院における WBC 検査結果を両対数グラフで表示

問診票などから、どういう水を飲んでいるか、スーパーマーケットで産地を選んで買うかどうかは、内部被ばくの有無と無相関であることが分かっています。上記のように、特殊なものを食べていたことが、内部被ばくの要因になっています。

このように、内部被ばくのロングテールは、原因も、対処法も明らかになってきました。やるべきことは、とにかく大勢測って(それも、だいたいどういう方々かが分かっているので、測定する必要もない)、テールにいる人を見つけて、その人の食事の指導をするという、それに尽きています。

IV. 福島の外被ばく

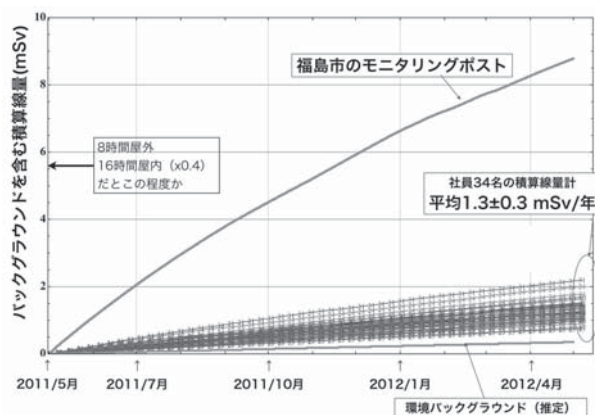
実は、外部被ばくにもロングテールがあるのですが、それを論じる前に、モニタリングポストと個人線量の比較例を示します。

1. モニタリングポストと個人線量

第11図は福島市のテレビ局、テレビユー福島(TUF)の社員34人が、2011年5月から丸1年間、積算線量計を持ち、毎週1回ずつ読み出して記録していたという貴重なデータです¹¹⁾。

34人の1年の積算線量は、バックグラウンドを含んで1.3mSvでした。都市生活者ではありますが、取材で線量の高いところへ行かれた方も多く含まれています。

当該期間に、福島市のモニタリングポスト(県保健福祉事務所)の公表数値を積算してみると、約9mSv/年という結果です。国が示す「追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方」¹⁰⁾に倣って、屋外に8時間、屋内に16時間(遮蔽効果0.4倍)で計算をすると、追加被ばく線量は5~6mSv程度と計算されますが、TUF社員の方々の積算線量は、それよりもかなり低いという結果です。



第11図 TUF社員34名が2011年5月から1年間携帯した積算線量計データ

2. ガラスバッジ

2011年の秋~冬には、多くの自治体がガラスバッジを配布し、その結果(多くは子どもと妊婦)が公表されるようになりました。第12図は、それらのデータを、1年分の線量に引き延ばし、横軸のスケールが同じになるように表示したものです。スケールの最大値が10mSv/年です。2011年の冬の段階で、福島県内の多くの場所で、外部被ばく線量が2mSv/年未満になっていたことが分かります。

第13図は、福島市の、2011年の冬と2012年の冬の結果の比較です。これは、第12図と異なり、両対数で表示してあります。太線が2011年、破線が2012年で、2012年のほうが分布が左に寄っております。2011年冬の測定で1mSv/年と推定された割合は51%でしたが、2012年には89%に増えました。この変化の主な要因は半減期2年の¹³⁴Csの崩壊ですが、一部には除染の効果もあったと考えられます。

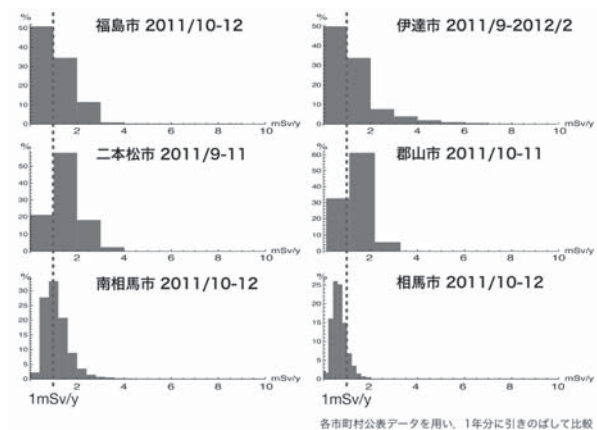
このように、2012年冬には、90%近くの方が、年間の追加被ばく1mSv未満と推定されたのですが、第13図で明らかなように、外部被ばくにもロングテールがあります。内部被ばくの場合と同様、今やるべきことは、どうすればこれらの方々の線量を下げられるかということです。そろそろ、個人線量測定に基づいて、個別対応が必要なフェーズに入っているのです。

3. 1時間ごとの積算線量測定の威力

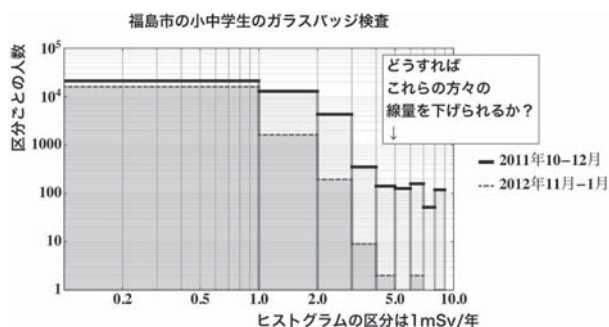
ガラスバッジは、2~3カ月間ずっと携帯するので、その間の積算線量だけ見ても、一体何が原因でその値になっているか、住民の方が理解するのが困難です。

そこで、最近我々が利用させていただいているのが、産総研開発・千代田テクノルの個人積算線量計(通称D-シャトル)¹³⁾です。これは、PCに接続した読み取り機に挿入すれば、過去の任意の期間の、1時間ごとの積算線量を読み出すことが可能です。

内部被ばくについては、WBCを使った内部被ばく検



第12図 ガラスバッジの結果2011
福島県の自治体公表データを用いて著者が作成



第13図 福島市のガラスバッジの結果
2011 冬と 2012 冬を両対数グラフで表示¹²⁾

査結果を、スペクトルを見ながら説明することが、測定を受けられた方に結果を理解していただく上で非常に大事だったのですが、外部被ばくについては、これに対応するツールがこれまで存在しませんでした。私は、まさにその問題を解決できるツールがD-シャトルであることに気づき、最近さまざまな場面で活用しています。

第14図は、少し特殊な例ですが除染組合の方々数十人が装着されたうちの典型例です。1時間ごとの積算線量を示してあります。図の上の方は、除染作業中の線量が高く、 $1\mu\text{Sv/h}$ ぐらいになるとありますが、自宅の線量は低く、1年分の追加被ばくの推計は、 0.8mSv でした。

一方、図の下の方は、除染作業中の線量は余り高くないのですが、自宅の線量が高く、1年分の追加被ばくの推計は 1.4mSv となりました。

田村市都路地区(特例宿泊地域)では、このようなグラフを使って対面で結果を説明する試みが成果を上げています。外部被ばくの分布のテールに含まれる方々について、このような測定をし、対面で結果を説明し、どうやったら下げられるか、自治体の方々も交えて対策を考えることが、そろそろ可能になってきたのではないかと

考えています。

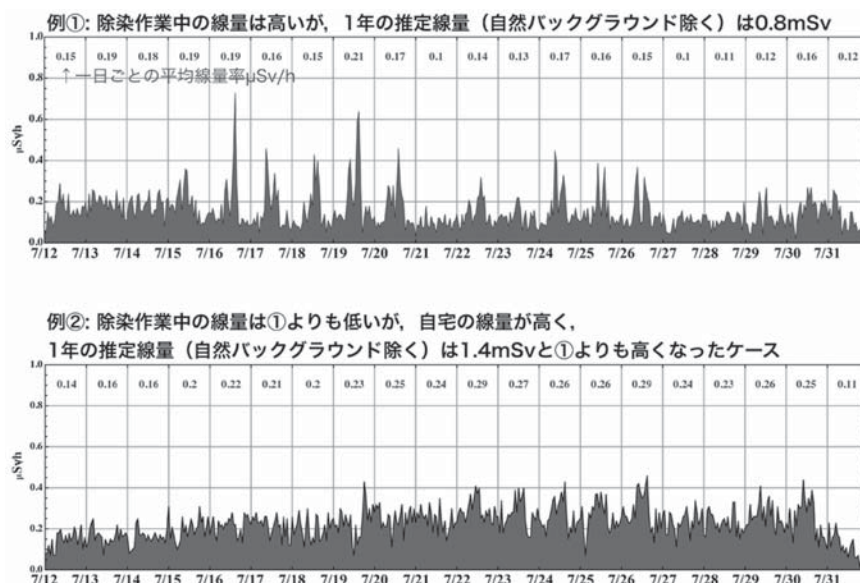
V. まとめ

事故から2年半を経過し、実測データも揃ってきたので、内部被ばくについても、外部被ばくについても、事故当初とは異なるアプローチが可能になってきたと考えられます。

- (1) 個人ごとの内部被ばく + 外部被ばくの線量を把握し、それに基づいた対策を考えることが重要¹⁴⁾。
- (2) 放射性セシウムを摂取することによる内部被ばくが、 ^{40}K の実効線量の10%を超える方は非常に稀で、流通食材を買って、水道の水を飲んでいて問題はない。
- (3) したがって、相対的には外部被ばくのリスクの方が高いのだが、アンケートなどからは、住民の方々の多くが、内部被ばくを心配しておられることが読み取れる。
- (4) 内部被ばくも外部被ばくも、分布にはロングテールがある。したがって、
 - (a) 大勢の測定が重要(そうしないと、テールの方が発見できない)
 - (b) 「平均」だけで論じてはいけない
 - (c) (テールの人には)個人的なフィードバック・対策が必須
- (5) 幸い、テールに属する人数は少ない。個人線量を把握し、個別対策することが可能だし、それが必要な段階にきたのではないかと。

— 参考資料 —

- 1) 東北大学工学研究科 乾・岡崎研究室, Project311
<http://www.clecei.tohoku.ac.jp/index.php?Project%20311/>
 トレンド分析 より (last accessed 2013 年 10 月 1 日)。



第14図 浜通りの山沿いで除染作業従事者の1時間毎の積算線量グラフ(約3週間分)

2) 福島県教育委員会の HP

<http://www.kenkou.fks.ed.jp/kyushoku/monitoring/monitoringpagetop.htm> より (last accessed 2013 年 10 月 1 日).

3) 公益財団法人原子力安全研究協会刊行新版 生活環境放射線 (国民線量の算定) 2011 年 12 月 (表 1.4.1 および 2012 年 12 月の正誤表).

4) 文部科学省による航空機モニタリング結果

<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html> (last accessed 2013 年 10 月 1 日).

5) 福島県によるホールボディーカウンターによる内部被ばく検査

http://www.cms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?CONTENTS_ID=26211&DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004.

6) RS. Hayano, *et al.*, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, Vol.89, 157-163 (2013).

7) UNSCEAR 1988 REPORT, ANNEX D "Exposures from the Chernobyl accident". United Nations, ISBN 13: 9789211422801.

8) M. Uchiyama, *et al.*, *Health Phys.*, Vol.71, 320 (1996).

9) 福島県内の玄米 (H24 年度産) の検査結果

<https://fukumegu.org/ok/kome/year/12> (last accessed 2013 年 10 月 1 日).

10) 例えば「平成 23 年 10 月 10 日 災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会第 1 回合同検討会資料」

http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327 (last accessed 2013 年 10 月 1 日).

11) データ提供: テレビユー福島, データ解析: 早野龍五.

12) 福島市のガラスバジ測定結果

<http://www.city.fukushima.fukushima.jp/soshiki/71/hkenkou-kanril3051601.html> (last accessed 2013 年 10 月 1 日. 注: 2011 年のデータは, 福島市の HP にはすでに掲載されていないようである).

13) 産総研「日々の線量を記録できる個人向け放射線積算線量計」

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120213/pr20120213.html (last accessed 2013 年 10 月 1 日).

14) 福島県内のほとんどの自治体で, 内部被ばくと外部被ばくのデータを名寄せすることが出来ないという問題点があります.

著者紹介



早野龍五 (はやの・りゅうご)

東京大学大学院理学系研究科教授

(専門分野) 原子核物理学, 特に CERN 研究所における反陽子原子の研究。2008 年度に反陽子ヘリウム原子の研究により仁科記念賞を受賞。



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —
(12 月 2 日第 6 回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・ Progress in Nuclear Science and Technology の新規申請を承認した。
- ・ 英文誌の出版状況が報告された。11 月期に 24 論文が投稿された。1 月号電子版公開済み, 2 月号入稿済み。Editorial Summary は無料公開となった。
- ・ 論文の機関リポジトリについて取り扱いを確認した。
- ・ 和文論文数減少の原因を検討し, 部会等に投稿勧誘依頼することとした。
- ・ Physor2014 の JNST 特集号の編集小委員会を承認した。
- ・ 論文誌関連規定類の見直し検討経過が報告された。
- ・ JNST 50 周年記念 Review の進捗状況が報告された。

【学会誌関係】

- ・ 海外情報連絡会会長から, 活動状況の説明を受け, 学会誌記事になりそうなテーマについてディスカッションを行った。年 4 回開催されている連絡会の講演情報の活用, ANS との連携について今後相談しながら進めて行くことになった。
- ・ 経営改善特別小委員会, 理事会と編集委員会との意見交換の結果ついて, 編集長から報告があった。
- ・ 2014 年 3 月号は, 3・11 特別号として「福島原発事故とその後」というテーマで記事企画を行うこととし, 企画内容と進捗状況について報告があった。
- ・ 今後の時論記事, 巻頭言の執筆者候補の選出について検討した。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >