福島原発事故　放射線計算所

(福島原発事故による放射線量と放射線被爆量を計算します。)

この式をどのようにして作成したか

まず、それぞれの放射性物質がどれだけ拡散していったかを考えなければいけません。^{131}I の放出量を a Bq、^{134}Cs の放出量を b Bq、^{134}Cs の放出量を c Bq とし、^{131}I 、^{134}Cs 、^{134}Cs の半減期を t 、u、v とすると、事故後(3/15 後)x 年経ったとき残っている放射性物質のベクレル数を $f(x)$ とおくと・・・

$$f(x)=a\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+b\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+c\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}$$

となります。これをそのまま放射線の変化にしてもいいのですが、厳密に言うとなりません。なぜなら同じ 1Bq の放射線源があっても、元素によってその放射線は強かったり弱かったりするからです。それを考慮するためには放射性物質の崩壊エネルギーを考える必要があります。崩壊エネルギーが 2 倍なら 2 倍の放射線が出ているということですし、崩壊エネルギーが 0.5 倍なら同じ β 線でも放射線の強さは半分です。^{131}I 、^{134}Cs 、^{134}Cs の崩壊エネルギー(放射線強度)をそれぞれ E_a,E_b,E_c とすると・・・・放射線の強さは残っているベクレル数にこの放射線強度をかければ、それが放射線の強さになります。

x 年経ったときの放射能の強さを $y(x)$ とすると・・・

$$y(x)=aE_a\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+bE_b\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+cE_c\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}$$ となります。

$aE_a=A,bE_b=B,cE_c=C$ とおくと

$$y(x)=A\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+B\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+C\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}$$ ・・・α となります。

この式が元になる式で、**事故後 x 年経ったときのすべての地点における放射線量の変化の比**を表しています。(A,B,C の具体的な算出方法については後に説明します。)x は 2 号機爆発があった 3/15 からの時間(年)です。これは震災後の放射能変化を分析すると、2 号機爆発後の線量変化が桁違いに大きく、もっとも放出量があったときです。この時を 0 とするのが適切だからです。

A は ^{131}I の放出量×放射線強度に関するパラメーター(11.437)

B は ^{134}Cs の放出量×放射線強度に関するパラメーター(1.486)

C は ^{137}Cs の放出量×放射線強度に関するパラメーター(0.924)です。

t は ^{131}I の半減期で $\frac{8}{365}$ 年(8 日)

u は ^{134}Cs の半減期で 2.1 年、v は ^{137}Cs の半減期で 30 年です。

次に、自然放射線量と数値の補正をします。ある地点で時間 s(単位年)における測定値が k(単位 μSV/h または mSV/h)、自然放射線量が n(単位 μSV/h または mSV/h)のとき、(k と n の単位はそろえなければいけません)

この地点での放射線量の変化を $P(x)$ とすると、どの地域も線量の比は式 α に依存しますから・・・・

$(P(x)-n):k-n=y(x):y(s)$ ・・・ i という、式が成り立ちます。

ｉ式より、$P(x)=\frac{k-n}{y(s)}y(x)+n$ です。詳しくかくと・・

$$P(x)=\frac{k-n}{\left\{A\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{s}{t}}+B\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{s}{u}}+C\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{s}{v}}\right\}}\left\{A\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+B\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+C\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}\right\}+n$$

ｔ・・・^{131}I の半減期$\frac{8}{365}$年(8 日)

u・・・^{134}Cs の半減期 2.1 年　　v・・・^{137}Cs の半減期 30 年

n・・・自然放射線(単位 μSV または mSV/h)

s と k・・・ある地点で事故後 s 年経ったときの放射線の観測地が k (単位 μSV または mSV/h)です。

(k と n の単位はそろえなければいけません)

この P(x)を積分してやれば被爆量になりますが、積分するときに注意が必要です。P(x)の時間の単位は μSV/h または mSV/h ですから、積分する単位は hour でしなければいけません。しかし、hour は短期的なスパンを考えるときはいいですが、量も多くなるので使いにくいです。そのため時間の単位を hour から年に変えるために置換積分をして、単位を入れ変えます。

事故後 t_1 (hour)から t_2 (hour)までのその地点での被爆量は・・・

$\int P(x)dx$ です。これを単位を変えて年にしますが、

x(hour)	t_1 → t_2
h(年)	$\frac{1}{365\cdot 24}t_1 \rightarrow \frac{1}{365\cdot 24}t_2$

また $h(year)=\frac{1}{365\cdot 24}x(hour)$ より $dx=365\cdot 24\,dh$

$$\int P(x)dx=\int P(h)\cdot 365\cdot 24\cdot dh$$

ここで式が見にくいですから、改めて

$\frac{1}{365\cdot 24}t_2=q$,$\frac{1}{365\cdot 24}t_1=p$ (単位年)とおくと

$$\int P(x)dx=365\cdot 24\int_p^q P(h)dh$$

さらに見やすいように h = x とおきなおすと・・・

$$\int P(x)dx=365\cdot 24\int_p^q P(h)dh=365\cdot 24\int_p^q P(x)dx=365\cdot 24\int_p^q\left(\frac{k-n}{y(s)}y(x)+n\right)dx$$

¿$\frac{365\cdot 24(k-n)}{y(s)}\int_p^q y(x)dx+365\cdot 24\int_p^q ndx$

$$\frac{365\cdot 24(k-n)}{y(s)}\int_p^q\left(A\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+B\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+C\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}\right)dx+365\cdot 24\int_p^q n\,dx$$

これを計算すると、事故後の時間 p(年)から q(年)までの被爆線量になります。

$$\frac{365\cdot 24(k-n)}{y(s)}\cdot\frac{1}{\log 2}\left(At\left\{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{p}{t}}-\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{q}{t}}\right\}+Bu\left\{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{p}{u}}-\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{q}{u}}\right\}+Cv\left\{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{p}{v}}-\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{q}{v}}\right\}\right)+365\cdot 24n(q-p)$$

これで、p=0、q=x とすると、事故直後からの累積被爆量のグラフ式になりますし、
p=p、q=x とすると、p(年)からの累積被爆線量になります。
この式は最適なパラメーター A,B,C を採用することで、とても精度の高い値を計算することができます。
しかし、やはり 1 点のみからのデータだけでは、測定上の誤差や天候などが原因で一時的に突出した値で計算すると、予想値が大きくばらつくときがあります。そのため、測定値はなるだけ複数入力してもらい、出てきた値や式の平均を採用することで、さらに精度と信頼性を高めるようにしています。
では次にこの A,B,C をどのように決定したかを以下述べます。

A,B,C の決定の方法

A,B,C をどのように決定するかですが、最初は公の機関が発表したデーターを目安にしました。原子力安全保安院によりますと、福島第一原発 1 号機 ~ 3 号機には ^{131}I が 610 万テラ(6.1×10^{18})Bq、^{137}Cs が 71 万テラ(7.1×10^{17})Bq 存在しており、^{131}I についてはその約 2%の 13 万テラ(1.3×10^{17})Bq、^{137}Cs についてはその 0.09%の 6100 テラ(6.1×10^{16})Bq が放出されたと推定しています。この推測は関係機関によって若干の差があり、原子力安全委員会はヨウ素 131 は 15 万テラ Bq が放出されたと推定し、^{137}Cs は保安院予測の倍の 1 万 2000 テラ Bq が放出されたと推定しています。私は ^{131}I については 13 万テラ ~ 15 万テラ、^{137}Cs については 6100 テラ ~ 12000 テラを目安にして、実際の観測データーをもっとも近似している数値を採用することにしました。また放射線の強さはそれを発する放射性元素によって違います。同じ 1Bq の放射性物質があったとしても発生する放射線の強さは違うのです。崩壊による線種の違い(α 線、β 線、γ 線)や、同じ線種でも崩壊のエネルギーが違うためです。1Bq とは 1 秒間に 1 回の原子崩壊が起こる放射能があるということですが、同じ 1 Bq でもそこから発生する放射線の強さはそれぞれこの崩壊エネルギーの違いを反映させることが必要です。
原子力発電の問題や危険性について、多くを発信している原子力情報資料室の HP にその崩壊エネルギーを詳しく載せていたページがあります。(原子力情報資料室放射能豆知識)
それによると例えば ^{131}I については以下のような崩壊エネルギーが発生し、その強さは $E_a=$ 0.93745(100 万 eV) となります。

ヨウ素 131		
エネルギー	割合	エネルギー×割合
β 線		
0.248	0.02	0.00496
0.334	0.0727	0.02428
0.606	0.899	0.54479
γ 線		
0.0802	0.0262	0.0021
0.284	0.0614	0.01744
0.365	0.817	0.29821
0.637	0.0717	0.04567
	計	0.93745

同じように ^{137}Cs については $E_c=$ 1.2133、^{134}Cs については $E_b=$ 2.01087 と分かりました。同じ 1Bq の放

射能があればセシウム 134 がこの 3 つの中では一番強い放射線を発するわけです。
放出された Bq 数にこの放射線強度をかけたものが y(x)のパラメーター A、C になるわけですが、^{131}I については 13 万テラ ~ 15 万テラ、^{137}Cs については 6100 テラ ~ 12000 テラの範囲で実際の観測値と重ねても理論値が低くなる傾向があり(うまく近似されない)、他の核種を考える必要がでました。その核種とはあまり報道されませんがセシウム 137 の放射性同位体である ^{134}Cs です。^{134}Cs と ^{137}Cs は原子量が違うだけで、その他の科学的な性質は全く同じです。そのため ^{137}Cs が放出されたのに、^{134}Cs が放出されないということはありえないことです。問題は ^{134}Cs がどの程度原子炉内に存在していたかということです。^{134}Cs の報道や情報は ^{137}Cs に比べて少なかったので調査に苦労しましたが、日本原子力安全保安院が 1 号機から 4 号機のタービン建屋地下の汚染水中の核種分析を発表しています。表に載せていますが、^{134}Cs と ^{137}Cs のベクレル数はほとんど等しくなっています。そのため**原子炉内の ^{134}Cs 、^{137}Cs のベクレル数はほぼ同じで、よって放出されたベクレル数もほぼ同じであろうと推察できるわけです。**

3/26 採取	1 号機	2 号機	3 号機	4 号機
^{134}Cs	5.5×10^{4} Bq/cm^{3}	2.3×10^{6} Bq/cm^{3}	1.2×10^{5} Bq/cm^{3}	3.1×10 Bq/cm^{3}
^{137}Cs	5.6×10^{4} Bq/cm^{3}	2.3×10^{6} Bq/cm^{3}	1.3×10^{5} Bq/cm^{3}	3.2×10 Bq/cm^{3}
水面線量	60msv/h	1000msv/h over	750msv/h	0.5msv/h

(安全保安院発表)

^{131}I と ^{134}Cs 、^{137}Cs の放出ベクレル比を考えるのにもうひとつの考える根拠は他にもあります。文部科学省が 5 日に発表した飯舘村深谷地区の土壌サンプル調査(3/25 採取)が出ていまして、それによると土壌 1kg あたりのベクレル数が ^{131}I = 8 万 2800Bq/kg　^{134}Cs = 3 万 3500Bq/kg　^{137}Cs = 3 万 6300Bq/kg であったというのです。

^{131}I の量が少ないですが、これは半減期が 8 日と短いために、測定した時点には相当崩壊してしまったからです。
これからも ^{134}Cs 、^{137}Cs の放出ベクレル比はほぼ同量ではないかと推察されるわけです。
^{134}Cs と ^{137}Cs のベクレル数をほぼ同じにして、少しずつ放出量の数値を変えていき今回の事故による測定値をもっともよく近似している放出量を出していきました。私は今回の事故で放出されたヨウ素、セシウムの量を以下のように推察しています。ヨウ素の量は保安院の値に合わせました。この放出量のときが、実際に観測されたデータとほとんどみごとに一致します。(詳しくは式・グラフの正確さと誤差について)

	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
放射能計算所	13 万テラ	8000 テラ	8200 テラ
保安院	13 万テラ	発表無し	6100 テラ
安全委員会	15 万テラ	発表無し	1 万 2000 テラ

こうして、導かれた Bq 数が $f(x)=a\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{t}}+b\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{u}}+c\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{v}}$ の a,b,c になりそれに放射線強度 E_a,E_b,E_c をかけたものがパラメーター A、B、C です。

前も書きましたが・・・・

A = 11.437　　B = 1.486　　C = 0.924

このパラメーターは比が保全されていれば計算に影響はあたえません.