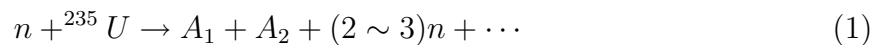


# 原発事故について

先日の解析力学の講義の途中で、地震速報の携帯が多数鳴ってしまった事でもあり、後半の30分間は原発事故に関する問題を解説しました。これは、核分裂と放射性元素に関する正確な知識を持って欲しいためです。震災の後の原発事故に対して、正確な理解なしに恐怖だけを言っている論調がやたら目立ちすぎます。無知でむやみに怖がる事の方が、逆に自分には恐ろしいものです。この講義の後、何人かの学生から、この講義のノートはホームページに入れてありますかと言う質問がでていました。それで、ここにその内容を書いておきますので、参考にして下さい。但し、私は原子炉の専門家ではないので、原子核物理学の立場からの解説となっています。

## 1 核分裂とは

重い原子核のうち、ウランなどは核分裂していくつかの原子核(中重核と言われる質量数が100前後)を生成します。この時、エネルギーが放出されますが、それは通常の石炭などのエネルギースケールの約百万倍となっています。核分裂する原子核のうち、良く使われるのが $^{235}\text{U}$ です。この原子核は92個の陽子と143個の中性子からできています。ところが、この $^{235}\text{U}$ が中性子を「吸う」と核分裂が起こります。「吸う」という表現は、中子のエネルギーがほとんどゼロエネルギーでも核分裂を起こすからです。原子核反応としては



という核分裂が起こります。ここで、 $A_1, A_2$ は $^{137}\text{Cs}$ などの、質量数が100前後の原子核を表しています。

一方、自然界に主として存在してるウランは $^{238}\text{U}$ です。しかし、このウラン $^{238}\text{U}$ は中子を吸っても核分裂は起こす確率は低くて、その代わり、



と言う反応でプルトニウムを生成します。このウラン $^{238}\text{U}$ の中にウラン $^{235}\text{U}$ を3%以上混ぜたものを濃縮ウランと言っています。これが核燃料として使われているものです。いづれにしても、1kgのウラン $^{235}\text{U}$ を核分裂させて得られるエネルギーは1kgの石炭を燃やした場合のエネルギーの約3百万倍です。

## 2 連鎖反応

何故、核分裂が危険性をはらんでいるのかを見るのは簡単です。式(1)で右辺に2, 3個の中性子が出てきます。自由な中性子は15分前後でいなくなるので、放射性元素としての危険性は原子炉のごく近くに行かない限り、通常の生活をしてる人間にとっては安全です。しかし、核分裂の立場からすると、大変な事になります。1個の核分裂が2個か3個の中性子を生成して、それが近くにいたウラン $^{235}\text{U}$ に吸われるとまた核分裂が起こります。するとこれがまた2個か3個の中性子をだしてそれがまた近くのウラン $^{235}\text{U}$ に吸われるという連鎖反応が起こります。この時間スケールは大雑把に言って $10^{-20}$ 秒のレベルなので、もし、ウラン $^{235}\text{U}$ ばかりだったら、これは爆発的に核分裂が起こり、大変な工

エネルギーが放出される事になります。実際、ウラン  $^{235}\text{U}$  の割合を 90%以上にしたものが原子爆弾です。講義でもお話したように、アメリカが原子爆弾を広島と長崎に投下した事は、どのように弁解しようが、戦争犯罪である事は明らかな事です。これは、日本人に限らず、どの国民でも肝に銘じておくべき「絶対にしてはならない」事です。

話をもどして、原子炉はこの核反応をうまく制御してエネルギーを取り出す装置に対応しています。

### 3 原子力発電の問題点

文明の利器を使う場合、それが何であっても常に危険性はあります。原子力発電も例外ではありません。従って、原子力施設を建設する段階で危険を全く除去する事が出来ない事は、あらかじめ認識して議論しておくべきです。

核分裂の話が理解できた時に、原子炉をうまく作れば爆発の危険(あるいは暴走と言った方が良いでしょう)が存在しない事くらいは理解できると思います。原子炉ではこの制御をあらゆる角度から検討し設計されています。特に大切なところは中性子の制御です。より核分裂反応を起こしやすくするため、核分裂で生成された中性子(1 MeV 程度)より、エネルギーの低い中性子にするとか、逆に中性子を他の物質に吸収させる事によって核反応を遅らせるなど、様々な事を行っています。その際、原子炉核燃料を点火するためには、最初中性子が必要ですが、これはいくつかの方法によって行われています。逆に言えば、エネルギーの低い熱中性子が存在する事が、原子炉核燃料を点火する条件になります。中性子が存在しない状態で核分裂を起こす事は出来ません。勿論、ウランの自然核分裂の可能性は極めて小さいながらもありますが、だからと言ってこれが点火の原因になる事は有り得ません。従って、この原発の事故に関しては、臨界などという事は最初から考える必要のない事です。

#### 3.1 原子炉核燃料の点火

中性子が核燃料に点火するわけですが、この点火の事を考えると逆に言えば、核分裂を起こさせる事の難しさもわかります。点火に使われているものとしてカリホルニウム  $^{252}\text{Cf}$  があります。これは半減期が  $\tau_{1/2} = 2.65$  年で自発的核分裂する確率が 3.1% あります。このため、1 g の  $^{252}\text{Cf}$  は毎秒  $6 \times 10^{11}$  個の自発的核分裂を起こします。1 個の核分裂で 3,4 個の中性子を放出するため、この  $1 \mu\text{g}$  の  $^{252}\text{Cf}$  で生成される中性子が核燃料の点火に使われる事があります。この  $^{252}\text{Cf}$  という人工的物質は世界で最も高価な物であると言われています。これと比べると、核燃料に使われている物質のうちで、 $^{238}\text{U}$  の場合は 1 g で毎秒 0.01 個、最も自発的核分裂が多い  $^{240}\text{Pu}$  でも 1 g で毎秒 500 個程度です。これらは中性子を放出はしますが、連鎖的核分裂に影響しない事が良くわかんと思います。

#### 自発的核分裂の数

	自発的核分裂の数/秒	中性子数/1 核分裂	半減期
1 g の $^{252}\text{Cf}$	$\sim 6 \times 10^{11}$ 個	3~4	2.65 年
1 g の $^{238}\text{U}$	$\sim 0.01$ 個	2~3	44.7 億年
1 g の $^{240}\text{Pu}$	$\sim 500$ 個	2~3	6563 年

### 3.2 使用済み核燃料の放射量

しかしながら、原子炉の場合、それ以外にも深刻な問題があります。それは、核分裂で生成された新しい原子核には放射性物質が含まれている事です。放射性物質とは何かですが、まずは今出てきた自発的核分裂のある  $^{240}\text{Pu}$  について簡単に議論します。この  $^{240}\text{Pu}$  は式 (2) で示したように、 $^{238}\text{U}$  が中性子を吸収し、そして崩壊して  $^{239}\text{Pu}$  になります。そして、これがまた中性子を吸収して  $^{240}\text{Pu}$  が生成されます。核燃料を十分燃やした後のプルトニウム同位体の割合としては、 $^{240}\text{Pu}$  が約 25 %ほど出来ると考えられていて、これは自発的核分裂により熱を放出しています。しかし、実際問題としての熱放射は、他の様々な放射性物質によって行われています。例えば、1 g の放射性  $^{137}\text{Cs}$  は 1 日に約  $2.6 \times 10^4$  ジュールの熱を放出しています。さらに、1 g の放射性  $^{131}\text{I}$  は 1 日に約  $2.3 \times 10^7$  ジュールの熱を放出してしましますが、これはなんと約 820 g の石炭燃焼に対応します。この事は放射性  $^{131}\text{I}$  が半減期 8 日で放射性  $^{131}\text{Xe}$  に崩壊し、この  $^{131}\text{Xe}$  の励起状態が直ちに崩壊して  $E = 0.364$  MeV の  $\gamma$  線を放出するためであり、これは  $^{131}\text{I}$  の半減期が短い事と関係しています。この様に使用済み核燃料はほって置くと温度が上昇する事になってしまい、冷却がどうしても必要になります。

### 3.3 半減期

次に、放射性物質の半減期について解説しますが、これには、今問題になっている  $\text{Cs}$  を例に挙げるのが良いと考えられます。放射性  $^{137}\text{Cs}$  は半減期が 30 年程です。この半減期の事をきちんと理解する事が放射性物質の問題点を理解するために重要となります。

半減期が 30 年とは例えば放射性  $^{137}\text{Cs}$  が 100 個あった時に、30 年すると約半分ほど崩壊してしまうという事を意味しているものです。しかし、大切な事は粒子の崩壊は確率的に起こる事です。式で書くと、

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

と書けていて、また観測でも確かめられています。ここで、 $N_0$  は最初に存在している放射性  $^{137}\text{Cs}$  の数を表していて、今の場合、核分裂が終って生成された数を意味していません。また、 $\tau$  は放射性  $^{137}\text{Cs}$  の寿命をあらわしています。通常使われている半減期  $\tau_{1/2}$  とは、 $\tau_{1/2} = 0.69 \tau$  と結びついています。しかし、ほとんど同じとみなしてくれても構いません。ここで重要な事は、時間  $t$  が十分短い場合、式 (3) は

$$N(t) \simeq N_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) = N_0 - N_0 \frac{t}{\tau} \quad (4)$$

となっていて、放射性  $^{137}\text{Cs}$  は徐々に崩壊している事を意味しています。

放射性  $^{137}\text{Cs}$  は約 30 年の半減期で  $\beta$  崩壊して  $^{137}\text{Ba}$  になりますが、この時ほとんどは、 $^{137}\text{Ba}$  の励起状態に遷移します。この状態は、2, 3 分で崩壊して  $^{137}\text{Ba}$  の基底状態に移ります。この時、 $E = 0.66$  MeV というエネルギーの高い  $\gamma$  線を放出します。この線が問題となっているものです。これは紫外線のエネルギーが大体 1 eV 程度である事を考えると、 $^{137}\text{Cs}$  から放射される  $\gamma$  線のエネルギーは約 100 万倍あり、その大きさが理解できると思います。

それでは半減期が 30 年なのに何故今すぐにでも問題なのでしょうか？この事は式 (4) を見ればすぐにわかります。それは  $N_0$  が大きな数であれば当然、1 秒間に放射する  $^{137}\text{Cs}$  の量とそのエネルギーがかなり大きな値になってしまうという事です。今、137 g の  $^{137}\text{Cs}$  があったと考えましょう。この時、 $^{137}\text{Cs}$  の数は勿論、アボガドロ数  $6 \times 10^{23}$  です。従っ

て、1秒間に崩壊する数は

$$N_0 \frac{t}{\tau} \simeq \frac{6 \times 10^{23}}{1.45 \times 30 \times \pi \times 10^7} \simeq 0.4 \times 10^{15} \quad (5)$$

個となります。1個の放射性  $^{137}\text{Cs}$  が放出するエネルギーは  $\beta$  崩壊の時の電子のエネルギーも加えると約 0.7 MeV なので、1秒間に

$$E_{Cs} \simeq 0.3 \times 10^{15} \text{ MeV} \simeq 40 \text{ J}$$

となります。これは1秒間なので、もし1日あびたとすると

$$Q_{Cs} \simeq 40 \times (24 \times 3600) \simeq 3.5 \times 10^6 \text{ J}$$

となり、これは約 140 g の石炭を焼いたエネルギーに対応しています。

## 4 放射線の人体への影響

問題はこのエネルギーが人体に与える影響はどのくらいであるかという事です。基本的には線が遺伝子情報を壊してしまう可能性があるという事が良く言われていますが、しかし、これは物理学では答えられません。これに関しての詳しい事は、その領域での専門家に解説して頂く事が良いと思います。

### 4.1 Carbon Dating

ここで一つだけ明白な事実を書いておきます。それは生物は必ず放射性元素を体内に持っているという事です。この事は、Carbon Dating として良く知られている事と関係しています。この地球上は大気で覆われていますが、その主成分は  $^{14}\text{N}$  です。そしてこの地球上に太陽から大量の太陽風が降り注いでいます。これは主として陽子です。この陽子が大気と衝突して中性子を生み出し、その中性子が  $^{14}\text{N}$  と原子核反応して放射性炭素  $^{14}\text{C}$  を生成します。この反応は常時起こっているため、定常的に  $^{14}\text{C}$  が存在していると考えられています。この仮定の下で、Carbon Dating (放射性炭素年代測定) が行われています。すなわち、大気中の炭素は常に  $^{14}\text{C}$  が存在していて、このため、どの生物も炭素を取得する場合、その時点においては一定 ( $1.2 \times 10^{-12}$ ) の割合で  $^{14}\text{C}$  が生物の体内に宿っているという事です。このため、例えば、檜が伐採されて建物に使われたとするとその段階での  $^{14}\text{C}$  の量は決まっています。ところが、それ以降はこの檜の  $^{14}\text{C}$  はひたすら崩壊するだけなので時間が経つにつれて減ってゆく事になります。この  $^{14}\text{C}$  の半減期は5730年なので、それがどれだけの割合で存在しているかを調べれば、その檜の伐採された年代がわかる事になります。これが、Carbon Dating の手法の基本的な機構です。

### 4.2 体内の $^{14}\text{C}$

従って、我々の体内にも  $^{14}\text{C}$  が常に存在している事は明らかです。それがどれだけあるかを計算してみます。今、炭素 12 g を取ってくると、その中には  $6 \times 10^{23}$  個の炭素があります。従って、この場合、 $^{14}\text{C}$  の個数は

$$6 \times 10^{23} \times 1.2 \times 10^{-12} \simeq 7 \times 10^{11}$$

個、ある事になります。これが1秒間にどのくらい崩壊しているかの個数  $N$  をみると、 $^{14}\text{C}$  の半減期は5730年なので

$$N \simeq \frac{7 \times 10^{11}}{1.45 \times 5730 \times \pi \times 10^7} \simeq 2.8$$

となります。すなわち、12gの炭素があると毎秒3個ほどが崩壊しているという事です。幸いにして、この放射性 $^{14}\text{C}$ のエネルギーは $E = 0.156 \text{ MeV}$ であり、比較的小さい事と、この崩壊が崩壊であるため、ほとんどはニュートリノがエネルギーを持って行くことになり、人体への影響はほとんどない事になります。

しかし、いずれにしても、生物はこれらの事を知っている上で作られ、また自然淘汰されて来たものと考えています。私は幼年期、青年期ともに別表で示したように、膨大な放射線の中で育っています。昔、パセリを大量には食べない方が良いと言われたものです。それはパセリが相当量の $\text{Sr}$ を含んでいて、当時は大量の $^{90}\text{Sr}$ が空中をまっていたためです。核燃料を燃やすと言っても $^{235}\text{U}$ はせいぜい5%程度ですが、核実験で使われた数十キログラムのウランはほとんどが $^{235}\text{U}$ であり、それがすべて核分裂して放射性物質にかわったわけですから、大量の放射性物質が地球上にばら撒かれた事は良く知られている事です。

## 5 結び

今回の福島第1原発の事故をチェルノブイリ(制御棒喪失)やスリーマイル(冷却材喪失)の原発事故と比較している論調が目立ちますが、これは基本的に誤りです。前者2つの事故は人為的に起きたものであるのに対して、今回は天災による事故です。同じ土俵で議論する事は公平さを欠きます。さらに、日本の技術者のレベルは世界のどの原発の技術者と比べても決して劣るものではないと言われていました。むしろ、日本の場合の問題点としては、正確な情報が伝えられていないと言う事です。これはマスコミと政治家のプロを最近ではしっかり養成して来なかった事に原因があるように思われます。この両者ともプロ意識を持った人が少なく、批判ばかりしていて、ほとんどが素人のように思われます。マスコミは情報を正確に伝える事が最重要課題ですが、情報を正確に迅速にと言う事はもともと無理な事です。正確さを期すれば当然遅くなり、早く結果を出そうとすれば当然不正確になります。マスコミのプロならば、正確さかまたは迅速さかのどちらを選んで情報を提供しているのかを正直に視聴者に問いかけるべきです。また、我々も、そのどちらを優先したいかという事をしっかり考えるべきだと思います。

話が横道にそれましたが、この福島の原発事故で最も残念な事は、原子炉を40年近くも稼動してきた事で、しかもそのボンコツ原子炉が重大な事故につながっていると言う事実です。これは技術者も含めて、当局に少し油断か驕りがあったように見受けられます。建築物もそうですが、やはり新しいものは地震にも強い事が証明されています。このボンコツ原発を使い続けていた事は大いに反省するべきだと考えています。

あと、授業中にもお話ししましたが、冷戦時代、中国の核実験時代そしてチェルノブイリの事故の場合の放射性 $^{137}\text{Cs}$ と $^{90}\text{Sr}$ のデータを載せておきます。昔は物凄い量の放射性物質が降っていたわけですが、それがどの程度人間の体に影響してきたのかは不明です。また、この両者の半減期は30年前後なので、50年たってやっと9割が崩壊した事に対応しています。すなわち、冷戦時代の放射性物質も、まだ地球上のどこかに存在している事は十分考えられます。それどころか、チェルノブイリの事故直後の放射性 $^{137}\text{Cs}$ と $^{90}\text{Sr}$ に関しては、現在までに約半分に減っただけであると言えます。但し、ほとんどは海の底に沈んでいるものと思われていますが、その事に対して自分には判断が出来ません。

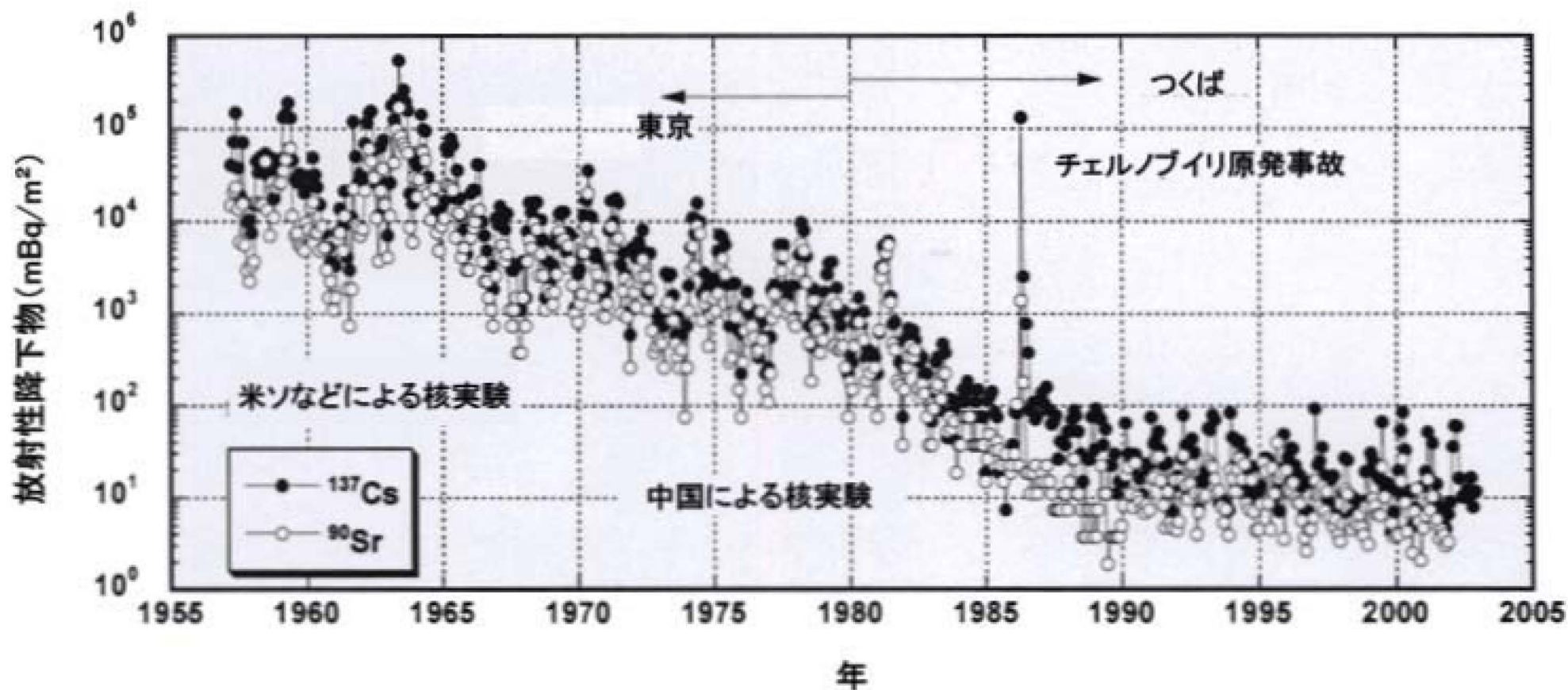


図1 人口放射性降下物の経年変化

[出所]気象研究所地球化学研究部:環境における人口放射能の研究2003、  
[http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/2003Artifi\\_Radio\\_report/coverJP.htm](http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/2003Artifi_Radio_report/coverJP.htm)