

# 原子力発電の基礎と事故による環境汚染・被曝

山本 政儀

Masayoshi Yamamoto

Low Level Radioactivity Laboratory, Institute of Nature and Environmental Technology,  
Kanazawa University, Wake, Nomi, Ishikawa 923-1224, Japan

## 1. はじめに

火力発電所では石炭や石油を、一方、原子力発電所ではウランを燃やして、両者ともに水を蒸気にしてタービンを回し発電している。原子力発電では、どのような仕組みで水を温め蒸気しているのだろうか、また事故などが起こると何が問題になるのだろうかなどを易しく解説します。次いで、今回の福島第一原子力発電所で起こった事故の概要、例えばどんな放射性物質が放出されるかなどを説明します。そして、放射性物質によって引き起こされる環境汚染と健康影響について、チェルノブイリ原発事故と比較しながらお話しします。

## 2. 内容

1986年4月26日、旧ソ連邦ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所で世界を震撼させる大事故が起こった。それから25年経過した2011年3月11日、東北宮城県沖でM9.0の巨大地震が発生し、福島県沿岸にある東京電力福島第一原子力発電所に津波が襲った。運転中の1~3号機では地震直後制御棒が自動的に挿入され原子炉は停止状態になった。4号機は、定期検査で停止しており燃料は燃料プールで冷却されていた。地震と津波により外部電源と非常用電源が使えなくなり、原子炉の冷却をはじめとして、燃料プールの冷却も極めて危険な状態になった。淡水や海水が注入されたにもかかわらず、一進一退の状況が続く中、1~3号機では温度と圧力上昇、ベント、メルトダウン(メルトスルー)、水素爆発などが、また4号機の燃料プールでも水素爆発が起こり、大量の放射性物質が外部に放出された。これら一連のイベントにより発電所から20km圏内の住民に避難、20-30km圏内の住民に屋内退避命令が出された。今回の事故は、「国際原子力事象評価尺度」INESでチェルノブイリ事故と同じ最悪のレベル7と評価された。未だ事故終息を見通せない状況が続いている。

原子力発電では、どのような原理で電気を起こして、一体何が起こったのだろうか？ 福島第一原発事故の結果を見れば一目瞭然であるが、もう少し基本的な事を理解しながら考えて見よう。

原子力発電では、ウラン-235 ( $^{235}\text{U}$ ) の熱中性子による核分裂反応を利用して熱(エネルギー)を取り出している。 $^{235}\text{U}$  の原子核は熱中性子と反応しやすく、熱中性子を衝突させると  $^{235}\text{U}$  に取り込まれ、出来た不安定な  $^{236}\text{U}$  が瞬時に分裂を起こす。これが核反応で分裂片が核分裂生成物と呼

ばれ全て放射性物質で、大量のエネルギーを持ってお互いに逆方向に飛びちり同時に2-3個の中性を放出する。この反応前後の質量を比較すると質量が僅かに小さくなっており、約200 MeVに相当するエネルギーが発生する。エネルギーの大部分は核分裂生成物の運動エネルギー等になる。一回の核分裂で発生するエネルギーは極めて微量 ( $7.7 \times 10^{-12}$  カロリー(cal)) ですが、1gの  $^{235}\text{U}$  を一度に核分裂させると  $2.0 \times 10^{10}$  cal という天文学的な数字が得られる。化石燃料1kgの燃焼では、おおよそ  $1 \times 10^4$  kcalの熱が得られる。両者を比較すると同じ重さで  $^{235}\text{U}$  は石油や石炭の100万倍のエネルギーを放出する(ここまでは、科学技術ではなくて純粋な科学的発見)。原子力発電では、この核分裂の連鎖反応を利用している。通常3-5%の濃縮  $^{235}\text{U}$  を用い、制御棒(中性子吸収材)を出し入れして一定の熱エネルギーを得るようにコントロールしている。熱エネルギーは水(冷却剤、中性子減速材)に与えられ、沸騰してその蒸気でタービンを回し発電している(技術)。このようにして電気をつくるが、一方では、最も問題となる放射性の核分裂生成物、「死の灰」を作り続けている。寿命の短い(半減期の短い)生成物は、生成と壊変を繰り返している(平衡状態)が、寿命の長い(半減期の長い)生成物、たとえば、半減期30年の  $^{137}\text{Cs}$  などは、燃料棒の中にどんどん蓄積される。電気出力100万kW級の原発では、1秒間に1兆  $1 \times 10^{12}$  (  $10^{12} \times 10^8$  ) 個の核分裂が起こり、核分裂片はその2倍生成し、  $^{235}\text{U}$  は約37mg消費される。

原子炉が事故を起こすと、この放射性の核分裂生成物とU(Pu)などの燃料が外部に散逸される潜在的な危険性を秘めている。そのため、事故時には、『止める、冷やす、閉じ込める』が安全運転の必須条件となっている。今回の事故は、この「冷やす、閉じ込める」に失敗して大量の揮発性の  $^{131}\text{I}$ 、  $^{134,137}\text{Cs}$  などの放射性物質が環境に放出された。非揮発性の  $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ 、  $^{89,90}\text{Sr}$  などは僅かに検出されているが、それらの放出は極めて少ない。Puは検出されていない。原子炉施設周辺はもとより、主として北西方向30-40kmに渡って数百万  $\text{Bq}/\text{m}^2$  の  $^{134,137}\text{Cs}$  汚染が広がり(約700  $\text{km}^2$  と予想されている)、ホットスポットと呼ばれる高汚染地域も点在している。初期に検出された  $^{131}\text{I}$  は、現在その殆どが壊変して検出されにくくなっている。出来るだけ早い原子炉事故の終息と、被曝を出来るだけしない工夫、汚染地域の除染が強く望まれる。

2011/7/3 市民講座講演会

### 原子力発電の基礎と事故による環境汚染・被曝

東北沿岸一帯：地震・津波による被災に加えて、福島原子力発電所事故で何が起きたか？ 基本的な事を知って正しく怖がる！！



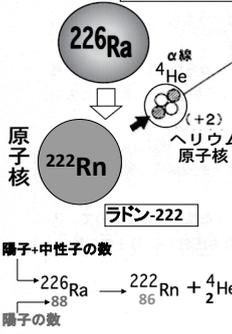
講演内容  
 ・核分裂と原子力発電所  
 ・事故による環境汚染と被ばくの現状



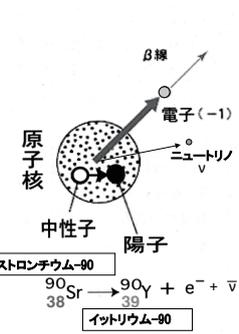
金沢大学・  
 環日本海域環境研究センター・  
 低レベル放射能実験施設  
 山本 政博

放射性物質→放射線（アルファ、ベータ、ガンマ）を出して壊変し他の安定な核種（元素）に変わる。

#### α壊変



#### β壊変



### 1900年代の前半：新しい元素の生成と新元素発見を目指して

1932 J. Chadwick (チャドウィック)  $^{226}\text{Ra} (^{210}\text{Po})$   
 中性子を発見  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$

1934 I. Curie, F. Joliot (イレーヌ・キュリー, フレデリック・ジョリオット)  
 人工放射性核種を発見  $^{27}\text{P}(\alpha, n)^{30}\text{P}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$

Fermi, Curie 等がウランに中性子を照射して、ウランを超える超ウラン元素の発見を目指して実験

$^{238}\text{U} (n, \gamma) ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Pu}$

93番元素 ネプツニウム 94番元素 プルトニウム

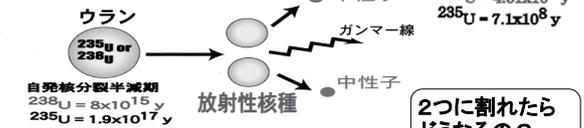
しかし、色々な核種が出来て混沌

1939 O. Hahn, P. Strassmann (オット・ハーン, P. ストラスマン)  
 ウランに中性子照射⇒バリウム(Ba)等の放射性核種を発見

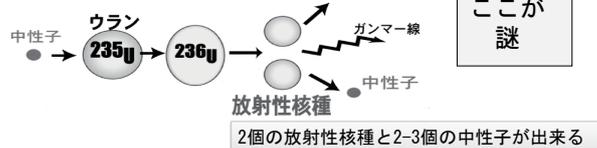
核分裂現象の発見 ← 純粋な科学的発見

(1)自分自身で割れる,(2)中性子が当たると割れる

#### (1)自発核分裂



#### (2)誘導核分裂



ウランが核分裂を起こすとどうなるの？

### 原子エネルギーの開放？

#### 核分裂 Nuclear Fission

ウラン  
 (92番元素)

$^{235}\text{U}$   $^{238}\text{U}$   
 ( $^{241}\text{Pu}$ )

プルトニウム  
 (94番元素)

$^{239}\text{Pu}$

### 核分裂反応

核分裂反応： $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \Rightarrow ^{99}_{42}\text{Mo} + ^{136}_{54}\text{Xe} + 2 ^1_0\text{n} + Q$

$^{235}\text{U}$  の原子質量 = 235.04394 u     $^{99}\text{Mo}$  の原子質量 = 97.905409 u  
 $^1\text{n}$  の質量 = 1.008665 u     $^{136}\text{Xe}$  の原子質量 = 135.90722 u  
 $2^1\text{n}$  の質量 = 2.01733 u

[反応前] = 236.052605 u    [反応後] = 235.827959 u  
 質量の差 Q = [反応前] - [反応後] = 0.224646 u = 209.25 MeV

通常の化学反応のエネルギーは eV オーダー 100万倍も大きい

核分裂生成物の別の組ができる場合も、1核分裂ごとに約200MeVのエネルギーがこのようにして放出される

核分裂を起こす代表的な核種  
 $^{235}\text{U}$  ( $^{238}\text{U}$ ),  $^{239}\text{Pu}$

核エネルギーの利用!!  
 技術の問題  
 原子爆弾  
 原子力発電

## 235Uの核分裂

原子一個： $200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \text{ (eV)} \times 3.83 \times 10^{-20} \text{ (cal/eV)}$   
 $= 7.66 \times 10^{-12} \text{ cal}$   
 1gの水を1°C上げるのに1カロリー(cal)必要

原子 $10^{12}$ 個： $= 7.66 \text{ cal}$   
 $(10^{12} / (6.023 \times 10^{23})) = 1.66 \times 10^{-11} \text{ mol} = 3.9 \text{ mg}$

原子 $6.023 \times 10^{23}$ 個： $7.66 \times 10^{-12} \times 6.023 \times 10^{23}$   
 $= 4.6 \times 10^{12} \text{ cal}$

235U 1gでは、 $1/235 \times 6.02 \times 10^{23} \times 7.66 \times 10^{-12}$   
 $= 2.0 \times 10^{10} \text{ cal}$

## 核分裂と化石燃料の燃焼の比較

核燃料の燃焼→核分裂  
 化石燃料：石油、天然ガス、石炭、これらを原料とする製品  
 (古い地質時代に地表で蓄積した生物体)  
 化石燃料の燃焼→有機物が空気中の酸素と反応して(有機物) 水と炭酸ガスになること  
 天然ガスとしてのプロパンの燃焼  
 $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 + \text{Q}$   
 反応の前後のC、H、Oの数が変わらない  
 原子の組合せを変えて異種分子作成、組替えてあつまったエネルギー：燃焼熱

有機物の燃焼熱			
化合物	分子量	燃焼熱 (25°C)	
		kca/mole	kcal/kg
<b>石炭系</b>			
黒鉛	12	94	7800
<b>天然ガス</b>			
メタン (g)	16	213	13300
プロパン (g)	44	531	12100
<b>軽油系</b>			
ベンゼン (liter)	78	781	10000
トルエン (liter)	92	935	10100

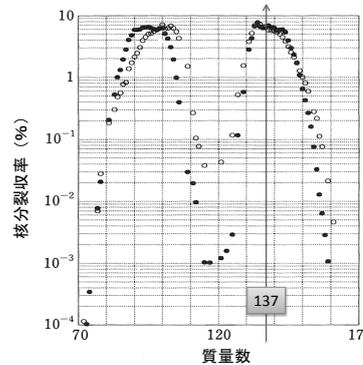
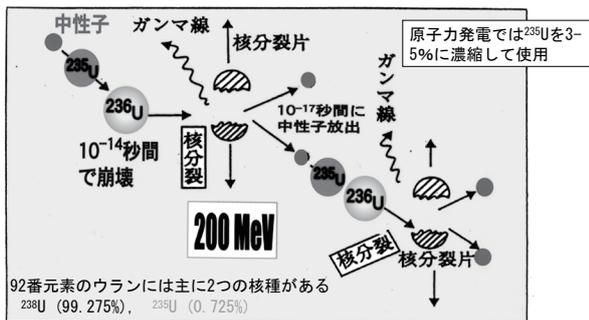
235U 1gの核分裂により生成する発熱量  
 $\text{Q} = 200 \times 10^6 \text{ (eV)} \times 6.023 \times 10^{23} / 235 \times 3.83 \times 10^{-20} \text{ (cal/eV)}$   
 $= 1.96 \times 10^{10} \text{ cal/1g U-235}$

235U 1kgでは

石油： $1.96 \times 10^{10} \text{ (kcal/kg)} / 10000 \text{ (kcal/l)} = 2 \times 10^6 \text{ liter}$  に相当  
 石炭： $1.96 \times 10^{10} \text{ (kcal/kg)} / 7800 \text{ (kcal/kg)} = 2.5 \times 10^6 \text{ kg}$  に相当

ウランが核分裂を起こす⇒2-3個の中性子が出る⇒この中性子を次から次へとウランに当たると核分裂が継続する

## 核分裂連鎖反応の概念



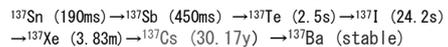
## 235Uの核分裂

低エネルギー中性子による核分裂の質量分布  
 (●印は235Uの熱中性子照射, ○印は239Puの熱中性子照射, E. A. C. Croucher, At. Data Nucl. Data Tables, 19, 417 (1977)中の数値を用いて作成)

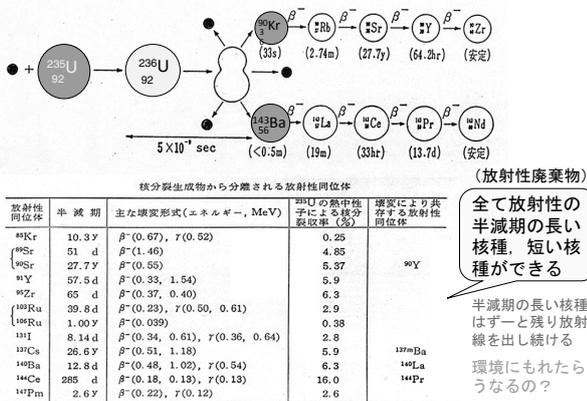
核分裂生成物：負の産物⇒これが問題だ！！

核分裂で質量数：70~170 鉄〜ランタノイドまで

例えば：質量137について見ると、一回の核分裂で質量数137が6.236%できる



## 235Uの核分裂でできるのは全て放射性的核種



## 100万kWの原子炉で起こっている核分裂

235U 1gから放出されるエネルギー W(ワット)=1秒間に1Jの仕事をする仕事率: J/s  
 $E = 1/235 \times 6.02 \times 10^{23} \times 200 \text{ (MeV)} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ (W} \cdot \text{s/MeV)}$   
 $= 8.2 \times 10^{10} \text{ (W} \cdot \text{s/g)}$   
 $= 8.2 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-5} \text{ (d/s)} = 0.95 \text{ MWD/g} = \text{ca. } 1 \text{ MWD/g (mega watt day/g)}$

電気出力100万kWの原子力発電では、

熱効率を34%として熱出力では300万kW

1回の核分裂によって発生するエネルギーは、  
 $= 200 \text{ (MeV)} \times 1.6 \times 10^{13} \text{ (W} \cdot \text{s/MeV)} = 3.2 \times 10^{11} \text{ W} \cdot \text{s}$   
 (1000億分の3.2ワット・秒)

$300 \times 10^4 \times 3600 / (3.2 \times 10^{11}) = 9.4 \times 10^{19} \text{ 個/s} = 1 \times 10^{12} \times 10^8 \text{ 個/s}$

1秒間に失われる235U量

$= 9.4 \times 10^{19} / (6.023 \times 10^{23}) \times 235 = 0.037 \text{ g (} ^{235}\text{U) / s}$   
 (毎秒一兆の一億個の核分裂)

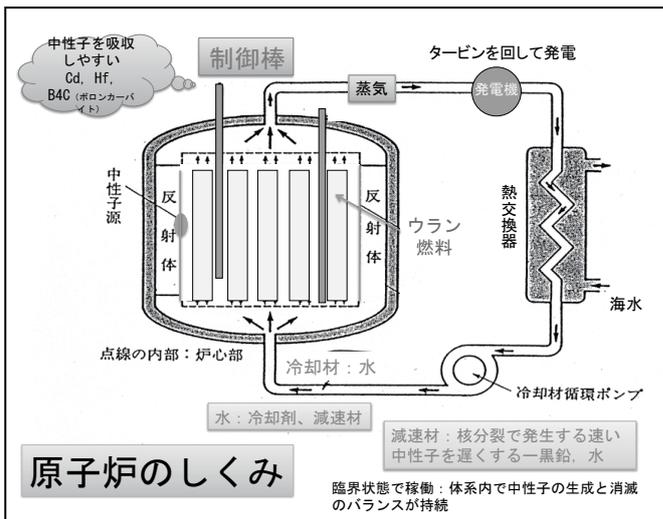
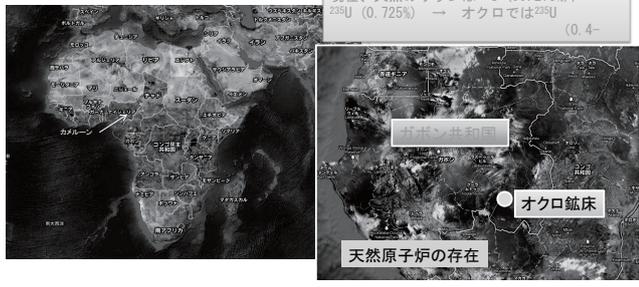
1年間の必要量(濃縮度5%のU)： $0.037 \times 24 \times 60 \times 365 / 0.05 = 23 \times 10^6 \text{ g} = 23 \text{ ton}$   
 (実際の原子炉では、235Uの他に、238U、生成したPuも核分裂発電に貢献)

天然原子炉の存在

大昔この地球上でひとりでに原子炉の反応が起こって、ウランからの核エネルギーの放出が何十万年もの間続いていたということを知っていますか？

今から20億年前にアフリカ赤道直下のガボン共和国のオクロのウラン鉱床中の数カ所で、現在の100万kW級の原子力発電所5基が1年間に発生するエネルギーに等しい熱を放出—自己持続の核分裂連鎖反応(少なくとも10万年継続)

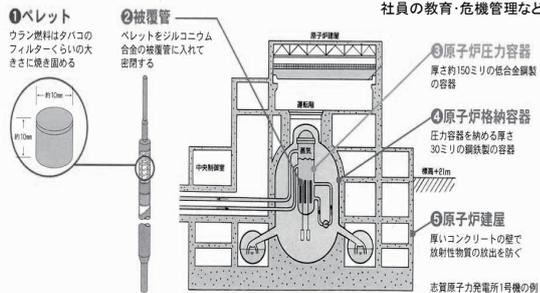
現在、天然のウランは<sup>238</sup>U (99.275%), <sup>235</sup>U (0.725%) → オクロでは<sup>235</sup>U (0.4-



放射性物質が外部に漏れない5重の防壁

放射性物質に対する五重の防壁

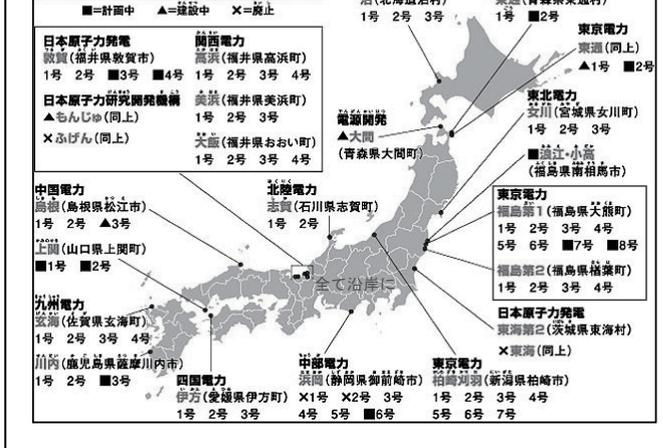
安全性に最大限努力 ← 法律・科学技術  
金風劣化・疲労・定期検査  
地震対策  
社員の教育・危機管理など



安全な運転のために

日本の原発

運転中54基



福島第一原発80キロ圏のセシウム134,137蓄積量

※文部科学省と米エネルギー省の調査から



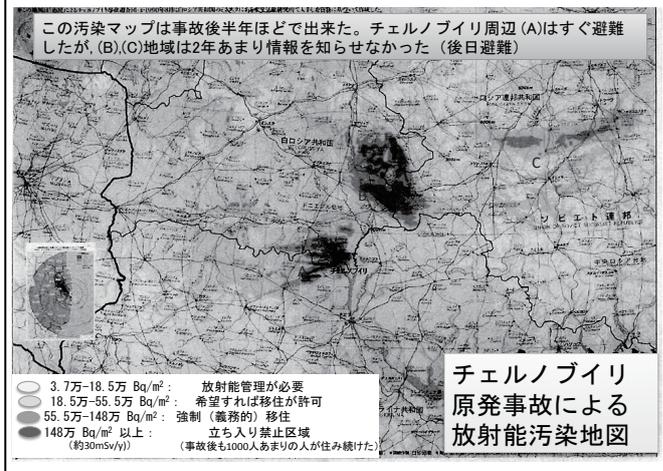
今回の事故

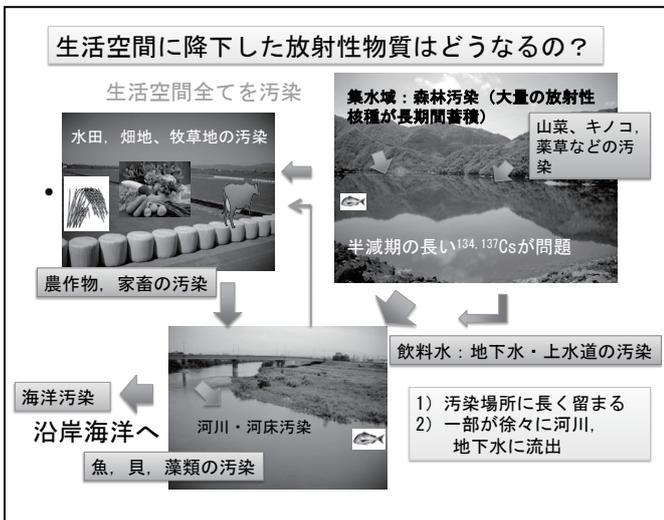
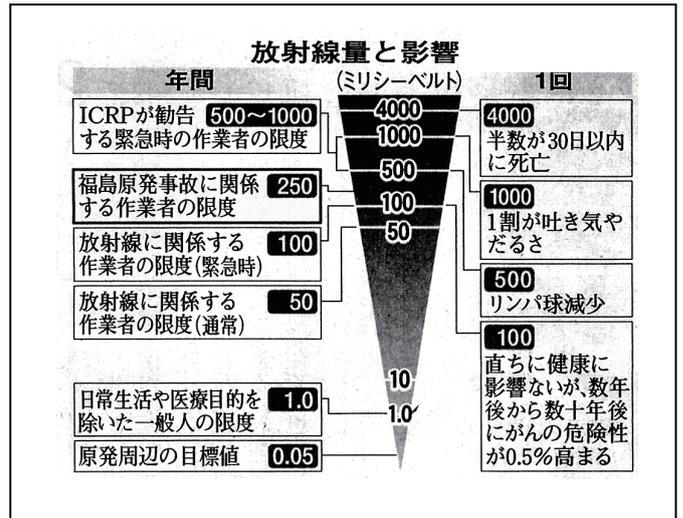
揮発性のヨウ素、セシウム同位体が放出される

131I, 132I, 129mTe, 129Te, 134Cs, 137Cs

非揮発性核種の放出は非常に少ない

89, 90Sr, 95Zr-99Nb, 140Ba-140La, U, Pu





**皆さん：これまでの話を聞かれて**

過去の原子力に絡む主な事故例と被曝との関連を見てきましたが、特に低線量被曝 (100mSv以下) での影響については学問的なコンセンサスが得られていない。それよりも、避難者の心的影響が大きい!!

チェルノブイリ事故後25年が経過: この地域での低線率-長期被曝の放射線影響研究データの蓄積が最重要

**福島第一原発事故**

地震・津波に伴う福島原発事故は、レベル7の最悪の事故になりました。地震・津波被災に加えて原発事故によりたくさんの方々が家族、財産を失い、原発事故では古里 (故郷) にも戻れない状況です。心的苦痛

現在: 地震・津波被災の復旧・復興が行われている。原発事故の被災に関しては、警戒区域、避難勧告がだされいまだ終息 (冷温停止) には至っていない!!

放射線によるこれまでの被ばく、更に今後の低線率-長期被ばく? 放射能で汚染された生活環境場の復興?

**難しいお話し、最後までご清聴有り難うございました。お疲れ様でした!!**

尾小屋鉱山跡のトンネル内に設置したGe検出装置

大学の我々の施設にある非常に低いレベルの放射能を測定するための装置

尾小屋地下測定室内部。検出器のヘッドは分厚い鉛で遮蔽してあり、検出器を冷却するための液体窒素の入ったデューワーシが見えない。奥に3台、手前にも3台の検出器がセットされている