

# 福島原発の放射能を 理解する

物理と工学からの見地

Ben Monreal 教授

カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)

物理学科

質疑応答：

Ben Monreal

Theo Theofanous 教授、UCSB化学工学科

Patrick McCray 教授、UCSB歴史学科



# オリジナル作成者：

**Ben Monreal 教授**

カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)  
物理学科

オリジナル著作とMonreal教授によるセミナー講演（英語、3月16日）は

<http://online.itp.ucsb.edu/online/lecture/bmonreal11/>

# 翻訳者：

野尻美保子（高エネルギー加速器研究機構／東京大学IPMU）

久世正弘（東京工業大学理工学研究科）

前野昌弘（琉球大学理学部）

衛藤稔・石井貴昭・橋本幸士（理化学研究所仁科加速器研究センター）

**このファイルを用いる前に、必ず**

<http://ribf.riken.jp/~koji/jishin/>

**で最新の訳注を見て下さい。また、配布時はこのファイルそのものや  
ファイルのアドレスでなく上記の格納場所のアドレスを転送してください。**

翻訳の許可をオリジナル作成者よりいただいています。

- 放射能とは
- 放射線障害と健康
- メルトダウン(炉心溶融)で何が出てくるか？
- どこへ出ていくか？
- 何を心配するべきか？

# 元素周期表

Periodic Table of the Elements

California Standards Test

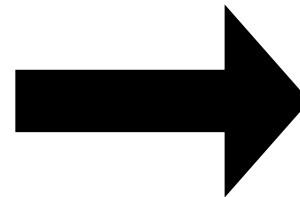
1 1A <b>H</b> Hydrogen 1.01	2 2A <b>He</b> Helium 4.00																								
3 3B <b>Li</b> Lithium 6.94	4 4A <b>Be</b> Beryllium 9.01	5 5B <b>B</b> Boron 10.81	6 6A <b>C</b> Carbon 12.01	7 7A <b>N</b> Nitrogen 14.01	8 8A <b>O</b> Oxygen 16.00	9 9A <b>F</b> Fluorine 19.00	10 10A <b>Ne</b> Neon 20.18											11 11B <b>Na</b> Sodium 22.99	12 12B <b>Mg</b> Magnesium 24.31	13 13B <b>Al</b> Aluminum 26.98	14 14B <b>Si</b> Silicon 28.09	15 15B <b>P</b> Phosphorus 30.97	16 16B <b>S</b> Sulfur 32.07	17 17B <b>Cl</b> Chlorine 35.45	18 18B <b>Ar</b> Argon 39.95
19 19A <b>K</b> Potassium 39.10	20 20A <b>Ca</b> Calcium 40.08	21 3B <b>Sc</b> Scandium 44.96	22 4B <b>Ti</b> Titanium 47.87	23 5B <b>V</b> Vanadium 50.94	24 6B <b>Cr</b> Chromium 52.00	25 7B <b>Mn</b> Manganese 54.94	26 8B <b>Fe</b> Iron 55.85	27 8B <b>Co</b> Cobalt 58.93	28 8B <b>Ni</b> Nickel 58.69	29 9B <b>Cu</b> Copper 63.55	30 10B <b>Zn</b> Zinc 65.39	31 11B <b>Ga</b> Gallium 69.72	32 12B <b>Ge</b> Germanium 72.61	33 13B <b>As</b> Arsenic 74.92	34 14B <b>Se</b> Selenium 78.96	35 15B <b>Br</b> Bromine 79.90	36 16B <b>Kr</b> Krypton 83.80								
37 17A <b>Rb</b> Rubidium 85.47	38 18A <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 3B <b>Y</b> Yttrium 88.91	40 4B <b>Zr</b> Zirconium 91.22	41 5B <b>Nb</b> Niobium 92.91	42 6B <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 7B <b>Tc</b> Technetium (98)	44 8B <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 8B <b>Rh</b> Rhodium 102.91	46 9B <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 10B <b>Ag</b> Silver 107.87	48 11B <b>Cd</b> Cadmium 112.41	49 12B <b>In</b> Indium 114.82	50 13B <b>Sn</b> Tin 118.71	51 14B <b>Sb</b> Antimony 121.76	52 15B <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 16B <b>I</b> Iodine 126.90	54 17B <b>Xe</b> Xenon 131.29								
55 19A <b>Cs</b> Cesium 132.91	56 20A <b>Ba</b> Barium 137.33	57 3B <b>La</b> Lanthanum 138.91	72 4B <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 5B <b>Ta</b> Tantalum 180.95	74 6B <b>W</b> Tungsten 183.84	75 7B <b>Re</b> Rhenium 186.21	76 8B <b>Os</b> Osmium 190.23	77 8B <b>Ir</b> Iridium 192.22	78 9B <b>Pt</b> Platinum 195.08	79 10B <b>Au</b> Gold 196.97	80 11B <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 12B <b>Tl</b> Thallium 204.38	82 13B <b>Pb</b> Lead 207.2	83 14B <b>Bi</b> Bismuth 208.98	84 15B <b>Po</b> Polonium (209)	85 16B <b>At</b> Astatine (210)	86 17B <b>Rn</b> Radon (222)								
87 27A <b>Fr</b> Francium (223)	88 28A <b>Ra</b> Radium (226)	89 3B <b>Ac</b> Actinium (227)	104 4B <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 5B <b>Db</b> Dubnium (262)	106 6B <b>Sg</b> Seaborgium (266)	107 7B <b>Bh</b> Bohrium (264)	108 8B <b>Hs</b> Hassium (269)	109 9B <b>Mt</b> Meitnerium (268)																	
<p><b>“三重水素”(水素)</b></p> <p><b>ヨウ素</b></p> <p><b>セシウム</b></p> <p><b>ウラン、プルトニウム</b></p>																									
<p><b>Key</b></p> <p>11 — Atomic number  <b>Na</b> — Element symbol          Sodium — Element name          22.99 — Average atomic mass*</p>																									
<p>* If this number is in parentheses, then it refers to the atomic mass of the most stable isotope.</p>																									
58 2 <b>Ce</b> Cerium 140.12	59 3 <b>Pr</b> Praseodymium 140.91	60 4 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	61 5 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 6 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 7 <b>Eu</b> Europium 151.96	64 8 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 9 <b>Tb</b> Terbium 158.93	66 10 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	67 11 <b>Ho</b> Holmium 164.93	68 12 <b>Er</b> Erbium 167.26	69 13 <b>Tm</b> Thulium 168.93	70 14 <b>Yb</b> Ytterbium 173.04	71 15 <b>Lu</b> Lutetium 174.97												
90 10 <b>Th</b> Thorium 232.04	91 11 <b>Pa</b> Protactinium 231.04	92 12 <b>U</b> Uranium 238.03	93 13 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 14 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 15 <b>Am</b> Americium (243)	96 16 <b>Cm</b> Curium (247)	97 17 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 18 <b>Cf</b> Californium (251)	99 19 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 20 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 21 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 22 <b>No</b> Nobelium (259)	103 23 <b>Lr</b> Lawrencium (262)												

↑  
(異なる)  
元素

ホウ素  
ベリリウム  
リチウム  
ヘリウム  
水素

		<b>B7</b> 1.4 MeV (3/2-)	<b>B8</b> 770 ms 2+	<b>B9</b> 0.54 keV 3/2-	<b>B10</b> 3+	<b>B11</b> 3/2-	<b>B12</b> 20.20 ms 1+	
			EC2α	2pα	19.9	80.1	β-3α	β-
	<b>Be5</b>	<b>Be6</b> 92 keV 0+	<b>Be7</b> 53.29 d 3/2-	<b>Be8</b> 6.8 eV 0+	<b>Be9</b> 3/2-	<b>Be10</b> 1.51E+6 y 0+	<b>Be11</b> 13.81 s 1/2+	β-
		2p	EC	2α	100	β-	β-α	β-
	<b>Li4</b> 2-	<b>Li5</b> 1.5 MeV 3/2-	<b>Li6</b> 1+	<b>Li7</b> 3/2-	<b>Li8</b> 838 ms 2+	<b>Li9</b> 178.3 ms 3/2-	<b>Li10</b> 1.2 MeV	β-
		p	7.5	92.5	β-2α	β-n	n	β-
	<b>He3</b> 1/2+	<b>He4</b> 0+	<b>He5</b> 0.60 MeV 3/2-	<b>He6</b> 806.7 ms 0+	<b>He7</b> 160 keV (3/2-)	<b>He8</b> 119.0 ms 0+	<b>He9</b> 0.30 MeV (1/2-)	n
				β-	n	β-n	n	n
	<b>H1</b> 1/2+	<b>H2</b> 1+	<b>H3</b> 12.33 y 1/2+	<b>H4</b> 2-	<b>H5</b>	<b>H6</b>	6	
	99.985	0.015	β-					
		<b>n1</b> 614.8 s 1/2+		2	4			
		β-						

(異なる)  
同位体

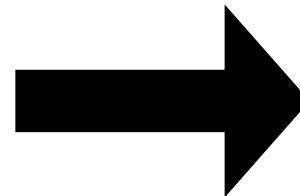


↑  
(異なる)  
元素

ホウ素  
ベリリウム  
リチウム  
ヘリウム  
水素

		<b>B7</b> 1.4 MeV (3/2-)	<b>B8</b> 770 ms 2+	<b>B9</b> 0.54 keV 3/2-	<b>B10</b> 3+	<b>B11</b> 3/2-	<b>B12</b> 20.20 ms 1+	
	<b>Be5</b>	<b>Be6</b> 92 keV 0+	<b>Be7</b> 53.29 d 3/2-	<b>Be8</b> 6.8 eV 0+	<b>Be9</b> 3/2-	<b>Be10</b> 1.51E+6 y 0+	<b>Be11</b> 13.81 s 1/2+	
	<b>Li4</b> 2-	<b>Li5</b> 1.5 MeV 3/2-	<b>Li6</b> 1+	<b>Li7</b> 3/2-	<b>Li8</b> 838 ms 2+	<b>Li9</b> 178.3 ms 3/2-	<b>Li10</b> 1.2 MeV	
	<b>He3</b> 1/2+	<b>He4</b> 0+	<b>He5</b> 0.60 MeV 3/2-	<b>He6</b> 806.7 ms 0+	<b>He7</b> 160 keV (3/2-)	<b>He8</b> 119.0 ms 0+	<b>He9</b> 0.30 MeV (1/2-)	
	<b>H1</b> 1/2+	<b>H2</b> 1+	<b>H3</b> 12.33 y 1/2+	<b>H4</b> 2-	<b>H5</b>	<b>H6</b>		
		<b>n1</b> 614.8 s 1/2+						
			2		4			6

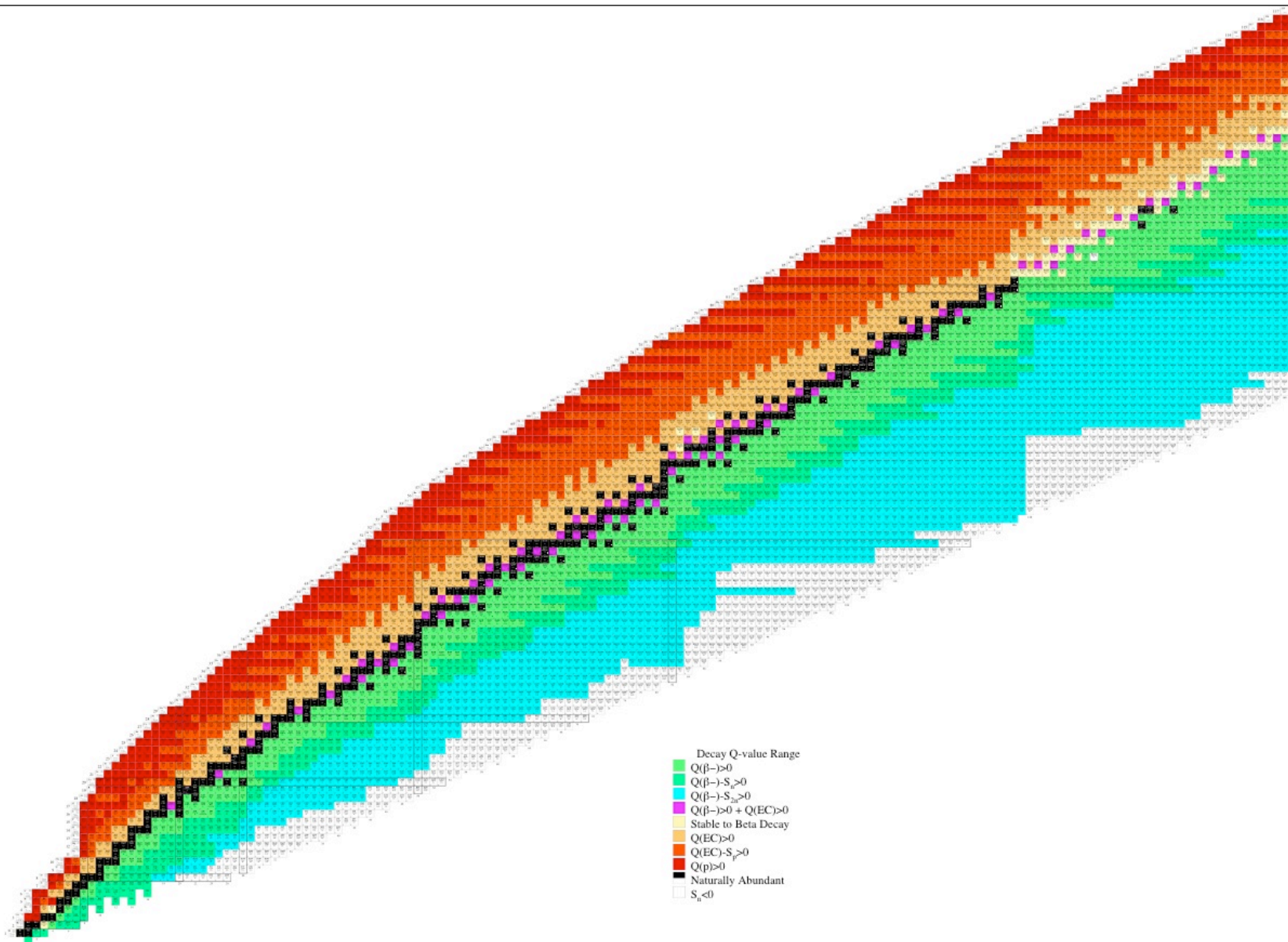
(異なる)  
同位体





↑  
(異なる)  
元素

(異なる)  
同位体 →



- Decay Q-value Range
- $Q(\beta^-) > 0$
  - $Q(\beta^-) - S_p > 0$
  - $Q(\beta^-) - S_n > 0$
  - $Q(\beta^-) > 0 + Q(EC) > 0$
  - Stable to Beta Decay
  - $Q(EC) > 0$
  - $Q(EC) - S_p > 0$
  - $Q(p) > 0$
  - Naturally Abundant
  - $S_n < 0$





原子炉はウラン(U)を核分裂させる

原子炉出力(エネルギー)の95%は  
ウランの核分裂による

残り5%はその後の核分裂  
生成物の崩壊による

核分裂生成物は色々  
な種類の元素を含ん  
でいる

↑  
(異なる)  
元素

(異なる)  
同位体 →

ウランと  
プルトニウム

安定な同位体

核分裂生成物

核分裂



原子炉が動いているとき、核分裂  
 で出る中性子は燃料や炉の構成物  
 と反応して不安定な元素(放射性  
 物質)を作りだす

燃料での中性子捕捉

ウランと  
 プルトニウム

マイナーアクチノイド

安定な同位体

核分裂生成物

核分裂

Different elements ↑

Different isotopes →

水、空気、原子炉構成物  
 での中性子捕捉

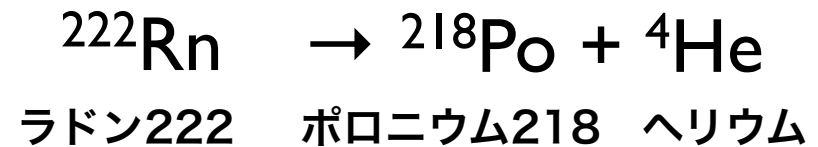
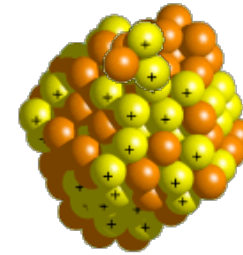
放射能を持つようになる

Decay Q-value Range  
 Q(β<sup>-</sup>)>0  
 Q(β<sup>-</sup>)-S<sub>n</sub>>0  
 Q(β<sup>-</sup>)-S<sub>2n</sub>>0  
 Q(β<sup>-</sup>)-S<sub>2n</sub>>0

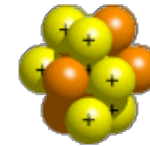


# 放射線の影響

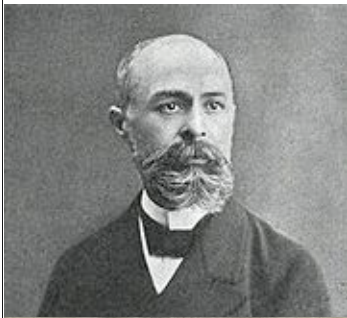
アルファ崩壊：  
マイナーアクチノイドに共通  
(原子10個を通り過ぎることに1個影響を与える)



ベータ崩壊、ガンマ崩壊：  
核分裂生成物  
(原子3000個を通り過ぎることに1個影響を与える)



# どのくらいのダメージ？

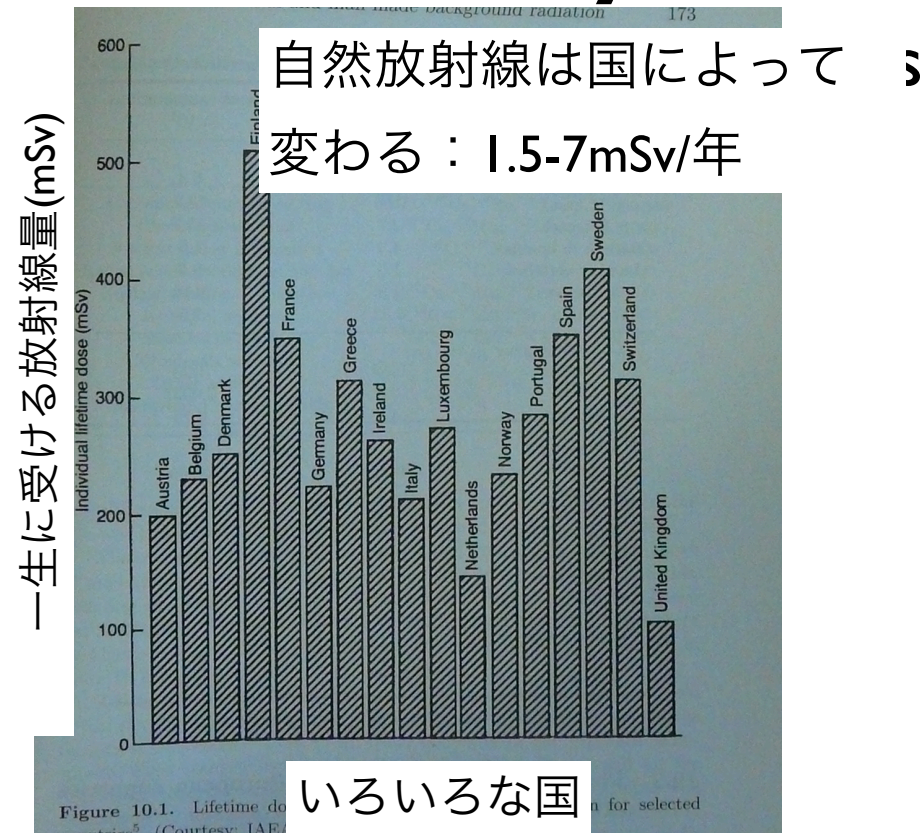


- 1 ベクレル(Bq) = 1 秒に 1 回の崩壊
  - 1 キュリー(Ci) = 1 秒に 3 7 0 億回の崩壊 (古い単位)
  - 量の単位であり、「燃料プールには2000万キュリーのセシウム137がある」のように用いる。
  - 1 グレイ(Gy) = 体重 1 gあたり 10億回のウラン238の崩壊を吸収、あるいは100億回のセシウム137の崩壊を吸収することに相当
  - 1 シーベルト(Sv) = 体重 1 gあたり 5000万回のウラン238の崩壊、あるいは100億回のセシウム137の崩壊を吸収に相当
  - 被曝量の単位 (吸収線量) であり、人体組織の化学結合がどれだけの割合でダメージを受けたかを示す。
- 核分裂生成物に対しては、グレイ = シーベルト

(Gy, Svの説明は厳密な定義ではありません)

# 放射線量：計算の初歩

- 私たちは、常に自然界の放射線を浴びている。
  - 体内の天然カリウム40から  
～0.2ミリシーベルト/年
  - 空気中の天然ラドン222から  
～1ミリシーベルト/年
- コロラド州デンバーに引越す→  
～1ミリシーベルト/年を追加
- 航空機の客室乗務員なら→  
～数ミリシーベルト/年を追加



教訓：数ミリシーベルト (mSv) の被曝は全く心配する必要はない（しかしmSv/時を長時間蓄積するのは良くない）

# 放射線被曝とガンの発生率

生体組織の電離  $\approx$  DNAの損傷 (まれに)

DNAの損傷  $\approx$  細胞の変化 (まれに)

細胞の変化  $\approx$  ガン (まれに)

ガンの種類	1000mSvの被曝時、10000人当たり ガン発生の増加* (人)
白血病	3
乳ガン	7
甲状腺ガン	1.6
肺ガン	4
胃ガン	5
結腸ガン	2

教訓 : 1 Sv = 1000 mSv  
を被曝することは運転中に  
携帯メールを打つ危険と同  
じ程度で、避けた  
ほうがよいのは確か。。。。



\*一年あたり。(著者にも確認。2011/3/20訳注追加)

# 急性の放射線障害

教訓：5Sv以上 = 命の危険:逃げる

- 非常に稀な事故
  - スローティンの事故：21 Sv、犠牲者は9日後に死亡
  - ダリアンの事故：5 Sv、犠牲者は1ヶ月後に死亡
  - ゴイアニアの事故：5 Sv/時の医療放射線源が盗難  
4名が死亡（全員 > 5 Sv）、15名が入院（全員0.5から5 Svの間）
  - チェルノブイリの初期作業員：多くの地点で > 10 Sv/時。  
30名が死亡、200名が入院
  - 広島、長崎の多くの犠牲者

# ニュースに出てくる単位

**The New York Times** ニューヨーク・タイムズ  
故障した原子炉の最後の防衛：50人の作業員

火曜日の2号機内部の爆発と4号機での火災のあと、原子炉近くの放射線は毎時400ミリシーベルトに達したと言われたが、その後発電所正門で0.6ミリシーベルトまで下がった。



発電所敷地境界での放射線レベルは一時的に毎時8217マイクロシーベルトになったが、その後約3分の1まで減った。

← 5000ミリシーベルト = 致死量ですから、  
毎時400mSvの所に  $5000/400 = 12$  時間いれば  
生命の危険があります。

← 毎時0.6ミリシーベルト

1000mSv = 運転中の携帯メール

$1000 / 0.6 = 2$  ヶ月間で

← 8000  $\mu$ Sv/時 = 8 mSv/時



# この記事が意味しているのは 「毎時」ミリシーベルト

NYTimes.com

2機の原子炉の間で  
400ミリシーベルトが  
測定されたが、発電  
所境界では11.9ミリ  
シーベルトが最大計  
測値だった。

← 毎時12ミリ  
シーベルト

4号機での  
火事

2号機での  
爆発

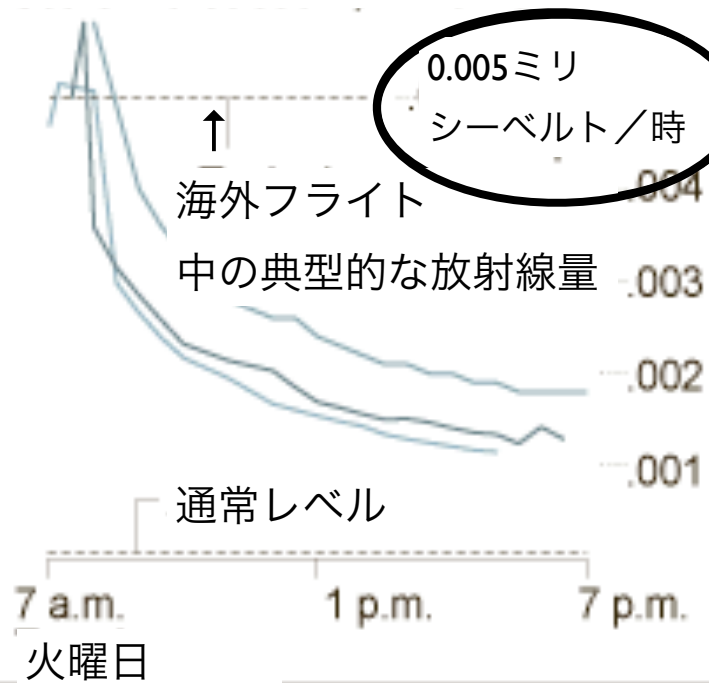
3号機

月曜日

火曜日

南側にあるいくつかの市で放射線レベルの上昇が見られたが、健康被害を及ぼすレベルより遥かに低く、下がりつつある。

東海村の3ヶ所での測定値。比較のため、1000倍したスケール。

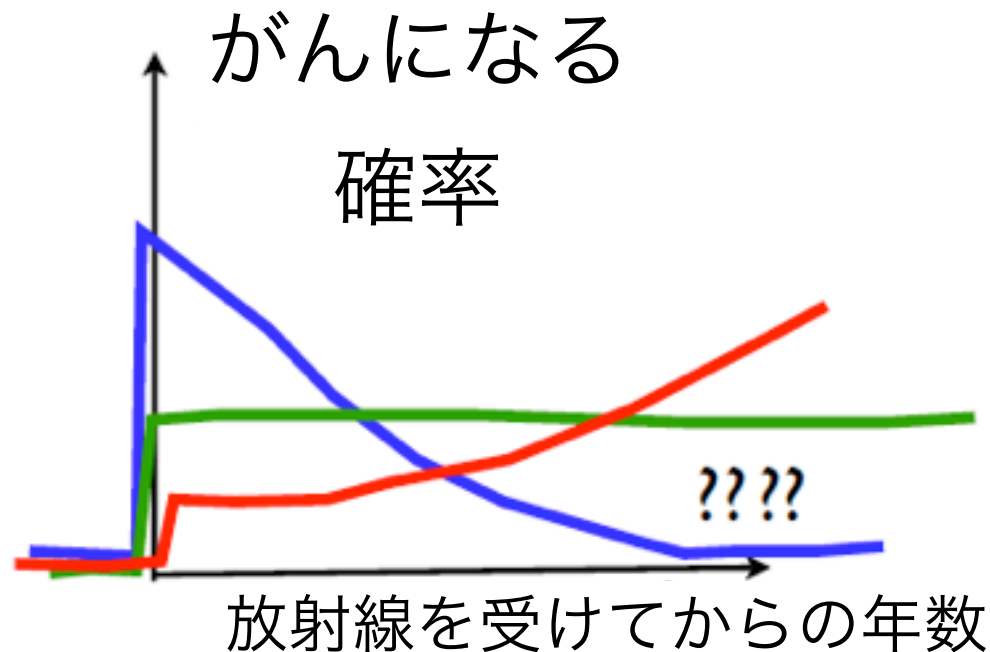
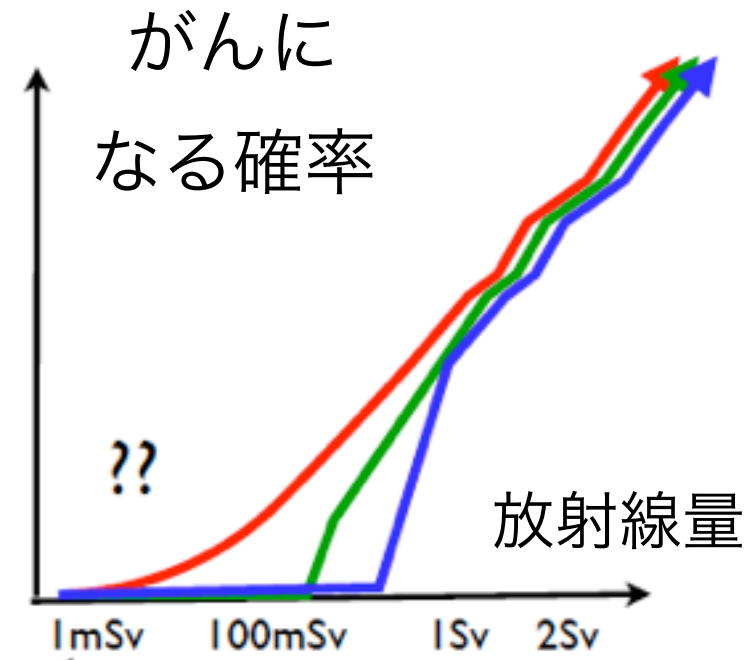


# 放射線量と危険度は比例するか

## 低量被曝の場合

- 可能性はあるが、低量被曝による危険性の増加が検証できないためよくわからない。

(チェルノブイリの場所：100ミリシーベルトで甲状腺がん)



Fukushima?

赤緑青は異なる発ガンモデル



# 何が放出されているか？

ウランと  
プルトニウム

マイナーアクチノイド

安定な同位体

核分裂生成物

Different elements ↑

Different isotopes →

放射能を持つようになる(放射化される)



放射能を持つようになるもの

Key

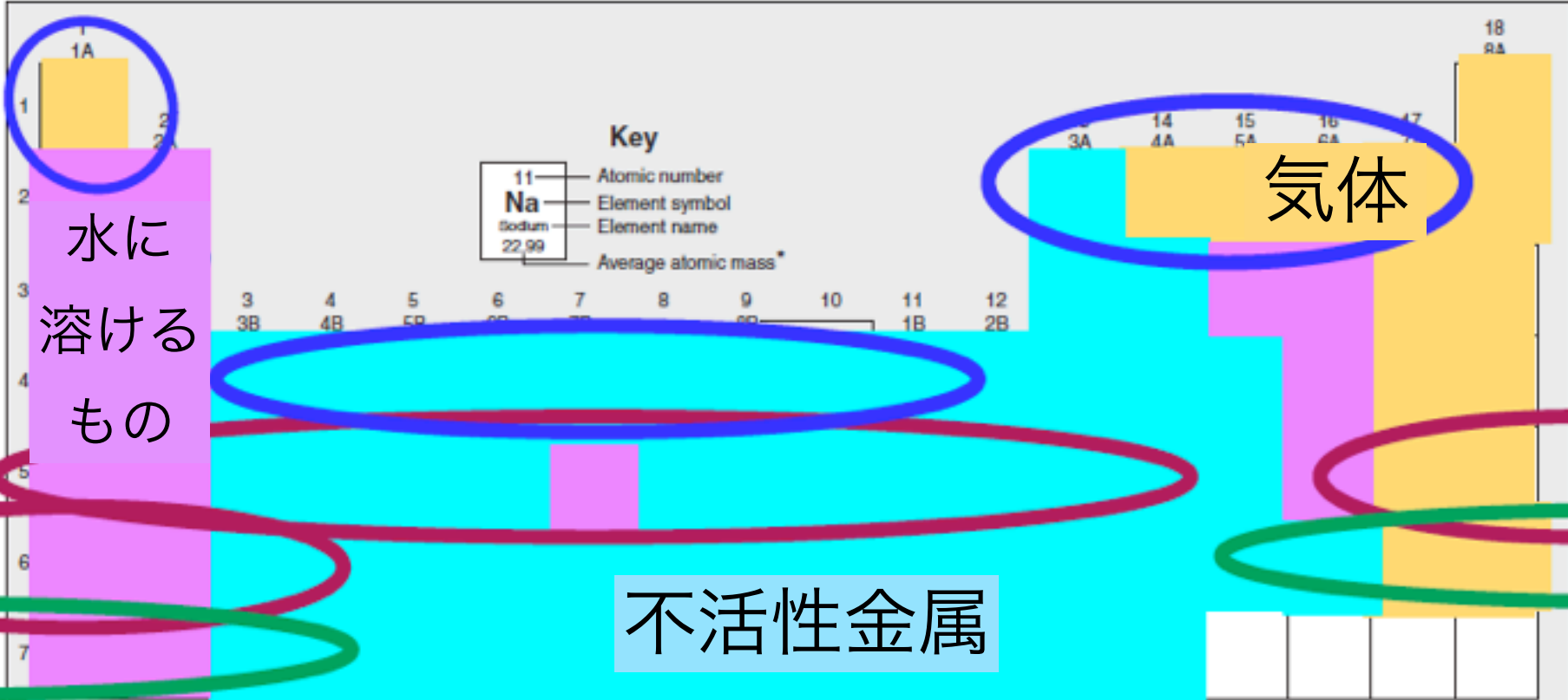
11	Atomic number
Na	Element symbol
Sodium	Element name
22.99	Average atomic mass*

1	1A	1	2	18	8A
1	H	2	He	18	He
Hydrogen	1.01	Helium	4.00		
3	Li	4	Be	10	Ne
Lithium	6.94	Beryllium	9.01	Neon	20.18
11	Na	12	Mg	17	Cl
Sodium	22.99	Magnesium	24.31	Chlorine	35.45
19	K	20	Ca	35	Br
Potassium	39.10	Calcium	40.08	Bromine	79.90
27	Rb	36	Kr	54	Xe
Rubidium	85.47	Krypton	83.80	Xenon	131.29
55	Cs	56	Ba	82	Pb
Cesium	132.91	Barium	137.33	Lead	207.2
87	Fr	88	Ra	101	Md
Francium	(223)	Radium	(226)	Mendelevium	(258)

核分裂生成物

マイナーアクチノイド

\* If this number is in parentheses, then it refers to the atomic mass of the most stable isotope.



\* if this number is in parentheses, then it refers to the atomic mass of the most stable isotope.

## Healthy reactor:

### 健全な原子炉

#### ジルコニウムの被覆内

核燃料と核分裂生成物

とアクチノイド類

#### 水中

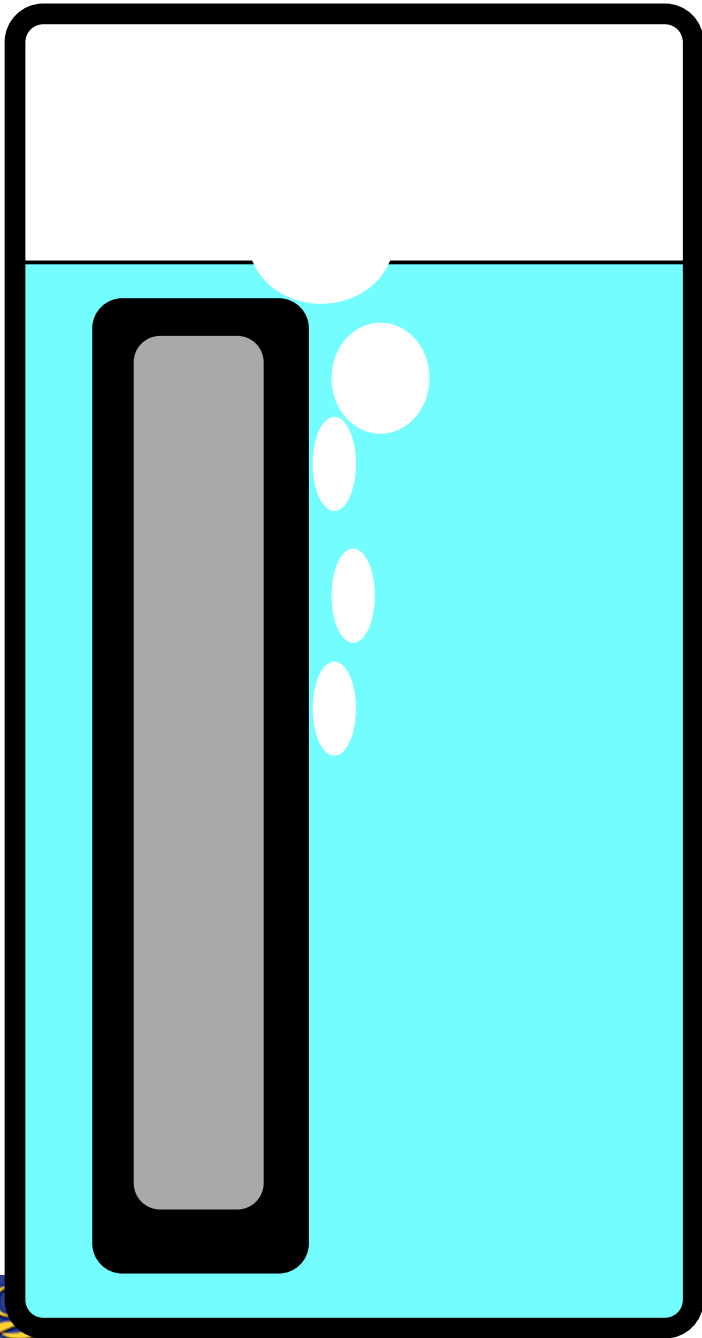
放射化物

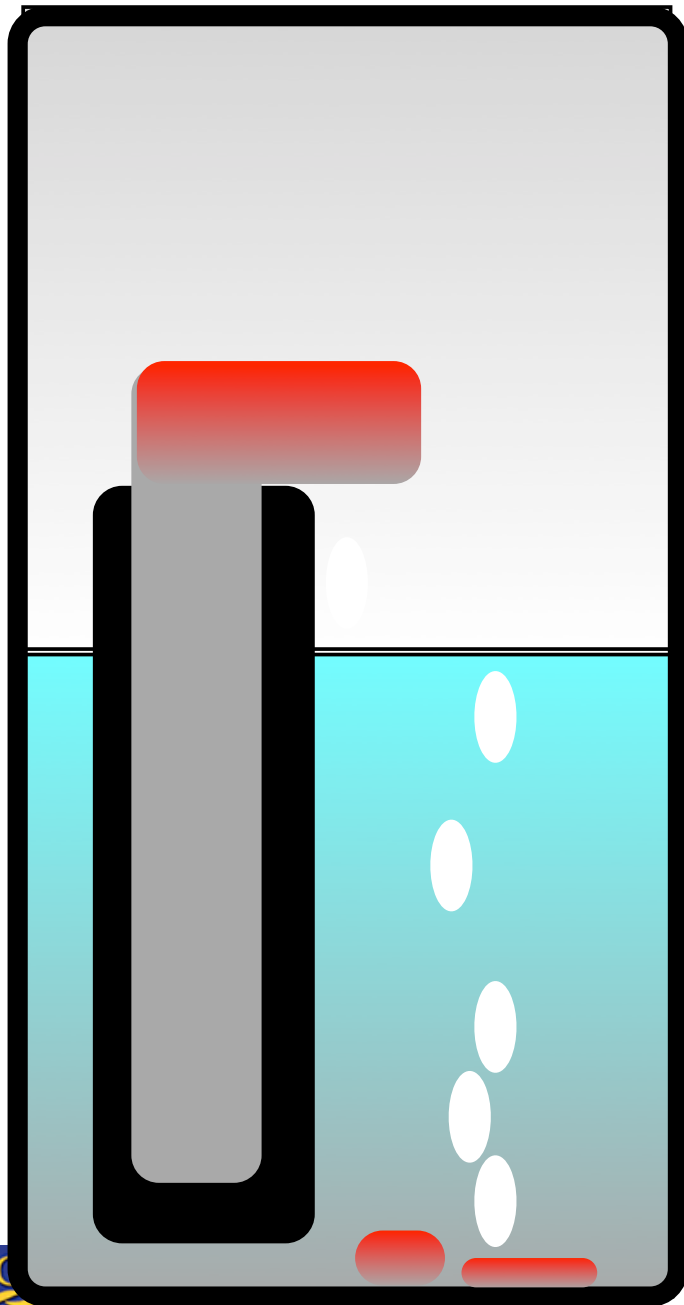
#### 蒸気中

放射化物

#### 環境中

実質的に何ものなし





## Meltdown:

炉心（燃料棒）溶融

ジルコニウム被覆内

燃料＋核分裂生成物＋アクチノイド

冷却水中

核分裂生成物（セシウム、  
ヨウ素、テクネチウム等）

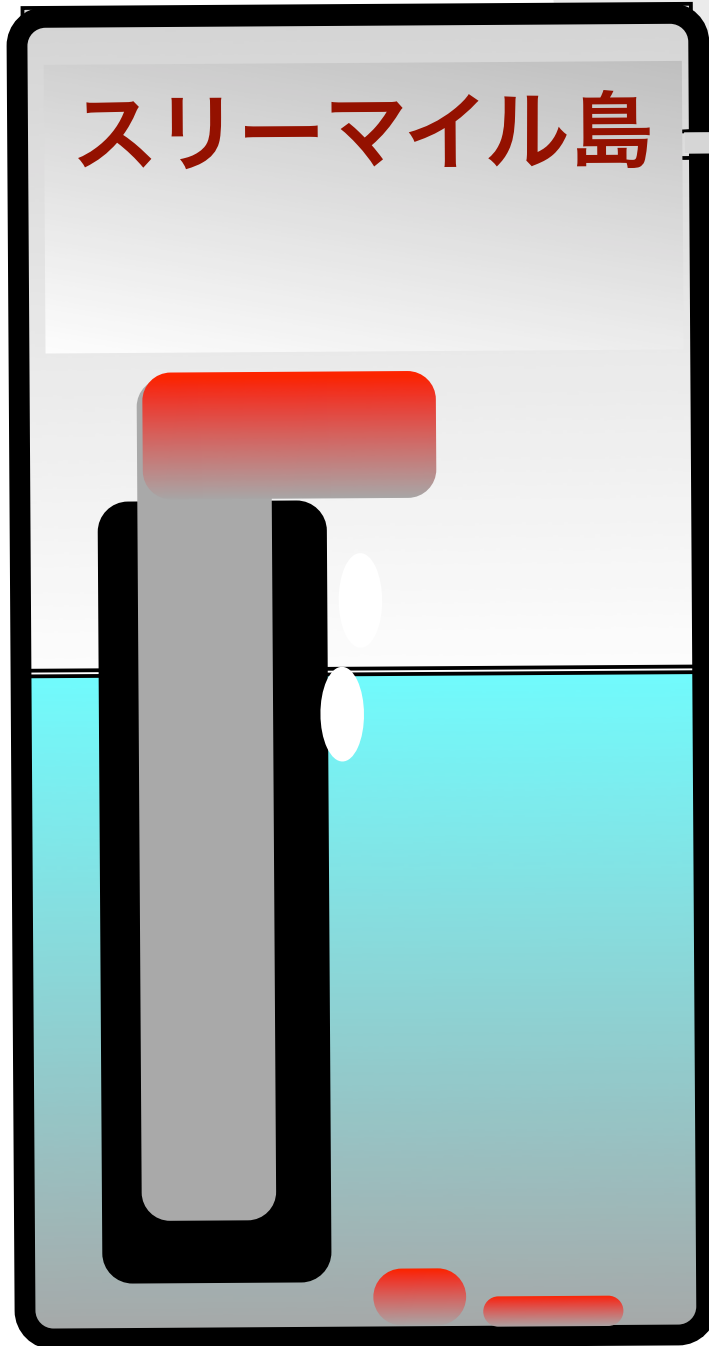
蒸気中

核分裂生成物（キセノン、  
クリプトン、ラドン（気体））

環境中

実質的になにもなし

スリーマイル島



## Meltdown + emergency venting:

炉心（燃料棒）溶融

+ 緊急蒸気放出

ジルコニウム被覆内

核燃料 + 核分裂生成物 + アクチノイド

冷却水中

核分裂生成物 (セシウム, ヨウ素, テクネチウムなど)

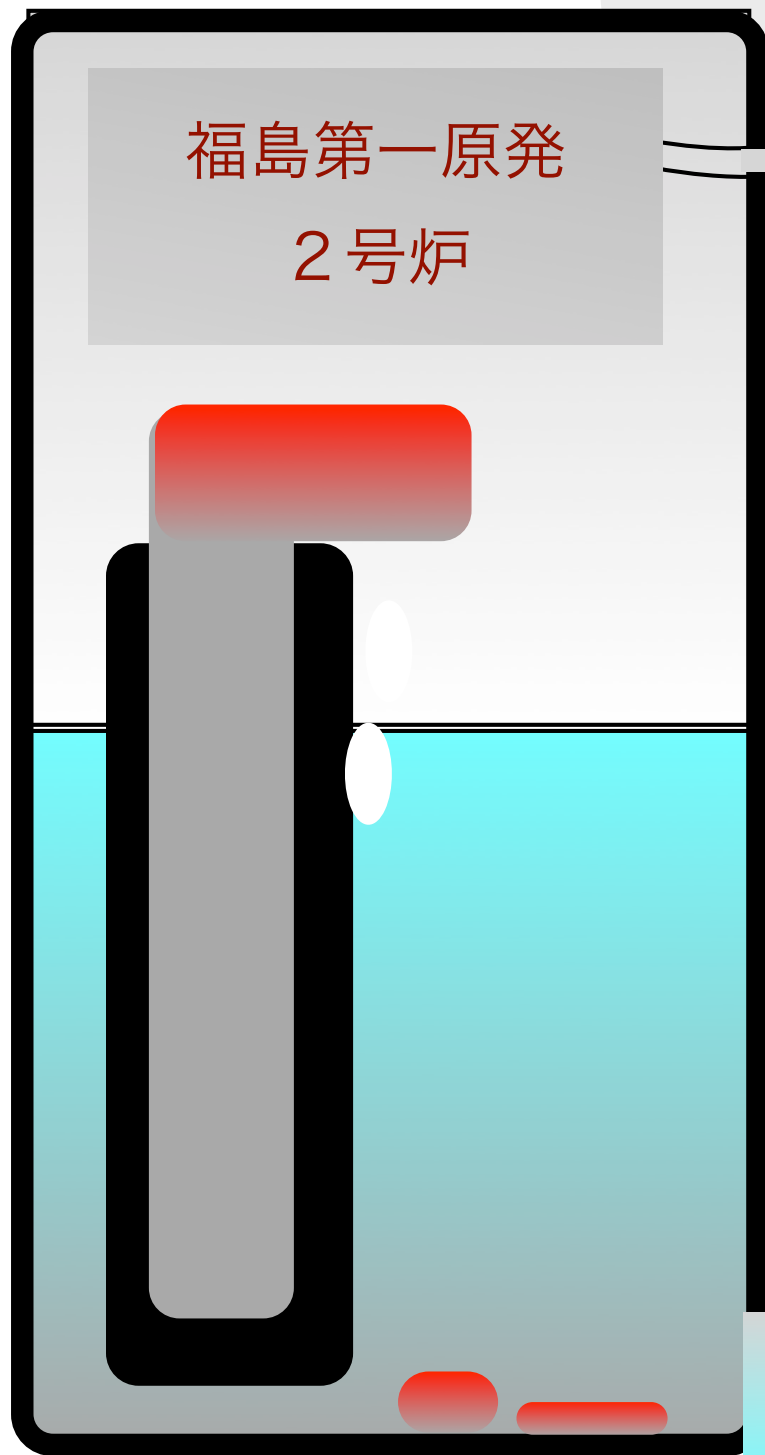
蒸気中

核分裂生成物 (キセノン, クリプトン, ラドン)

環境中

キセノン, クリプトン, ラドン





# Meltdown + containment failure:

## 燃料棒融解と閉じ込め失敗

### ジルコニウム被覆内

燃料+核分裂生成物+アクチノイド

### 冷却水中

核分裂生成物 セシウム,ヨウ素,テクネチウムなど

### 蒸気中

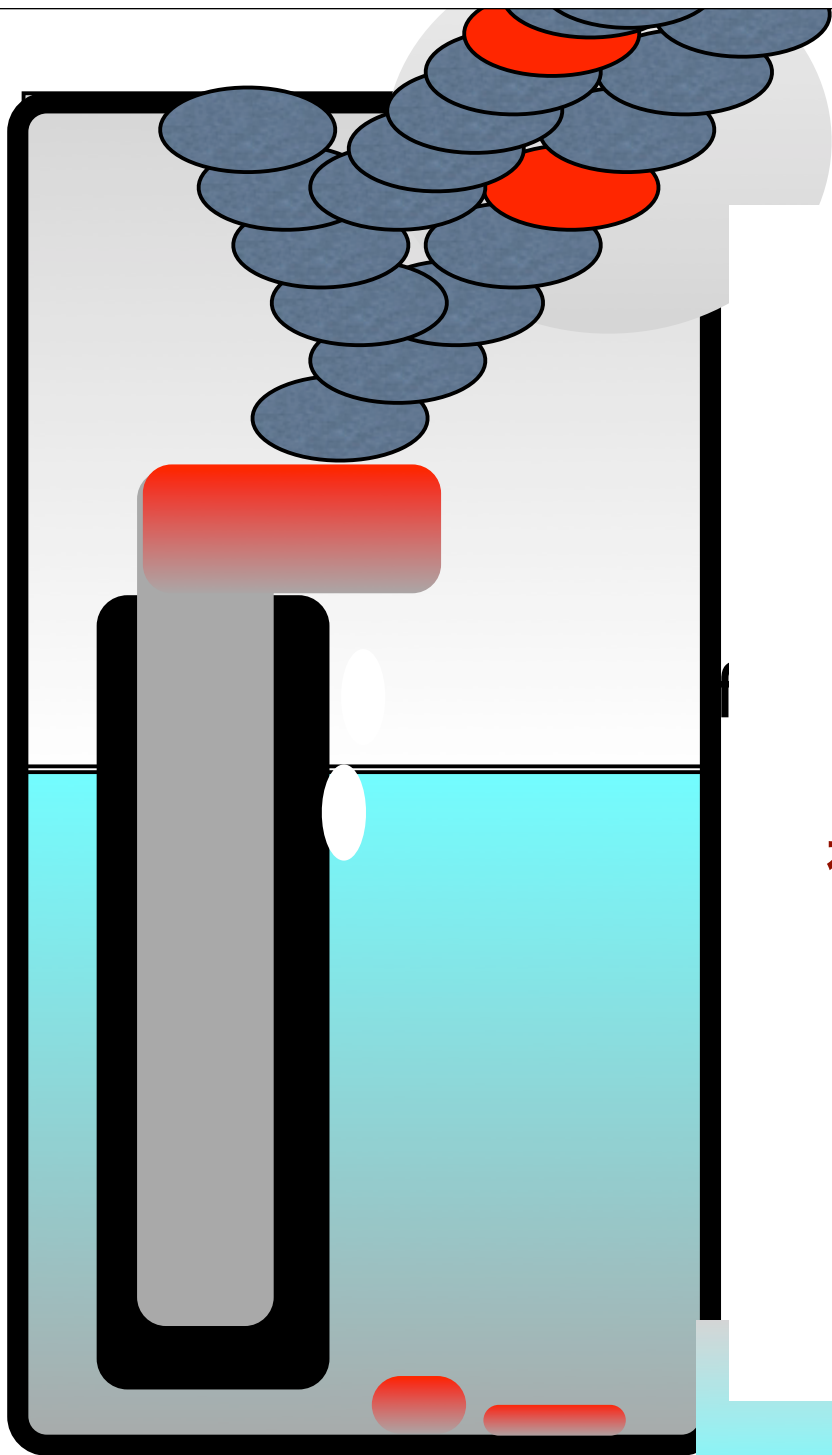
核分裂生成物キセノン、クリプトン、ラドン など

### 環境中

キセノン、クリプトン、ラドン



キセノン、クリプトン、ラドン、セシウム、ヨウ素、  
テクネチウム



## Meltdown + fuel fire

### 燃料棒融解と燃料発火

#### ジルコニウムケース内

核燃料 + 核分裂生成物 + アクチノイド

#### 環境中

核燃料 + 核分裂生成物 + アクチノイド

**福島原発の使用済み燃料の貯蔵プール**

**ではたしてこの事象が発生したか？**

**(報道にばらつき有り)**

これは非常に深刻な事態だが、

チェルノブイリほど悪くない

# チェルノブイリ事故 の場合

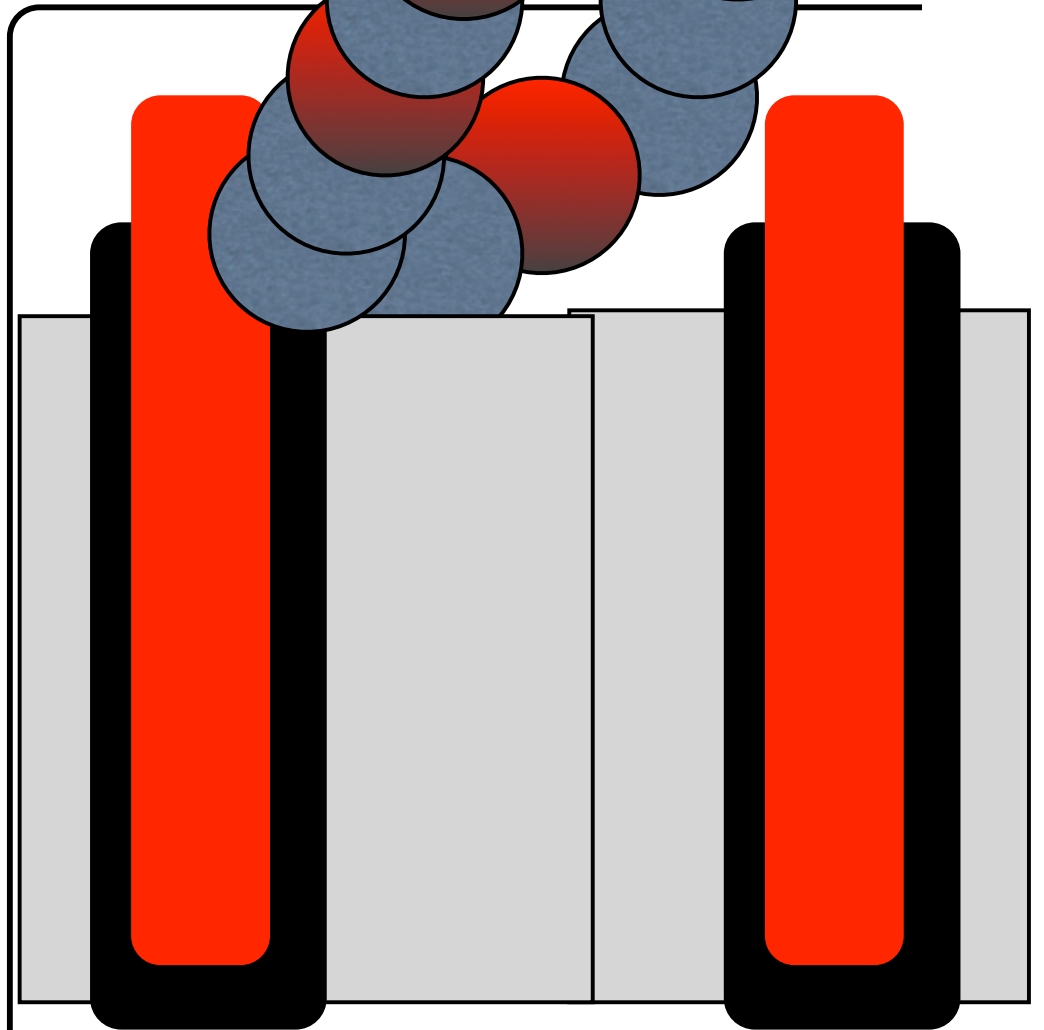
実質的に格納容器がない

炉心に黒鉛

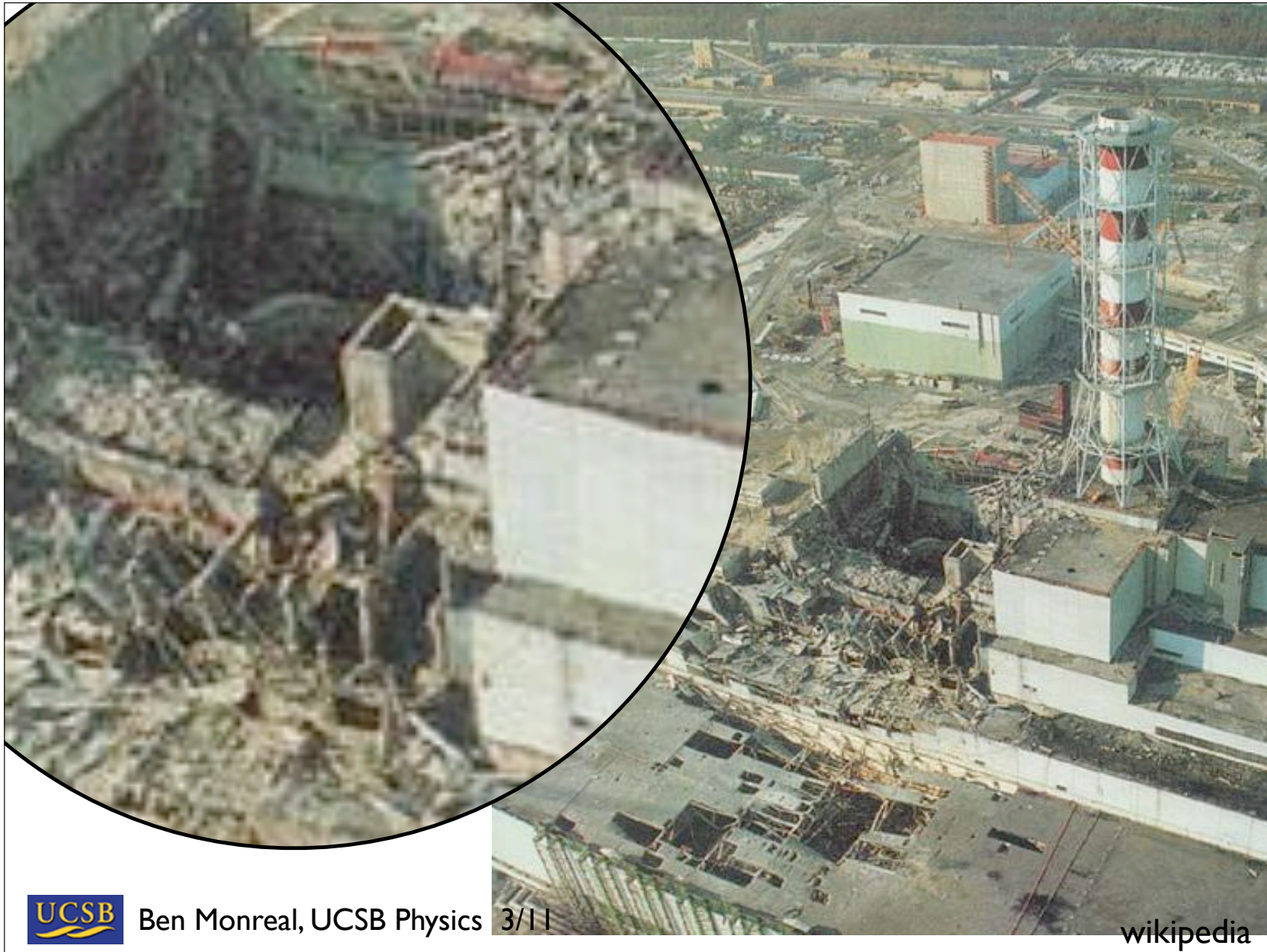
(巨大火災の燃料となる)

爆発炎上の際に核燃料がさらに  
核分裂を起こす

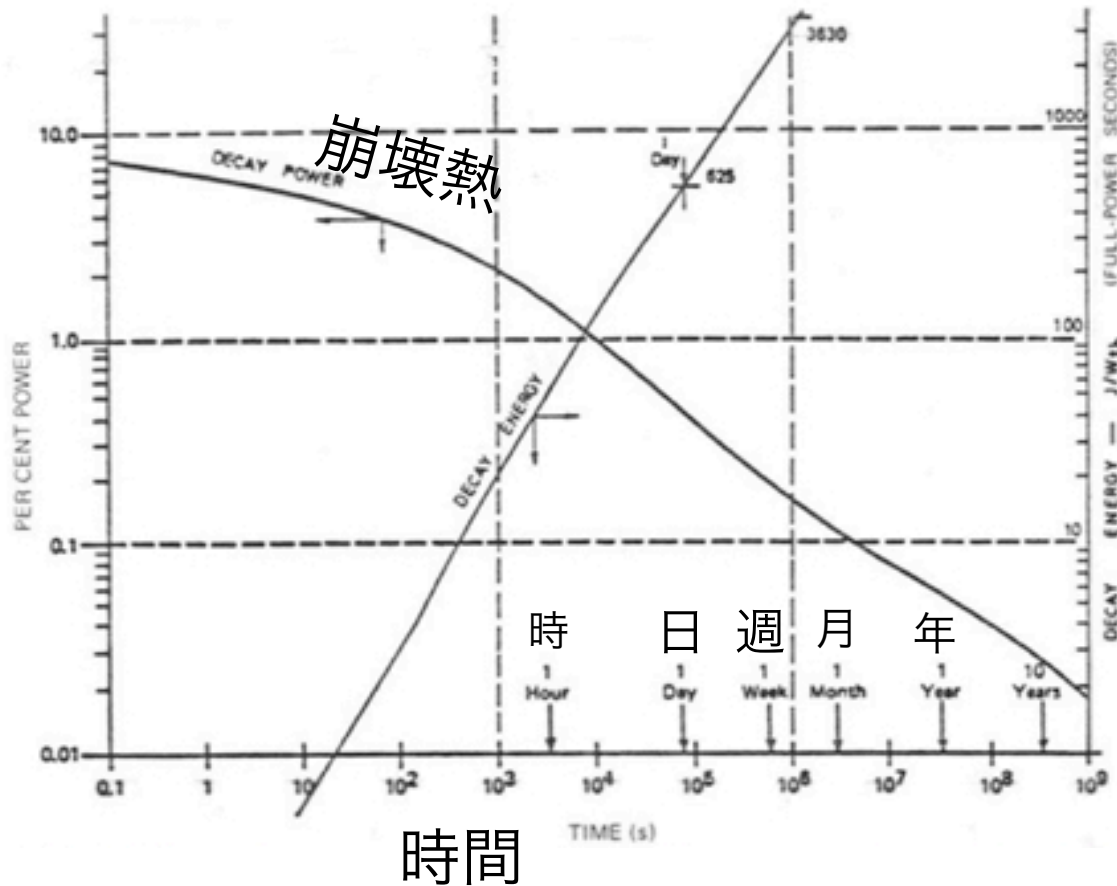
(福島原子炉はすでに5日間核分  
裂が止まっている)



# 事故時のチェルノブイリ発電所



# 福島での不幸中の幸い



- 原子炉は地震でも損傷なく生き延びた (!!!!)
- 緊急炉心停止が適切に行われた
- 最初の一時間の閉じ込めで放射性物質の危険が 1/5 に
- 最初の一日で危険が 1/20 に
- 避難が適切に行われている
- 最も危険な火災のリスクが100日前まで使われていた使用済み燃料に対してあるが、これはチェルノブイリにくらべて放射能の危険は100分の1

訳注:福島第一4号機に貯蔵されていた使用済み燃料は約100日前に取り出されている

# 注意すべき核種

核種	半減期	チェルノブイリの影響
ヨウ素131	8日	短期間に東欧のすべての住民が 0.5mSv 被曝
セシウム137	30年	加えて30年にわたって、1 mSv
ストロンチウム90	30年	総量はセシウムより少ないが骨に蓄積。
プルトニウム241	14年	原子炉近くで影響大、ただし除染が容易

# 火災発生の場合 粉塵中に

核種	半減期
ジルコニウム 95	60 日
モリブデン 99	3 日
ルテニウム 103	40 日
セリウム 141	30 日
バリウム 140	14 日

- 現場で対応する人にとって最も危険。天候によっては、粉塵が拡散される（チェルノブイリの危険な汚染物質は 60 Km 飛散した。）
- 粉塵内の放射性物質が屋内退避の理由。道路にある粉塵では被曝しない。衣類についた粉塵が被曝の原因。
- 粉塵は道路や建物から除去可能。農業漁業従事者は汚染が取り除かれるまで生産できない。（汚染土壌の上部 10 cm を取り除く方法がある。）

# まとめ

- チェルノブイリにおける最悪の一般公衆への影響はストレスと恐怖であった。教育と情報周知に失敗した。
- 我々は情報を持っている。mSv を数えてどのように対応するか決めよう。
- 私見：福島原発の放射能の危険は最悪の場合でも軽減可能であり局所的(初期避難と食品中のヨウ素 $^{131}$  摂取をコントロールする必要がある。)
- 私見：地球規模災害の恐れはない。
- 津波被災者と50人の福島原発の作業従事者のためにみんなのエネルギーを集中しよう。