

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



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

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) は次のホームページで：

<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）

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？



Periodic Table of the Elements

1

1A

1

H

Hydrogen

1.01

2

2A

2

He

Helium

4.00

3

3A

5

B

Boron

10.81

4

4A

6

C

Carbon

12.01

5

5A

7

N

Nitrogen

14.01

6

6A

8

O

Oxygen

16.00

7

7A

9

F

Fluorine

19.00

11

1A

3

Na

Sodium

22.99

12

2A

4

Mg

Magnesium

24.31

13

3A

13

Al

Aluminum

26.98

14

4A

14

Si

Silicon

28.09

15

5A

15

P

Phosphorus

30.97

16

6A

16

S

Sulfur

32.07

17

7A

17

Cl

Chlorine

35.45

18

8A

18

Ar

Argon

39.95

19

1A

3

K

Potassium

39.10

20

2A

4

Ca

Calcium

40.08

21

3

21

Sc

Scandium

44.96

22

4

22

Ti

Titanium

47.87

23

5

23

V

Vanadium

50.94

24

6

24

Cr

Chromium

52.00

25

7

25

Mn

Manganese

54.94

26

8

26

Fe

Iron

55.85

27

9

27

Co

Cobalt

58.93

28

10

28

Ni

Nickel

58.69

29

11

29

Cu

Copper

63.55

30

12

30

Zn

Zinc

65.39

31

13

31

Ga

Gallium

69.72

32

14

32

Ge

Germanium

72.61

33

15

33

As

Arsenic

74.92

34

16

34

Se

Selenium

78.96

35

17

35

Br

Bromine

79.90

36

18

36

Kr

Krypton

83.80

37

1A

5

Rb

Rubidium

85.47

38

2A

6

Sr

Strontium

87.62

39

3

39

Y

Yttrium

88.91

40

4

40

Zr

Zirconium

91.22

41

5

41

Nb

Niobium

92.91

42

6

42

Mo

Molybdenum

95.94

43

7

43

Tc

Technetium

(98)

44

8

44

Ru

Ruthenium

101.07

45

9

45

Rh

Rhodium

102.91

46

10

46

Pd

Palladium

106.42

47

11

47

Ag

Silver

107.87

48

12

48

Cd

Cadmium

112.41

49

13

49

In

Indium

114.82

50

14

50

Sn

Tin

118.71

51

15

51

Sb

Antimony

121.76

52

16

52

Te

Tellurium

127.60

53

17

53

I

Iodine

126.90

54

18

54

Xe

Xenon

131.29

55

1A

6

Cs

Cesium

132.91

56

2A

7

Ba

Barium

137.33

57

3

57

La

Lanthanum

138.91

72

4

72

Hf

Hafnium

178.49

73

5

73

Ta

Tantalum

180.95

74

6

74

W

Tungsten

183.84

75

7

75

Re

Rhenium

186.21

76

8

76

Os

Osmium

190.23

77

9

77

Ir

Iridium

192.22

78

10

78

Pt

Platinum

195.08

79

11

79

Au

Gold

196.97

80

12

80

Hg

Mercury

200.59

81

13

81

Tl

Thallium

204.38

82

14

82

Pb

Lead

207.2

83

15

83

Bi

Bismuth

208.98

84

16

84

Po

Polonium

(209)

85

17

85

At

Astatine

(210)

86

18

86

Rn

Radon

(222)

87

1A

7

Fr

Francium

(223)

88

2A

8

Ra

Radium

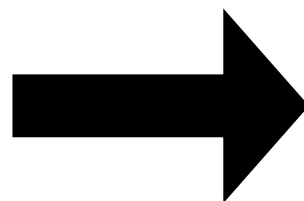
(226)

↑
(異なる)
元素

ホウ素
ベリリウム
リチウム
ヘリウム
水素

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

(異なる)
同位体



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

<http://nndc.lbl.gov>

↑
(異なる)
元素

ホウ素
ベリリウム
リチウム
ヘリウム
水素

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

→
(異なる)
同位体



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

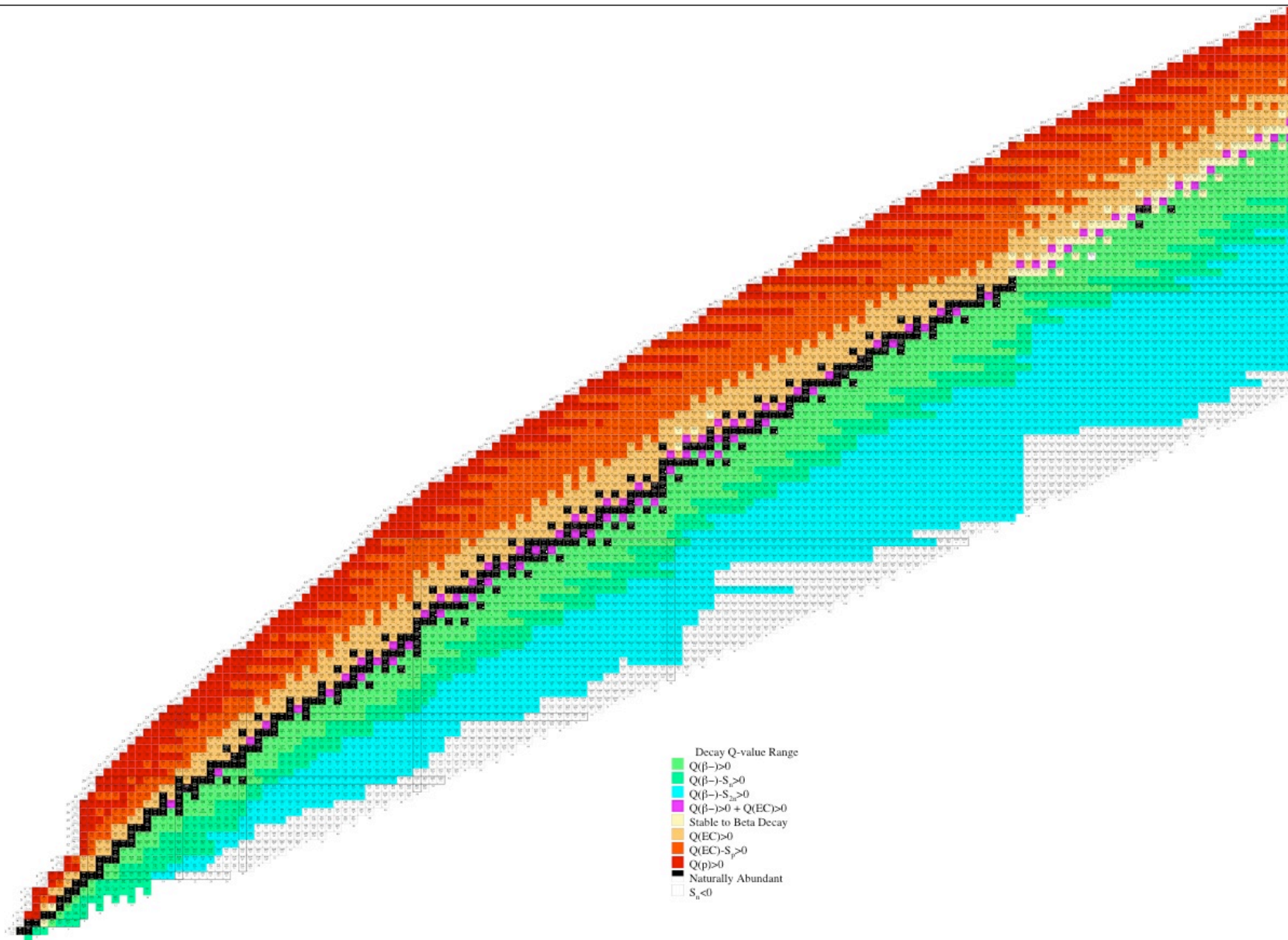
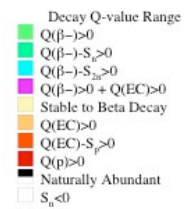
<http://nndc.lbl.gov>

↑
(異なる)
元素

(異なる)
同位体 →



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11



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

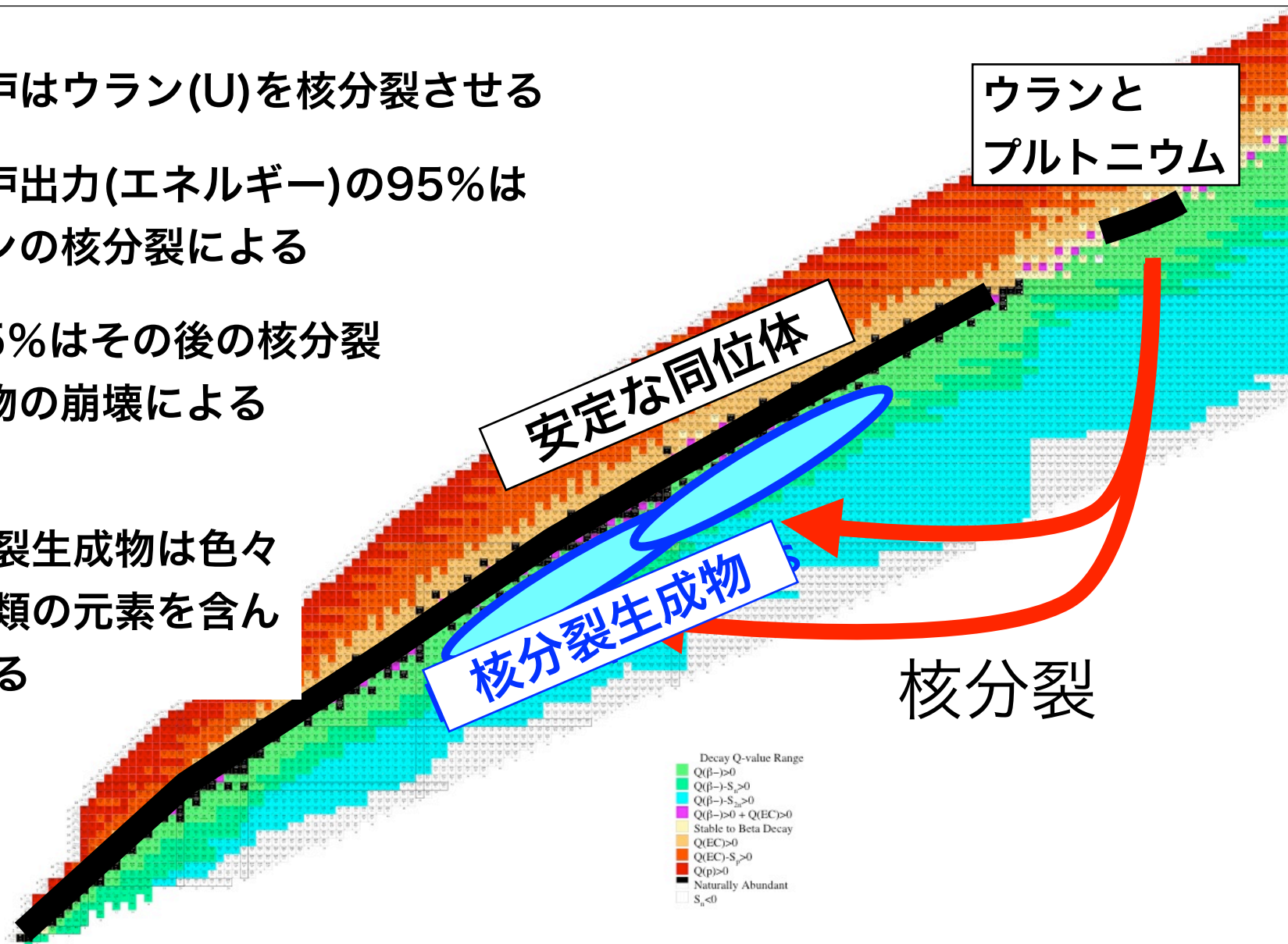
核分裂生成物は色々
な種類の元素を含ん
でいる

↑
(異なる)
元素

(異なる)
同位体 →



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11



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

マイナーアクチノイド

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

↑
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

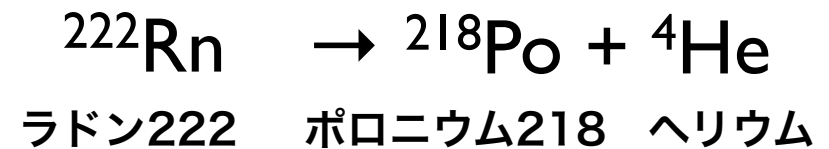
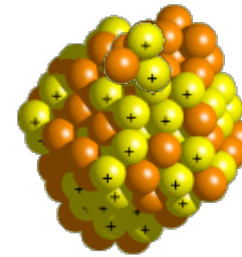
Decay Q-value Range
 $Q(\beta^-) > 0$
 $Q(\beta^-) - S_n > 0$
 $Q(\beta^-) - S_{2n} > 0$



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

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個を通り過ぎるごとに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個を通り過ぎるごとに1個影響を与える)



どのくらいのダメージ？



UCSB

Ben Monreal

- 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。

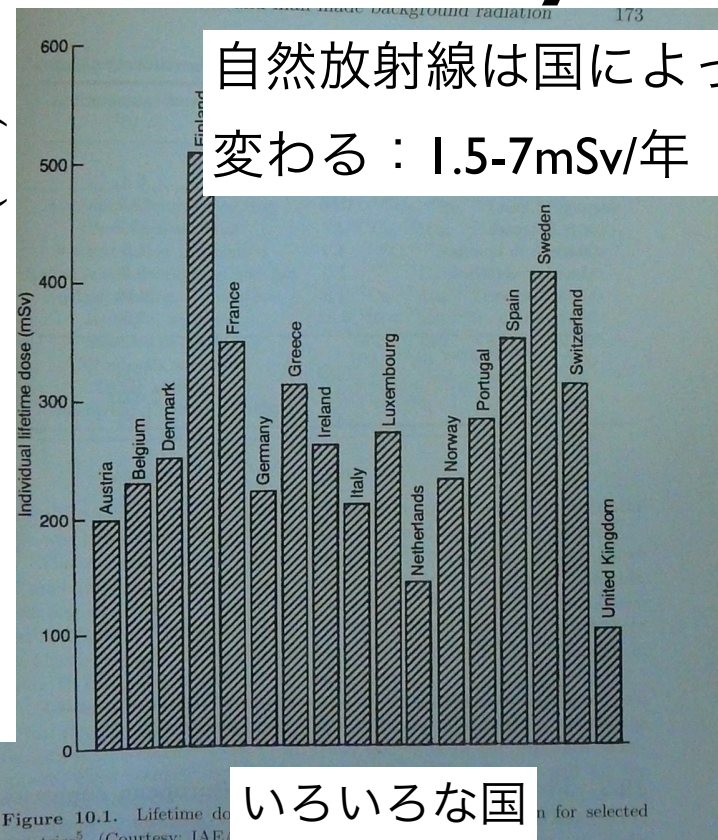
核分裂生成物に対しては、グレイ = シーベルト

(Gr, 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

一生に受ける放射線量(mSv)



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 ガン発生増加 (人)
白血病	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 じ程度のリスクで、避けた ほうがよいのは確か。。。	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



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

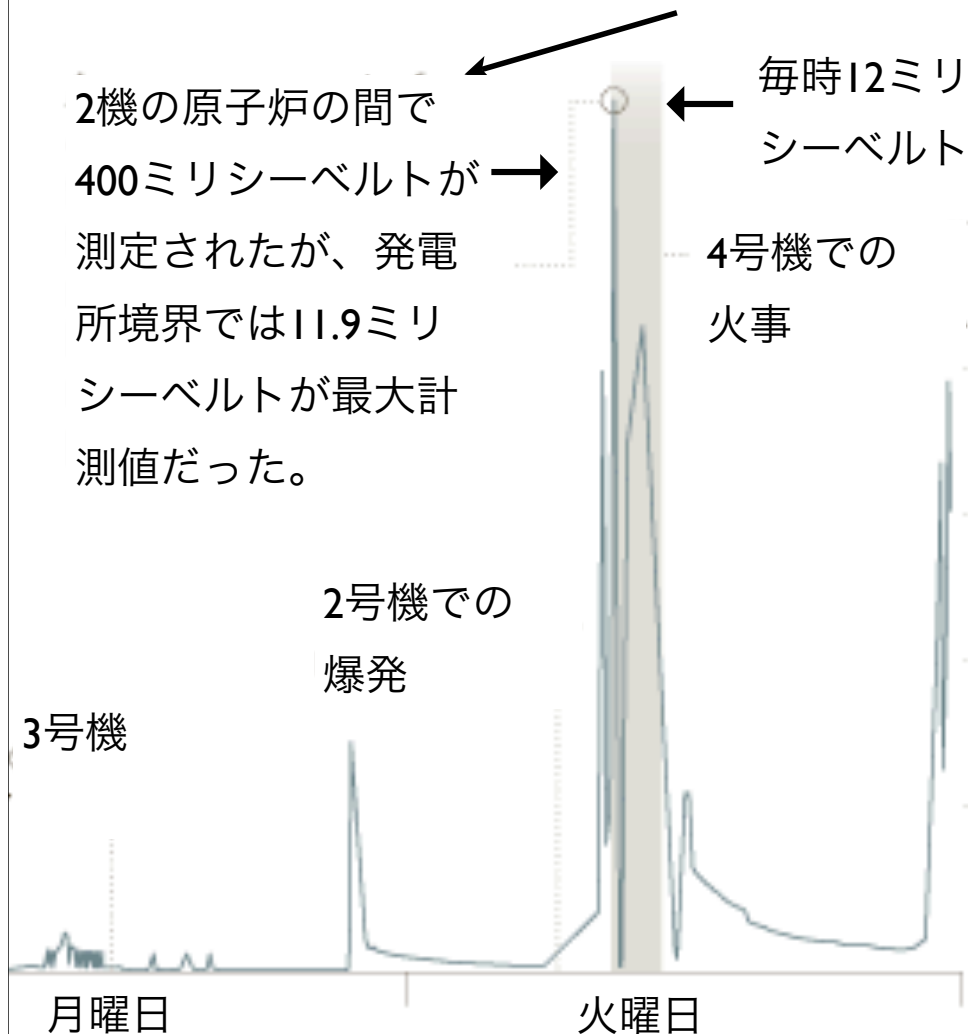
← $8000 \mu\text{Sv}/\text{時} = 8 \text{ mSv}/\text{時}$



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

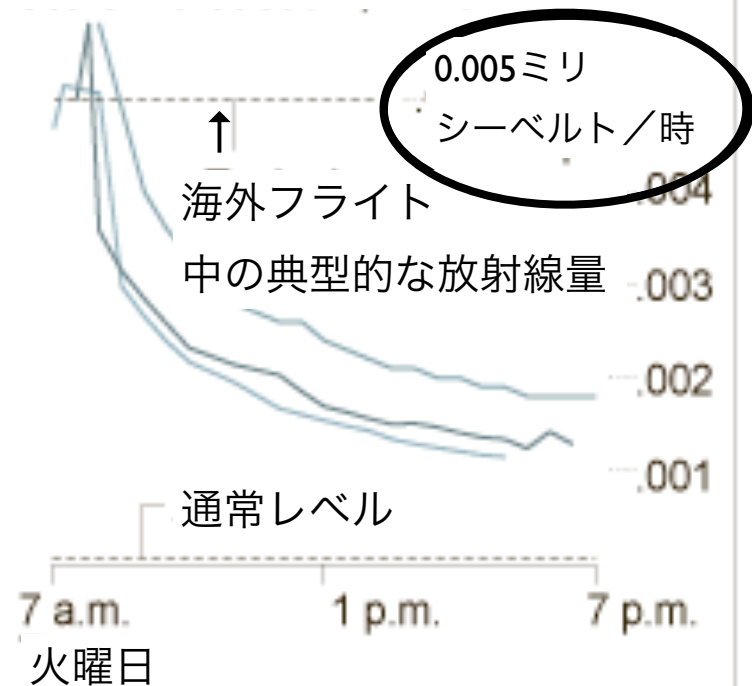
この記事が意味しているのは 「毎時」ミリシーベルト

NYTimes.com



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。



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

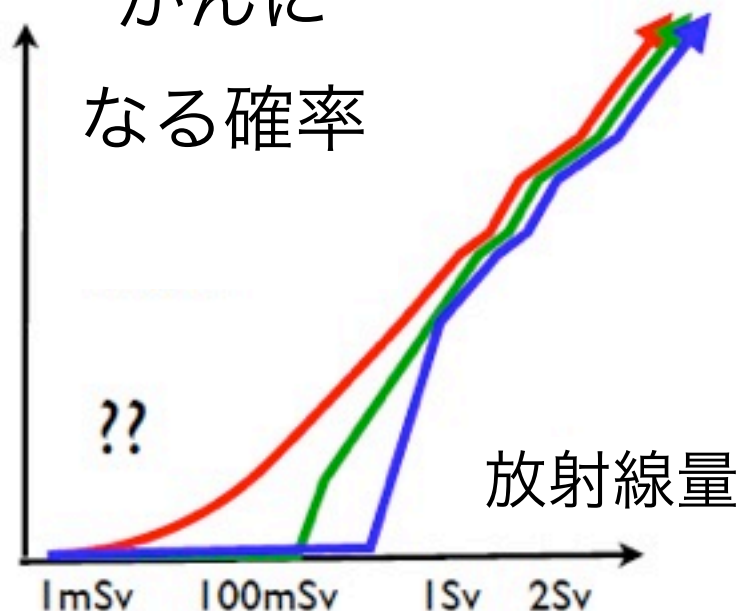
放射線量と危険度は比例するか

低量被曝の場合

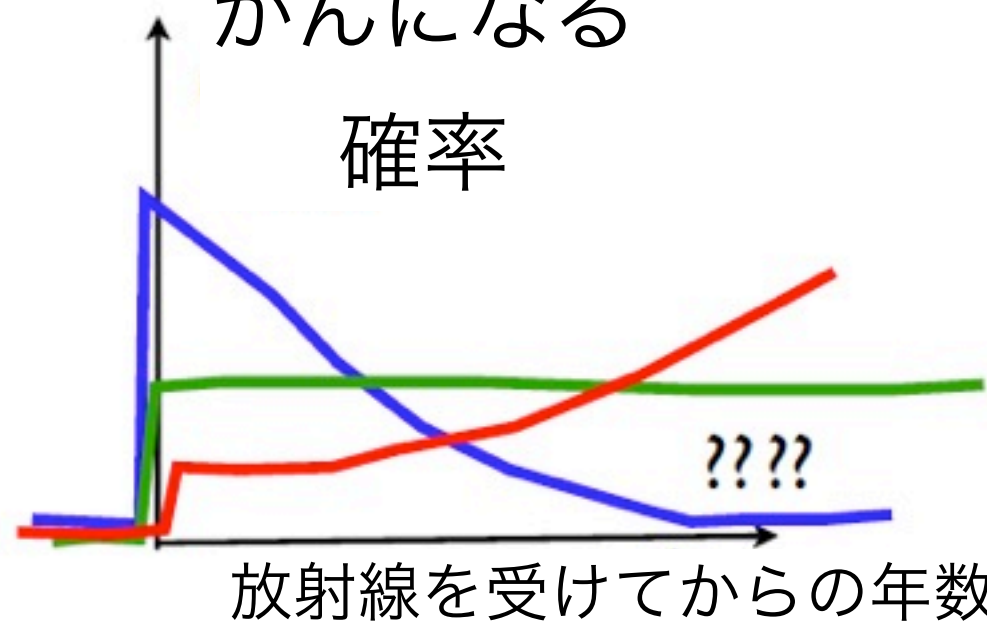
- 可能性はあるが、低量被曝による危険性の増加が検証できないためよくわからない。

(チェルノブイリの場所：100ミリシーベルトで甲状腺がん)

がんになる確率



がんになる確率



赤緑青は異なる発ガンモデル



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

"Health effects of low-level exposure to ionizing radiation", ed. Hendee & Edwards, IOP 1996

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)

Decay Q-value Range
Q β^- > 0
Q β^- > 1.5 MeV
Q β^- > 1.5 MeV
Q β^- > 0 + Q $\beta^+\beta^-$ > 0
Stable to Beta Decay
Q $\beta^+\beta^-$ > 0
Q $\beta^+\beta^-$ > 0
Q $\beta^+\beta^-$ > 0
Normally Abundant
S < 0



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

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*

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.

UCSB Ben Monreal, UCSB Physics 3/11
Copyright © 2008 California Department of Education

The periodic table is color-coded into several regions: Group 1A is yellow; Groups 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A, and 8A are yellow; Groups 3B, 4B, 5B, 6B, 7B, 8, 9, 10, 11, and 12 are cyan; Groups 13, 14, 15, 16, and 17 are pink; and Groups 18 are yellow. A key for element notation is provided: Atomic number (11), Element symbol (Na), Element name (Sodium), and Average atomic mass* (22.99). The table is annotated with handwritten Japanese text and colored circles: '水に溶けるもの' (Water-soluble things) is written vertically next to Group 1A; '気体' (Gas) is written horizontally above Groups 13-17; '不活性金属' (Inert metals) is written horizontally below Groups 1-12. A blue circle highlights Group 1A, a yellow circle highlights Groups 13-17, and a blue circle highlights Groups 1-12. A red circle highlights the transition metal block (Groups 3-10). A green circle highlights the lanthanide and actinide series. A black triangle points to the lanthanide series.

Key:

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

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

UCSB Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

Copyright © 2008 California Department of Education

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

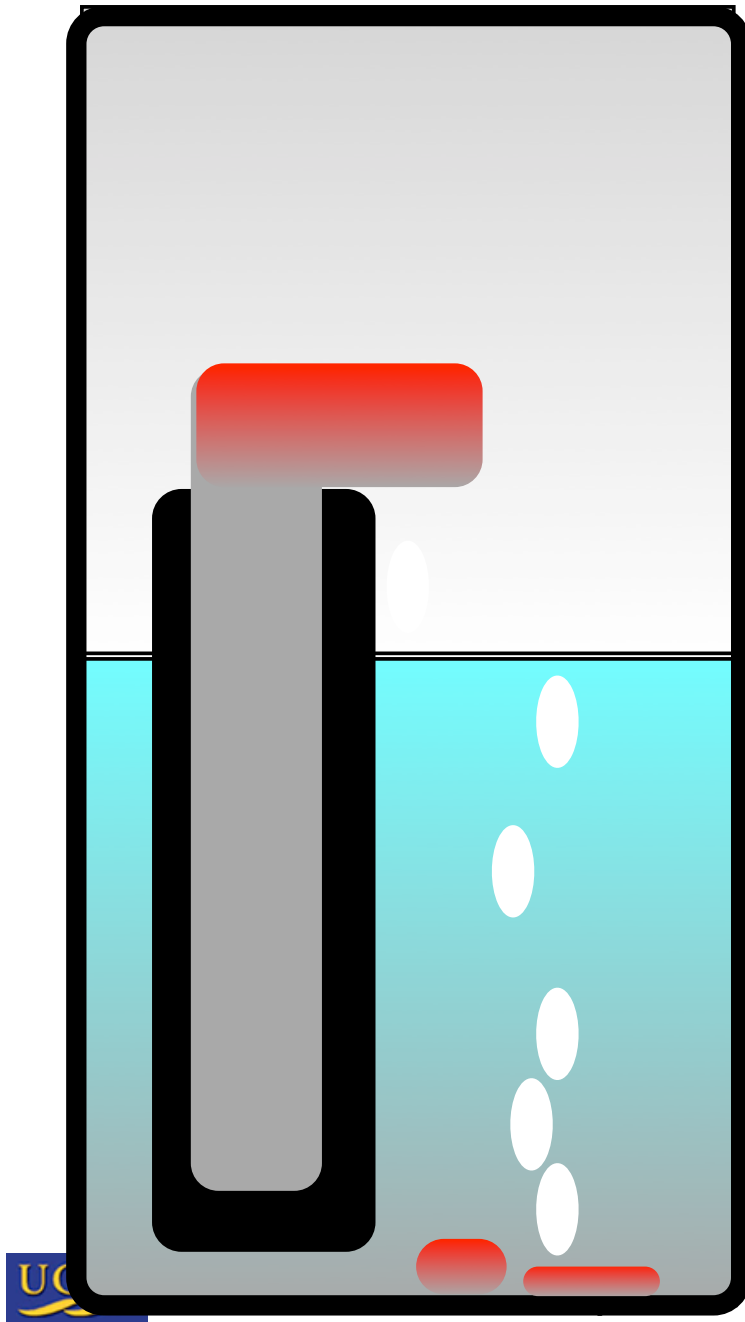
放射化物

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

実質的にはになし

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

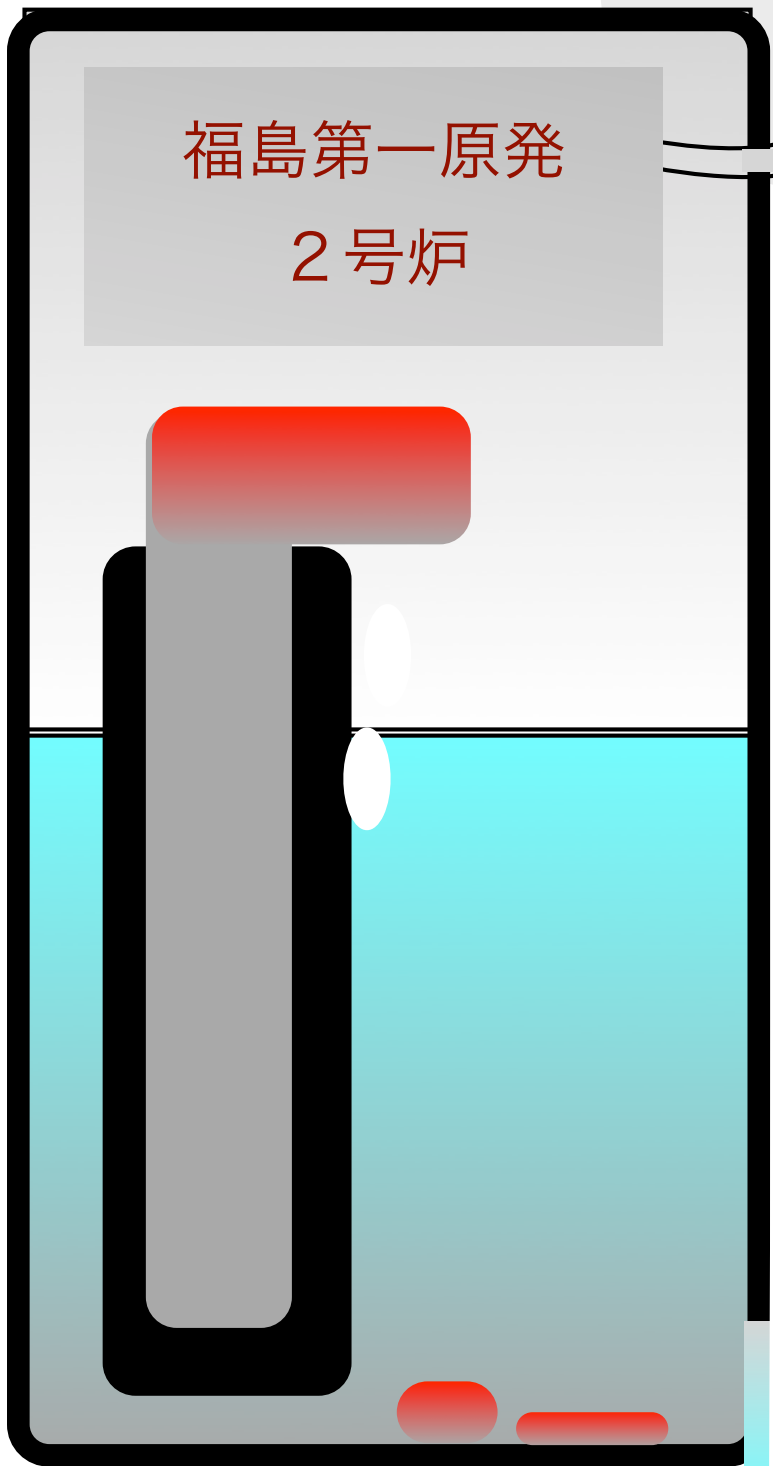
核分裂生成物 (セシウム, ヨウ素, テクネチウムなど)

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



福島第一原発
2号炉

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 + 核反応生成物 + アクチノイド

冷却水中

核反応生成物 セシウム, ヨウ素, テクネチウムなど

蒸気中

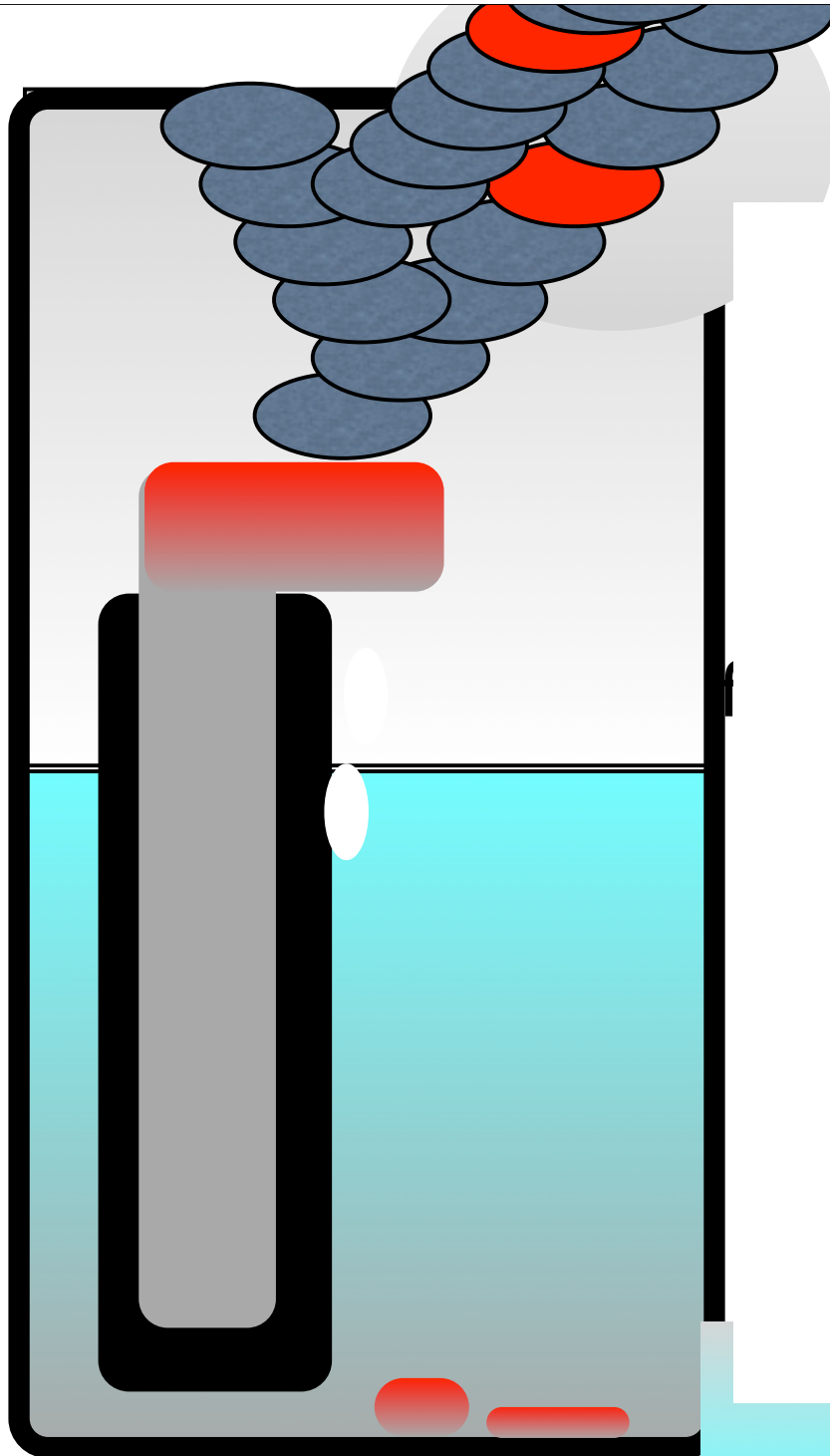
核反応生成物 キセノン, クリプトン, ラドン など

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＋核反応生成物＋アクチノイド

環境中

核燃料＋核反応生成物＋アクチノイド

福島原発の使用燃料の貯蔵プール

ではたしてこの事象が発生したか？

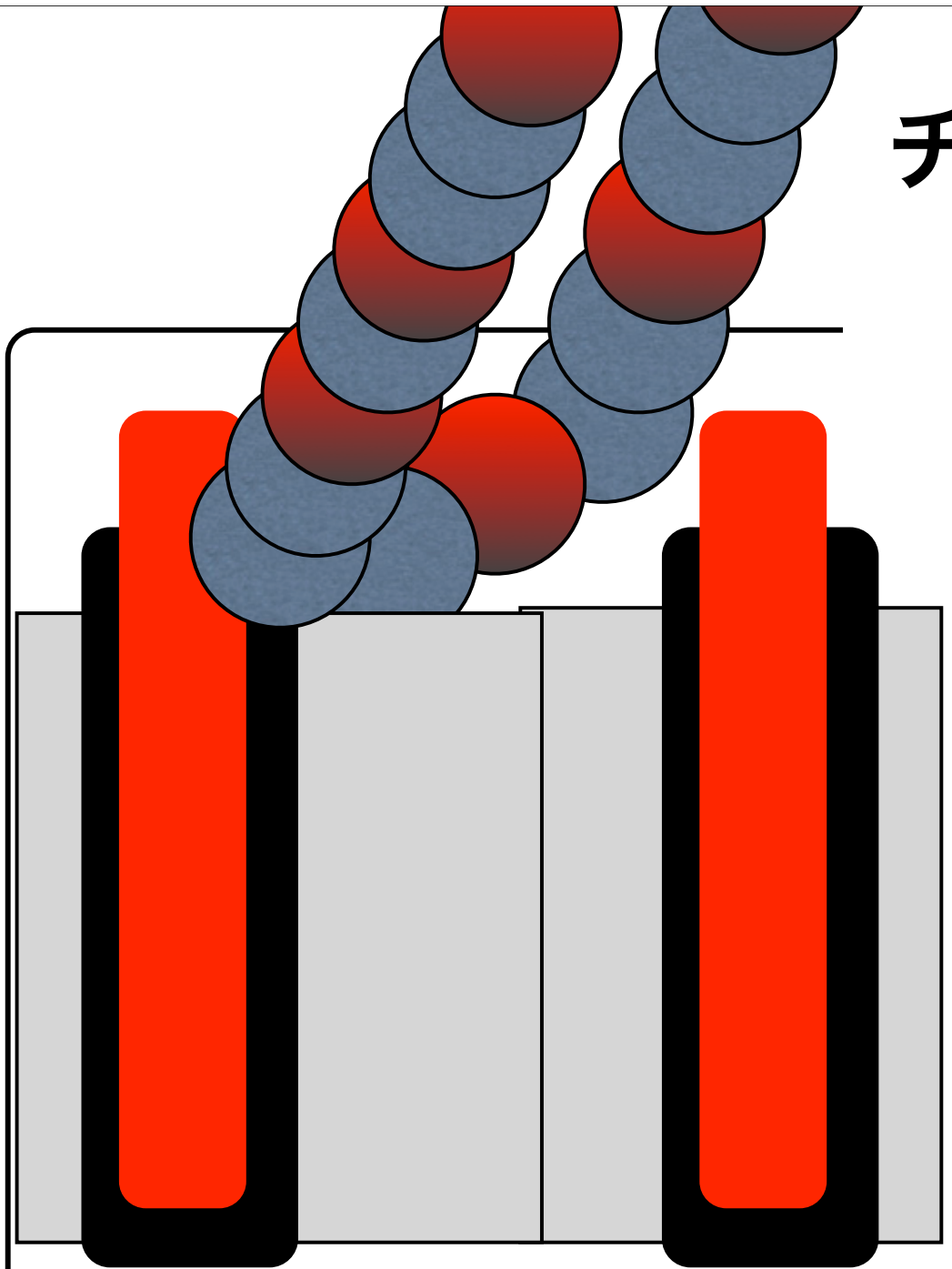
(報道にばらつき有り)

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

<http://mitnse.com>

チェルノブイリ事故 の場合



実質的に格納容器がない

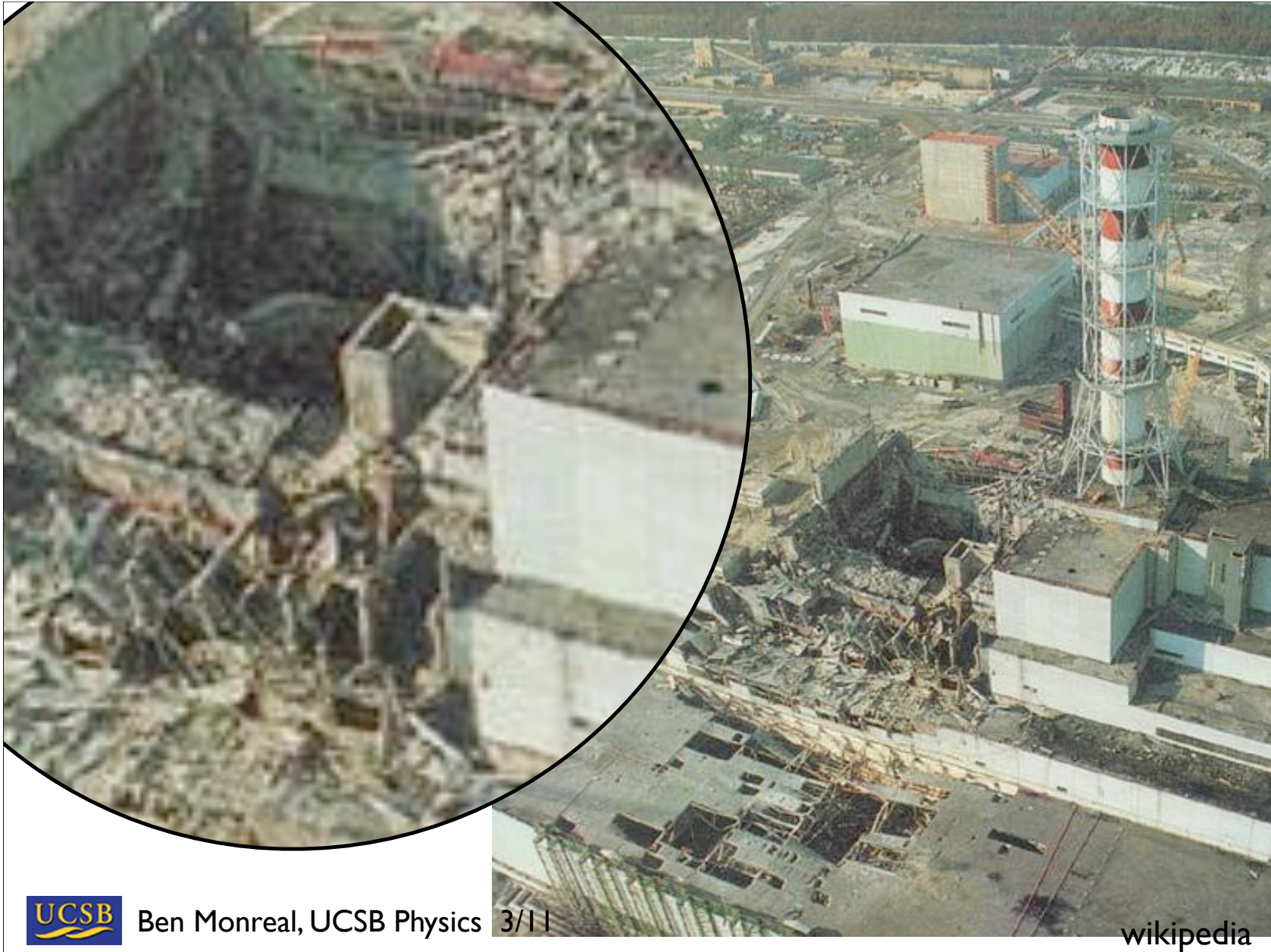
炉心に黒鉛

(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)

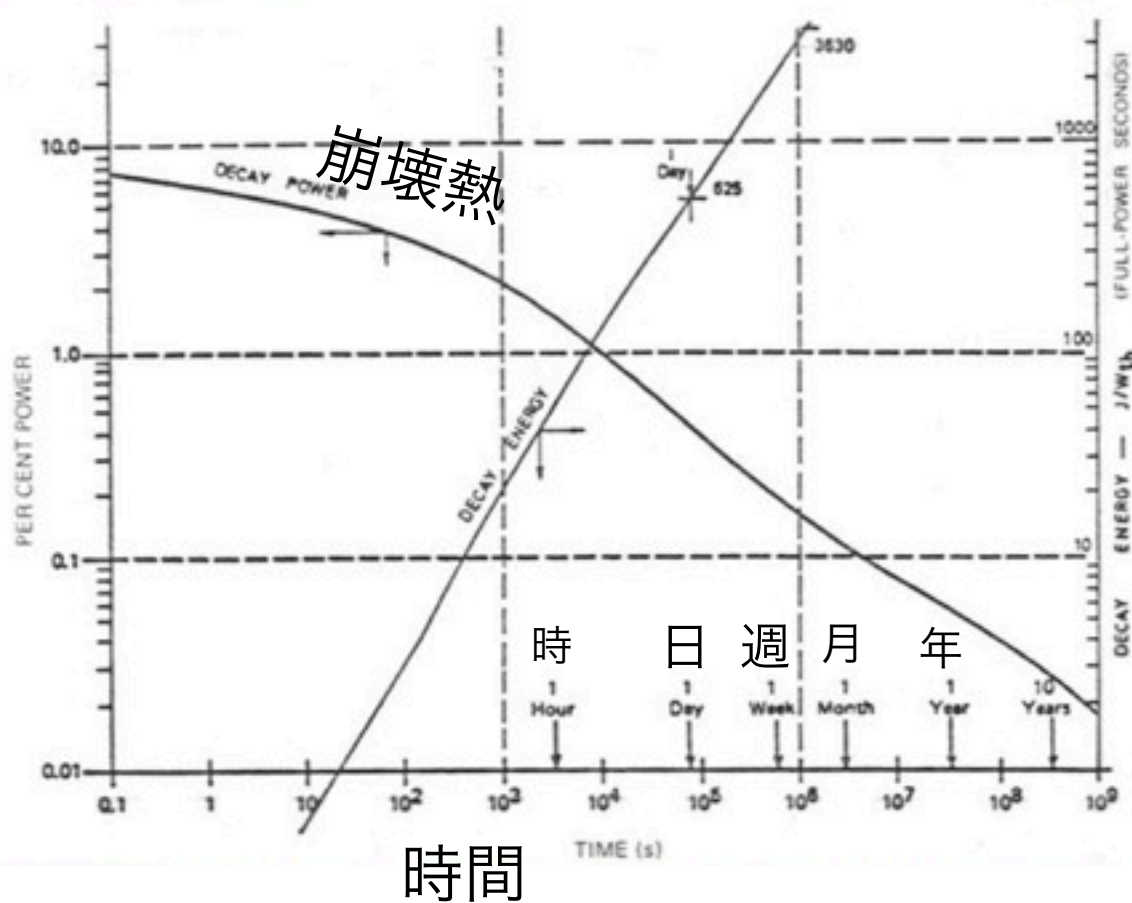
事故時のチェルノブイリ発電所



Ben Monreal, UCSB Physics 3/11

wikipedia

福島での不幸中の幸い



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

- 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

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 9 5	60 日
モリブデン 9 9	3 日
ルテニウム 1 0 3	40 日
セリウム 1 4 1	30 日
バリウム 1 4 0	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 6 0 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 1 0 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抑圧と恐怖であった。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：福島原発の放射能災害は最悪の場合でもコントロール可能であり局所的(初期避難と食品中のヨウ素 ^{131}I 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。