

東電福島事故の避難の リスク・便益分析と 安全・規制・防災の課題

岡 芳明

東京大学名誉教授
前・内閣府原子力委員会委員長

本資料は講演者が過去に所属した組織と、キヤノングローバル戦略研究所の考え方を表すものではありません。

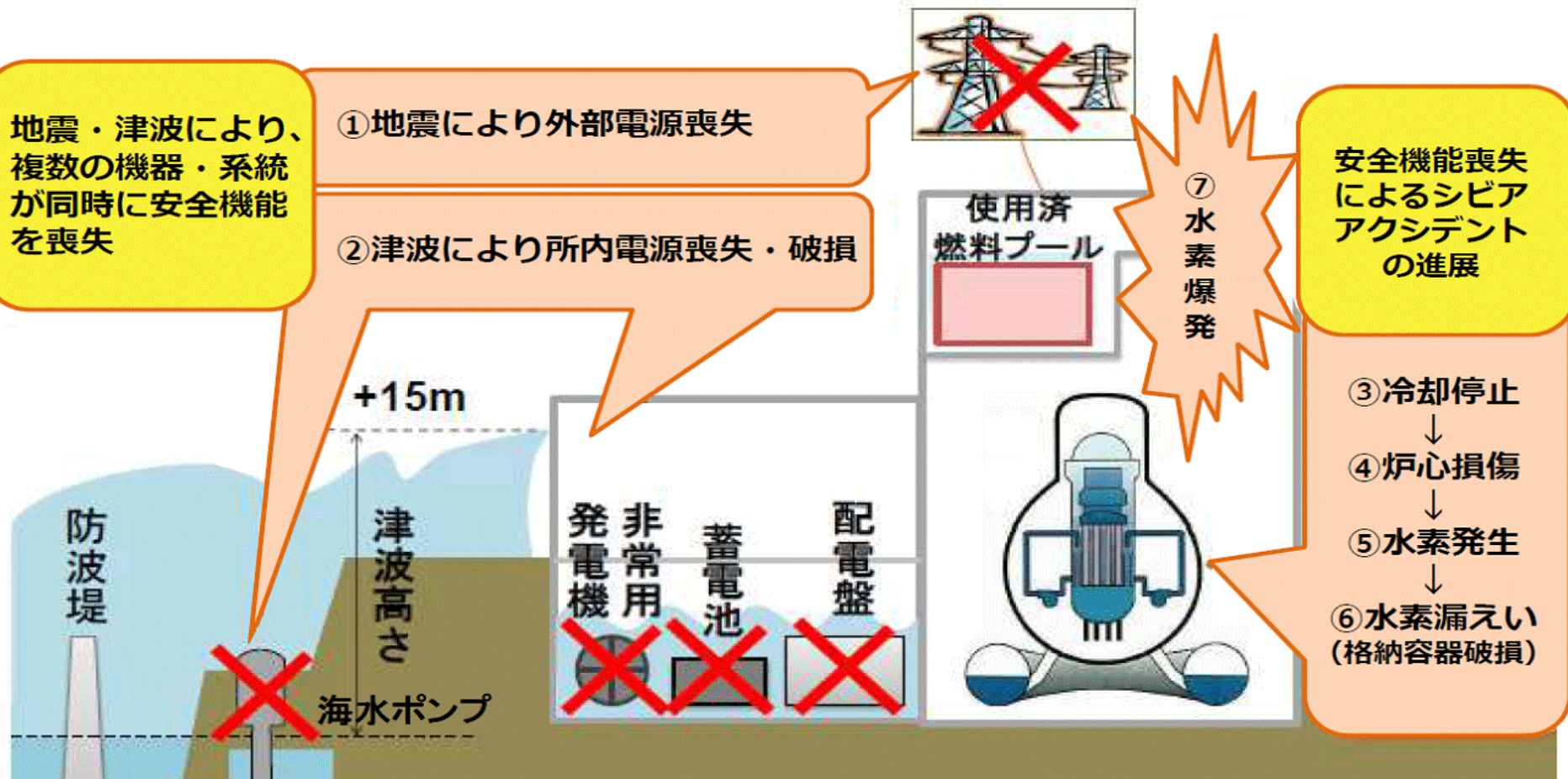
目次

- 東電福島原発事故と新規制基準
- 放射線被ばく の健康影響
- 東電福島事故の避難のリスク・便益分析
- 東電福島事故の原子力防災と危機管理の教訓
- 日本の原子力安全・規制・防災にリスク・ベネフィットの考え方が必要
- 原子力安全は、近年はテロ・津波・防災等との境界分野が重要になっている

東電福島第一原発事故と 新規制基準

東電福島第一原発事故の進展

- 福島第一原発事故では地震や津波により、複数の機器・システムが同時に安全機能を喪失
- さらに、その後のシビアアクシデントの進展を食い止めることができなかった



出典：「実用発電用原子炉に係る新規規制基準について—概要—」5頁、原子力規制委員会、2016年2月17日更新

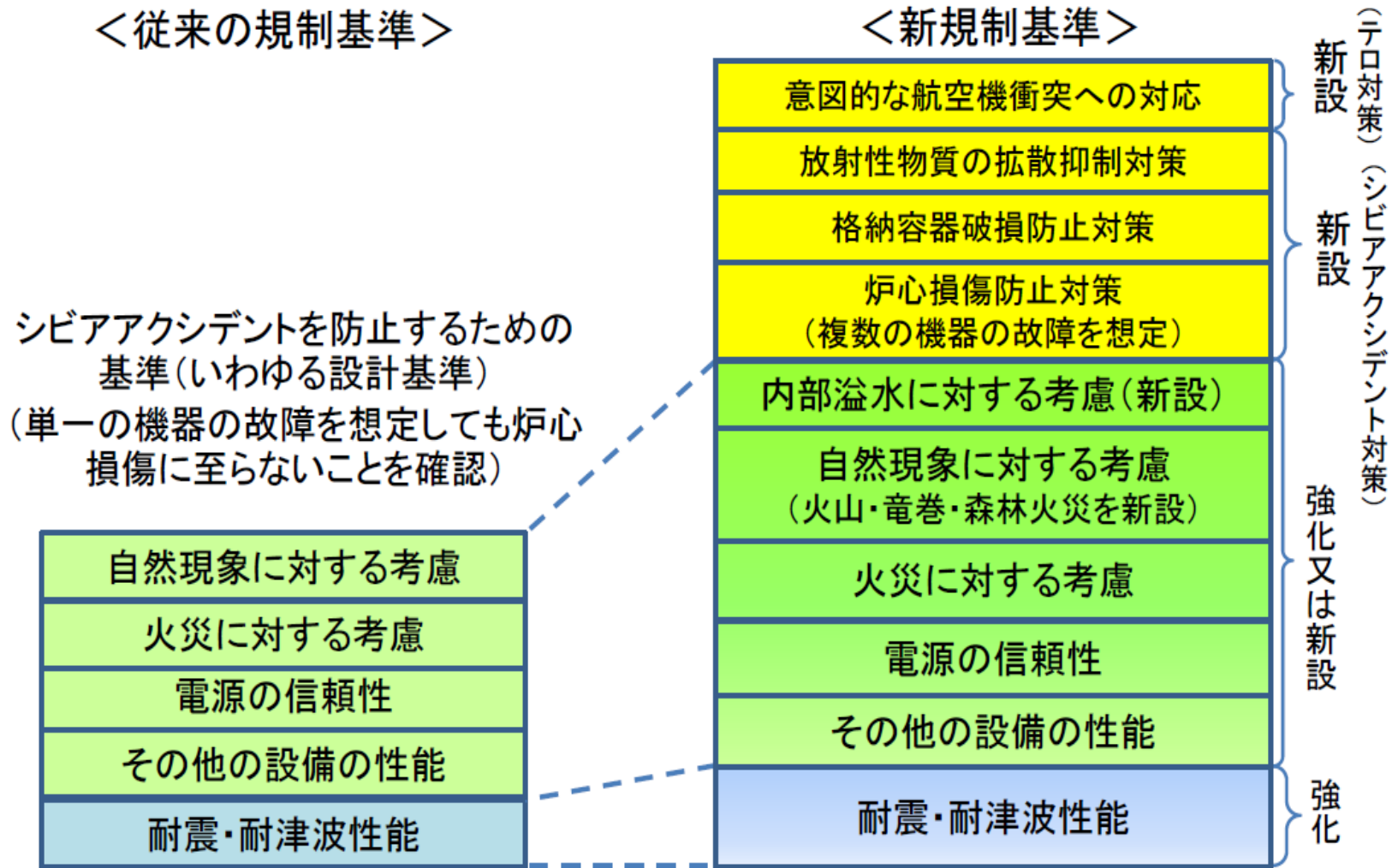
東日本大震災と東電福島第一原子力発電所事故

- 2011年3月11日に東日本大震災が発生し、大津波が東北地方太平洋岸を襲った
- 東電福島第一原発は、地震で自動停止したが、約1時間後に襲来した津波によって、1, 2, 3号機が緊急炉心冷却のための電源をすべて失い、炉心が溶融した。
- 高温となった燃料棒の金属と水との反応で水素が発生し、1, 3号機の建屋が爆発した。3号機の水素が排気系配管を通じて流入し、運転停止中だった4号機の建屋も爆発した。2号機は建屋のパネルが1号機の爆発の振動で開いたため、水素が建屋外に逃げて爆発せず。
- 事故後、原子力規制委員会は新規制基準を作り炉心溶融事故対策等を強化した

東電福島第一以外の発電所

- 東電福島第2発電所は、外部電源等が利用可能で、炉心冷却ができ、海水ポンプを復旧し放熱もできたので、炉心溶融事故にならなかった。津波高さも第1に比べて低かった。
- 東北電力女川発電所は、敷地が高かったため、浸水せず、避難してきた女川町の住民をかくまった。
- 日本原子力発電の東海第2発電所は、茨城県の津波評価を参考に、浸水防護壁を設置していたため、安全に停止した。

従来の規制基準と新規規制基準の比較



(出典) 原子力規制委員会 「実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規規制基準について(概要)」 (2016年)

放射線被ばくの 健康影響

- ▶ 放射線を受けた後にどのような健康影響が生じるか、受けた放射線の量、受けた場所（全身、局所）、時間的経過を考慮する

確定的影響 (組織反応)

(しきい値がある)

急性障害

数週間以内に症状が出る
(分裂が盛んな細胞が障害を受ける)

胎児発生障害

晩発障害

数か月～数年以上の経過後に
症状が出る

遺伝的障害

通常 of 遺伝性疾患の発生頻度
の増加

急性放射線症候群

皮膚紅斑
脱毛
等

胚/胎児の障害
精神遅滞
等

白内障
緑内障

白血病
がん

骨髄障害
胃腸管障害
中枢神経障害

確率的影響

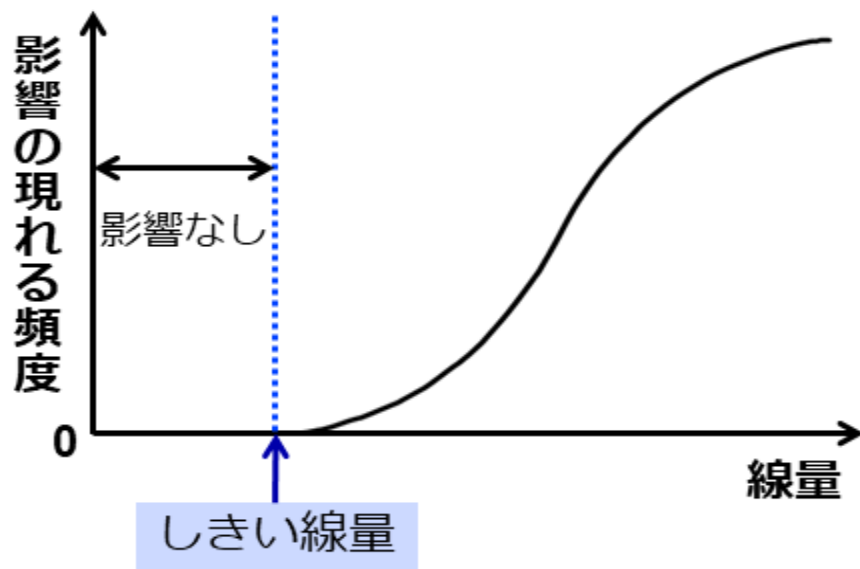
(しきい値がないと仮定)

確定的影響（組織反応）

（脱毛・白内障・皮膚障害等）

同じ線量を多数の人が被ばくしたとき、
全体の1%の人に症状が現れる線量を
「しきい線量」としている。

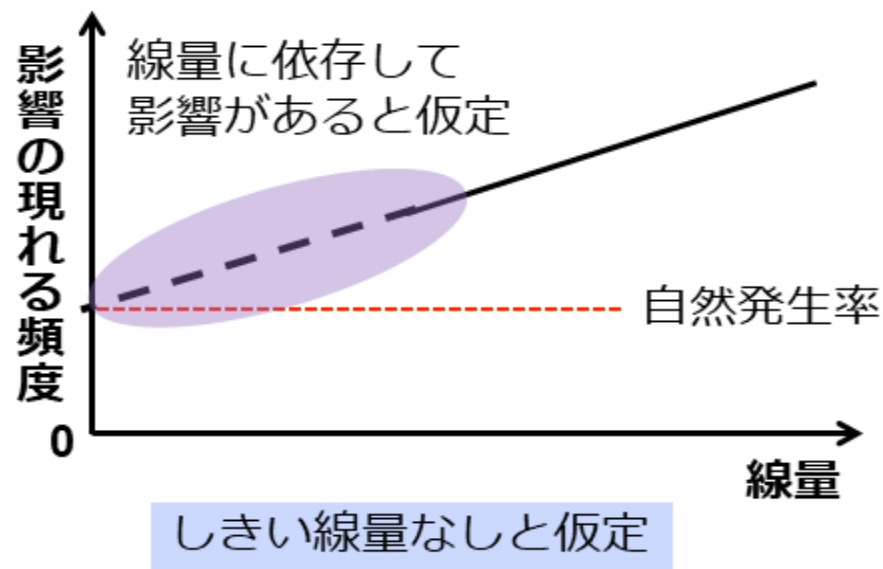
（国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告）



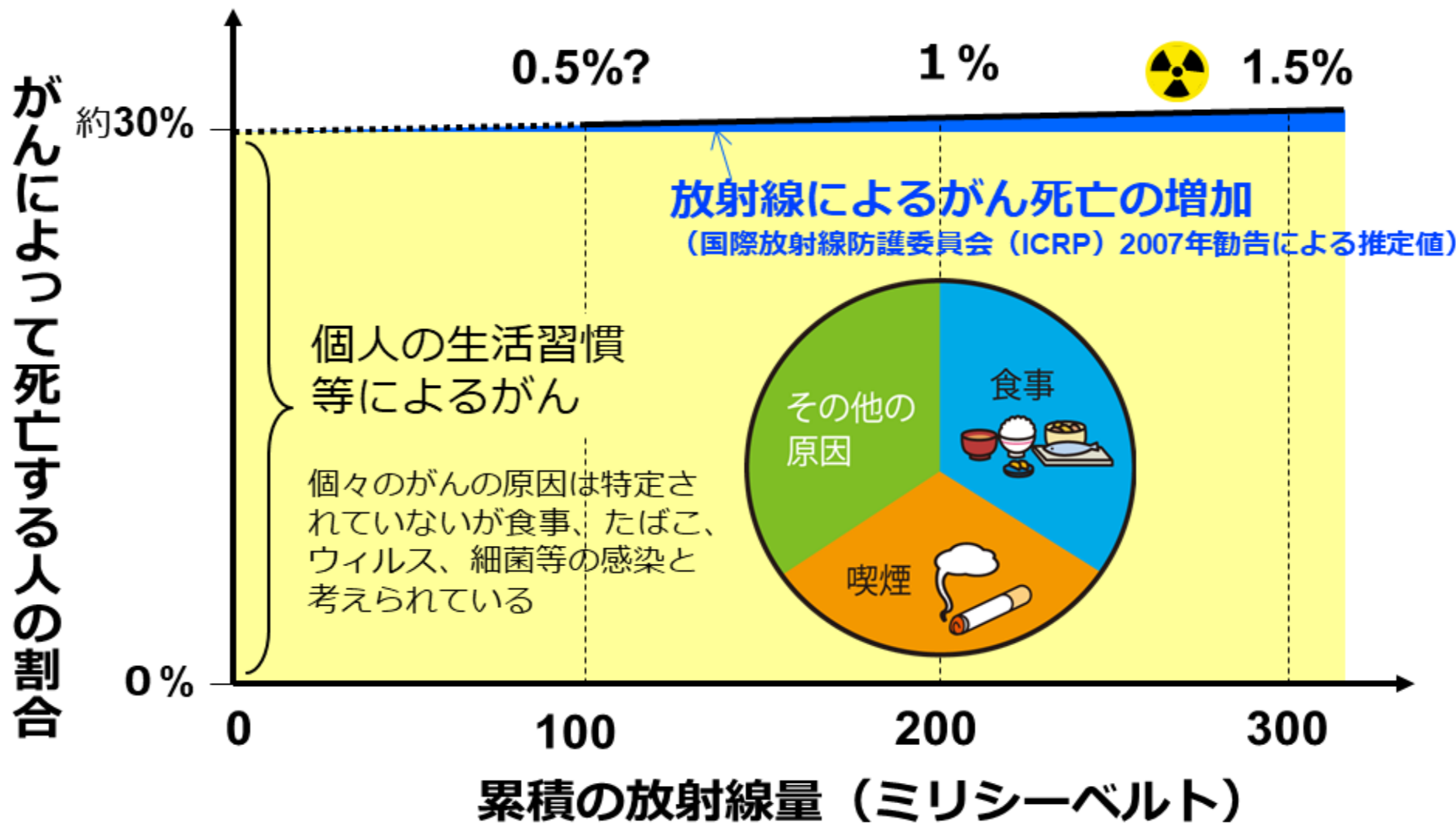
確率的影響

（がん・白血病・遺伝性影響等）

一定の線量以下では、喫煙や飲酒と
いった他の発がん影響が大きすぎて見
えないが、ICRP等ではそれ以下の線
量でも影響はあると仮定して、放射線
防護の基準を定めることとしている。



低線量率被ばくによるがん死亡リスク



放射線被ばくの健康影響（まとめ1）

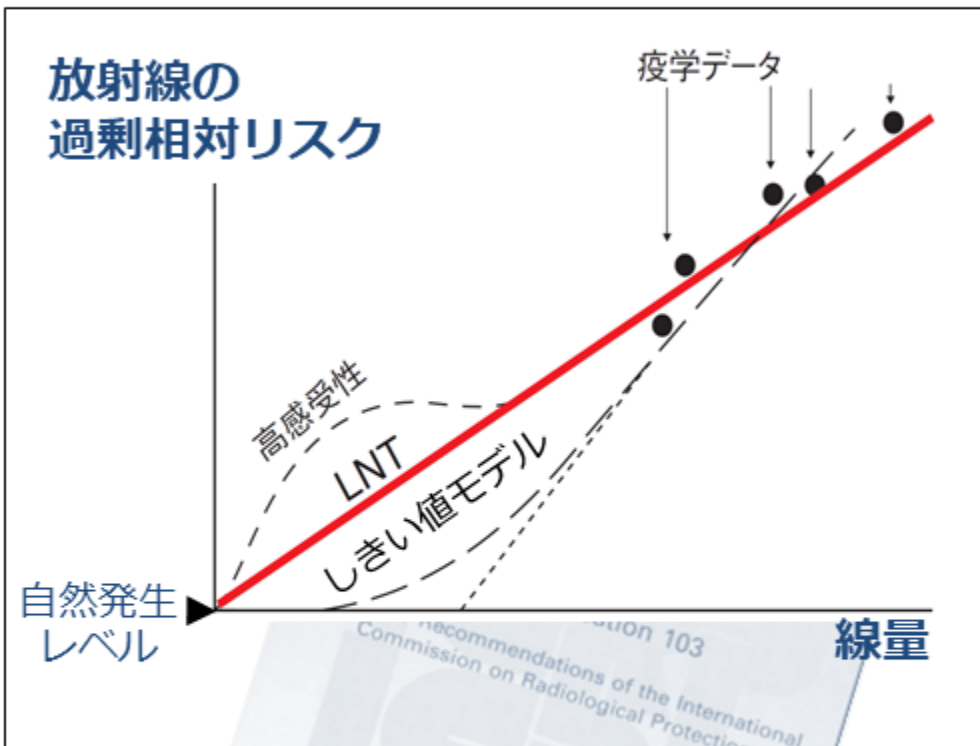
- 確定的影響と確率的影響がある（人間では遺伝的影響は観測されていない）。
- 確定的影響は、被爆後すぐに発症する。被ばく量が多いために生じ、少ないと発症しない。しきい線量が1000ミリグレイ（胎児は100ミリグレイ）以上の被ばくで観測される。グレイは吸収線量の単位、シーベルトは健康影響の単位。
- 確率的影響は、白血病やがんなどで、被爆後、数か月から発症する晩発性である。
- 確率的影響は、広島・長崎の原爆被爆者の発がんを、被ばくしてはいない集団と比べ、統計的に有意な結果を得るには、母集団の数が多くなることがある。
- 東電福島事故の公衆の被ばくは、線量が低いので、確定的影響はない。確率的影響が考慮の対象。

◎支持：

全米科学アカデミー（2006）
放射線被ばくには「これ以下なら安全」と言える量はない

◎批判的：

フランス医学・科学アカデミー（2005）
一定の線量より低い放射線被ばくでは、がん、白血病等は実際には生じず、LNTモデルは現実に合わない過大評価

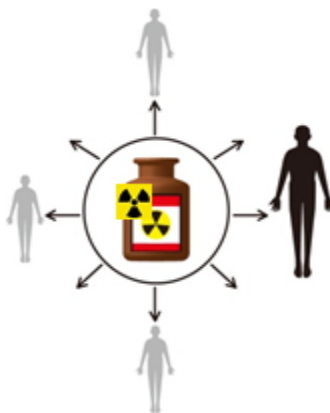


⇒ **国際放射線防護委員会（ICRP）** は、**放射線防護**の目的上、**単純かつ合理的な仮定**として、**直線しきい値なし（LNT）モデル**を採用

防護の最適化

個人の被ばく線量や人数を、
経済的及び社会的要因を考慮に入れた上、
合理的に達成できる限り低く保つことである。

この原則を**ALARA** (**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable)
アララの原則という



- ・線量拘束値
- ・参考レベル

出典：ICRP Publication 103「国際放射線防護委員会の2007年勧告」The International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)、2007より作成

放射線被ばくの健康影響（まとめ2）

- 低線量（年100ミリシーベルト以下）では確率的影響は不明確だが、国際放射線防護委員会は敷衍なくし直線仮説（LNTモデル）を採用して、低線量被ばくを合理的に下げること（ALARA、As low as reasonably achievableの考え方）を提案し、各国が規制に採用している。
- 疫学は、薬の治験などにも使われるが、統計であって、重力の法則のような自然の規範に基づく科学ではない。低線量では正否は不明である¹。薬の治験では効果がないと（正否不明だと）、効果がある薬とは認められない。
- 曝露の効果が統計的に有意でないのに、LNTモデルを使っているのは、放射線被ばくだけでは？
- ALARAは考え方（ポリシー）²で科学的事実ではない。不都合があれば修正すべき。

1. M. A. Kamrin, The “Low Dose” Hypothesis: Validity and Implications for Human Risk, International Journal of Toxicology, January 2007

2. 長瀧重信：サイエンス（科学的事実）とポリシー（対処の考え方）の区別、首相官邸、平成23年9月29日

東電福島事故からの避難の リスク・便益分析

東電福島事故の健康影響

- 短期的には確定的健康影響は確認されていない。
- 線量が健康影響のしきい値をはるかに下回るレベルであったため、長期的にも健康影響は予測されていない。

(東電事故の放射線による死亡者はゼロ)

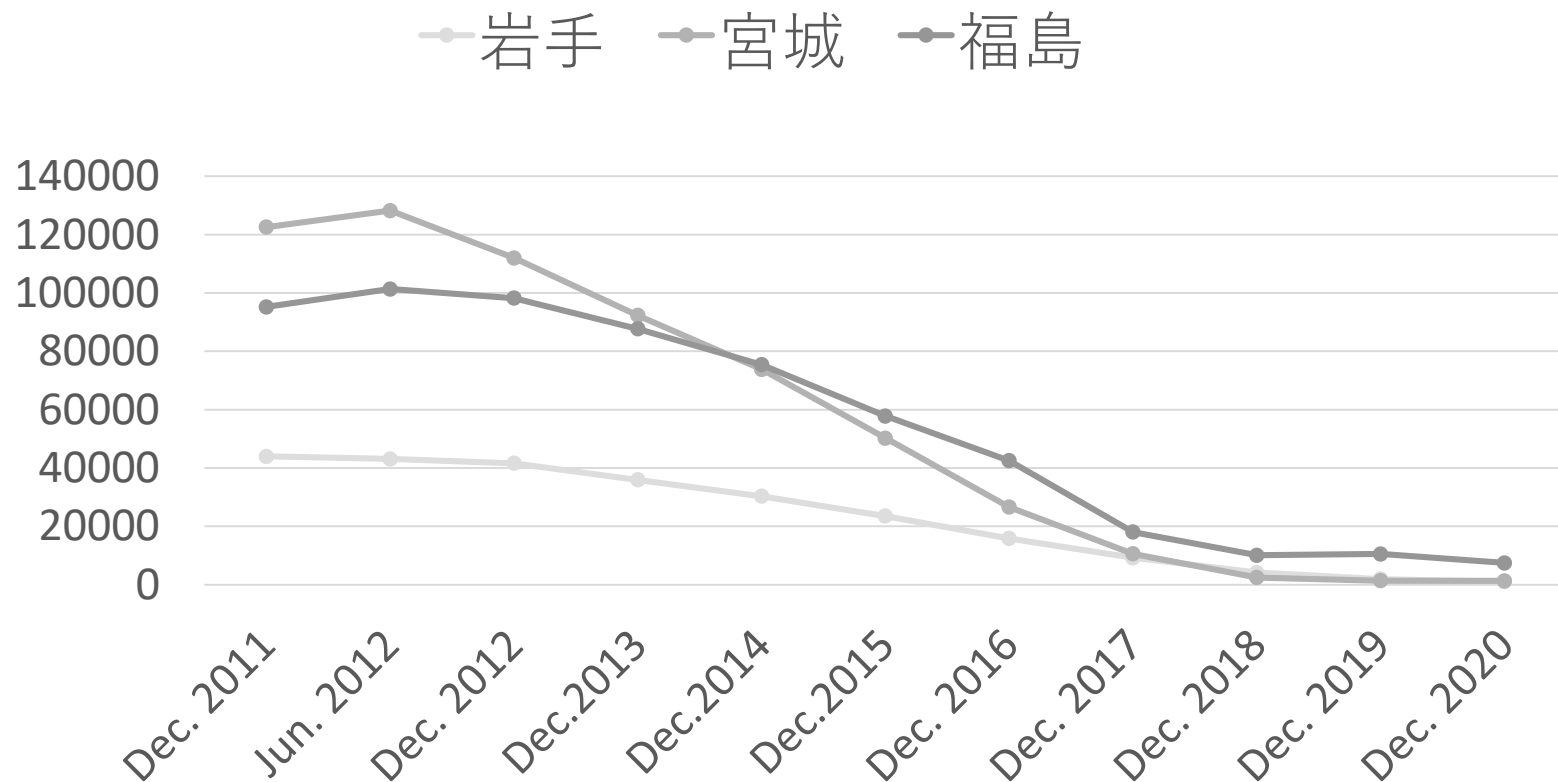
- 事故の最も重大かつ顕著な健康影響は精神衛生や社会福祉に関するものであったと考えられる。
- この側面は、数千人*の人々が避難により元の環境から引き離され、慣れない環境に移住したことによる甚大な影響、および放射線被ばくに関連する恐怖や屈辱感などによって深刻化した。
- 事故による健康影響の全容を理解することは（UNSCEARの使命の範囲外であるが）本委員会の見解の重要な背景となる。

出典：UNSCEAR 2013

UNSCEAR：United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,
(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)

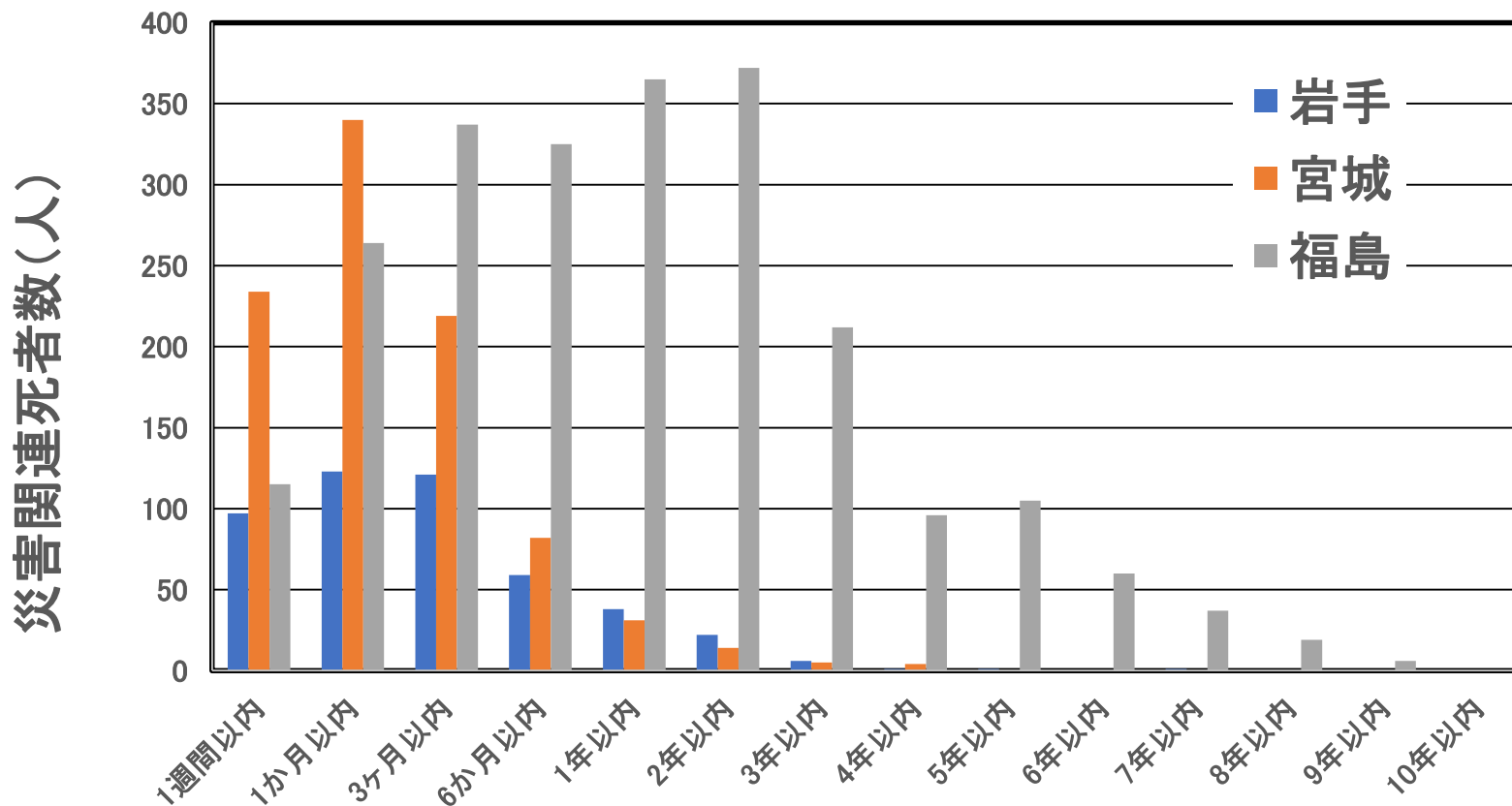
*避難者数は数千人ではなく約10万人（避難指示の出た市町村で）
放射線による健康被害が観測されないことはUNSCEAR2020でも同じ

東日本大震災による避難者数の推移 福島県の避難が長期化した



出典：避難者数の推移（都道府県別）、復興庁 2020年12月

東日本大震災における災害関連死の推移 福島県の災害関連死者は事故後1か月以降増加



東日本大震災からの経過期間

出典：「東日本大震災における災害関連死推移」復興庁 令和2年12月25日

災害関連死とは？

- 当該災害による負傷の悪化又は避難生活等における身体的負担による疾病により死亡し、災害弔慰金の支給等に関する法律に基づき災害が原因で死亡したものと認められたもの
- **1995**年に発生した阪神淡路大震災以降、制度化され、統計データが存在する。日本特有の制度
- 米国では、ハリケーンからの大規模避難が行われることがあるが、災害関連死のデータがあるものは稀である。
- 災害関連死のデータがあったので、避難のリスクベネフィット分析が可能だった。

年齢別災害関連死者数(東日本大震災) 災害関連死者は高齢者が多い

都道府県	20歳以下	21-65歳	66歳以上	合計
岩手	1	64	404	469
宮城	2	118	809	929
福島	3	231	2079	2313
全国	9	423	3335	3767

出典：東日本大震災における震災関連死の死者数（令和2年9月30日現在調査結果）令和2年12月25日 復興庁

避難指示市町村の災害関連死者数 事故後一年目以降が多い

	2020年9月30日まで	2012年3月31日まで	差
田村市	14	1	13
川内村	128	27	101
檜葉町	140	33	107
葛尾村	42	9	33
南相馬市	517	282	235
飯舘村	42	35	7
川俣町	29	0	29
浪江町	440	91	349
富岡町	450	76	374
大熊町	128	38	90
双葉町	154	38	116
合計	2084	630	1454

復興庁「災害関連死の死者数等について」をもとに作成

出典：<https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat2/sub-cat2-6/20140526131634.html>

注：広野町は2011年9月末に避難解除されたので表から除外した。

リスク・ベネフィット分析とは？

- 技術は便益があるから利用される（便益がなければ禁止すればよい）
- 技術の利用にはリスクが伴う
- 便益がリスクを上回る場合、その技術を利用できる
- 原子力法的前提に、リスク・ベネフィットの考え方が¹
- リスクはコストで表すことが出来る（例えば、生命保険の死亡賠償額）ので、コスト・ベネフィット分析とも言う

¹ : C. Stoiber, A. Baer, N. Pelzer and W. Tonhauser, “Handbook on Nuclear Law”, July 2003, IAEA pp.3

避難によって避けた放射線量

- 事故後の空間線量率測定値から推定できる。
- 航空機サーベイ、モニタリングポスト、走行サーベイのデータがある。
- 走行サーベイのデータ（**11市町村の172地点**）¹と、空間線量率の減衰²から、市町村ごとに避難期間中の集積線量を求めた。

1: 文部科学省「継続して実測している地点における平成23年3月11日から平成24年3月11日までの積算線量の推計値の公表について」平成24年3月21日

2: 木名瀬 栄「空間線量率分布の予測モデルの開発、実測データとの比較及び検証、Part 2」

避難によって避けた集積線量

(各市町村での測定値から推定した集積線量の平均値、mSv)

	最初の1年間	避難期間中
田村市	3.3	5.78
川内町	8.65	15.85
檜葉町	9.1	17.9
葛尾村	26.3	53.6
南相馬市	16.2	63
飯館村	31	120.4
川俣町	15.4	50.9
浪江町	104.4	355.8
富岡町	43.4	165.2
大熊町	158.2	538.2
双葉町	75.1	254.8
大熊町 >5km	38.8	132
双葉町 >5km	73.9	250.7

避難で避けた被ばくリスク

- 避難勧告の11市町村からの避難者数：約10万人
- 各市町村の避難者数の推定値（住民数と避難指示面積の割合で推定）の重みで、避けた平均被ばく集積線量を求めた：205ミリシーベルト
- 集積線量の余命短縮換算係数:0.09日/mSv¹
- 205ミリシーベルトの被ばくによる10万人の余命短縮：185万人・日（この値を避難に伴うリスクと比較する）

注1：低い線量に人口をかけて死亡数を計算するのは、適切でないが、職業被ばくの検討などのため、リスク便益分析に用いるのは差し支えないとされている²。185万人・日は実際の死亡数ではなく、このようにして計算された値。これに対して、災害関連死者数は実際の数字。

注2：高齢者の余命短縮係数は見つからないが、高齢者の被ばくリスクが年齢平均値の5分の1とすると、10万人の余命短縮は37万人・日となる。

注3：余命短縮係数0.09日/mSvは原爆被爆者のデータである。長期間の被ばく（東電事故の被ばく）リスクは、損傷の修復効果があるので、短期間の被ばく（原爆）の約半分である。換算係数として0.045日/mSvを用いると、余命短縮は18.5万人・日となる。

1：Cologne JB, Preston DL, “Longevity of atomic-bomb survivors”, RERF Report No. 8-99, 放影研

2：ICRP103 (2007)

避難に伴うリスク

- 11市町村の災害関連死者数を分析した
- 災害関連死者数には、地震津波の避難による災害関連死者も含まれているので、死亡までの平均期間は**2.2年**とした（最初の1年間のデータも含めると**1.3年**、含めないと**3.1年**なので、その平均値を採用）
- 避難しなかった場合の災害関連死者の平均余命は、避難時の年齢分布から、**10.1年**。従って、避難で失われた平均余命は**7.9年**である。
- 災害関連死者数として、最初の1年間を含めた場合（**2084名**）と、含めない場合（**1454名**）の平均値**1769名**を用いると、避難に伴う余命短縮は**510万人日**
- これは、避難で避けた被ばくリスク**185万人日**の約**2.8倍**。
- **結論：長期化した避難は正当化されない。**

放射線被ばくによる生涯ガン死亡率 (%/Sv)
高齢者の被ばくりスクは年齢平均値の5分の1
高齢者は被ばくりスクが小さい。
線量率は年齢による被ばくりスクの違いを表せない

被ばく年齢	男性	女性	平均
0-19	8.1	12.8	10.4
20-64	3.2	4.2	3.7
65-90	0.8	0.9	0.9
0-90	4.2	5.8	5.0

出典：甲斐倫明「放射線リスク評価とその不確かさ」Table1 原子力バックエンド研究
 Vol.6, No1、December 1999

注1：この表は、ICRP Publication 60のFigure C-5のMultiplicative Modelと同じ内容だと考えられる。なおAdditive Modelの結果も示されており、高齢者については同じ傾向だが、若年被爆者のリスクは大きくない（おおよそ平坦で、高齢になると低下）。

注2：高齢者の被ばくりスクは年齢平均値より小さいので、災害関連死を防げるはずと考えたのが、リスクベネフィット論文作成のきっかけ。

高齢者の被ばくリスクは低い ICRP Publication 60 Fig. C-5 (1990)

- Additive model (上図), Multiplicative model (下図)とも50歳以上で生涯被ばくリスク(縦軸)は年齢(横軸)とともに低下している
- 当時は若年層では大きな違いがあった。

176

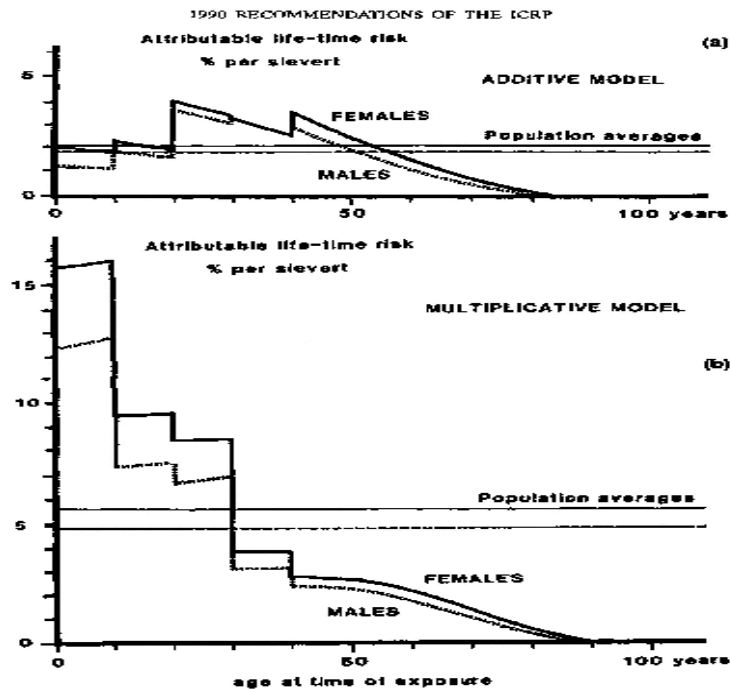


Fig. C-5. The attributable lifetime risk from a single small dose at various ages at the time of exposure, assuming a DDREF of 2. The discontinuities are the result of the use of constant annual values for the primary risk coefficients within 10-year age intervals (cf. Table C-1). The higher risk for the youngest age group will not be expressed until late in life.

(C48) Figures C-3 (b) and C-4 (b) show the conditional and unconditional death probability rates as a function of age, again in the case of single exposures at the age of 5 and 35 years. It can be seen that the attributable lifetime probability of death (represented by the area under the curves for dr/dH), for exposure of children, is one order of

急性被ばくでない時は若年層のリスクは特に大きくはない

急性外部被ばく
の発がん

被ばく時年齢と発がんリスクの関係



原爆被爆者の被ばく時年齢別の生涯リスク

被ばく時年齢	性別	100mSv当たりのがん死亡生涯リスク (%)	急性被ばくがない時のがん死亡生涯リスク (%)	100mSv当たりの白血病死亡生涯リスク (%)	急性被ばくがない時の白血病死亡生涯リスク (%)
10歳	男	2.1	30	0.06	1.0
	女	2.2	20	0.04	0.3
30歳	男	0.9	25	0.07	0.8
	女	1.1	19	0.04	0.4
50歳	男	0.3	20	0.04	0.4
	女	0.4	16	0.03	0.3

出典：

- ・ Preston DL et.al., Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. Radiat Res., 2003 Oct;160(4):381-407.,
- ・ Pierce DA et.al., Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990 Radiat Res., 1996 Jul;146(1):1-27.

がんの種類によって過剰相対リスクは異なる

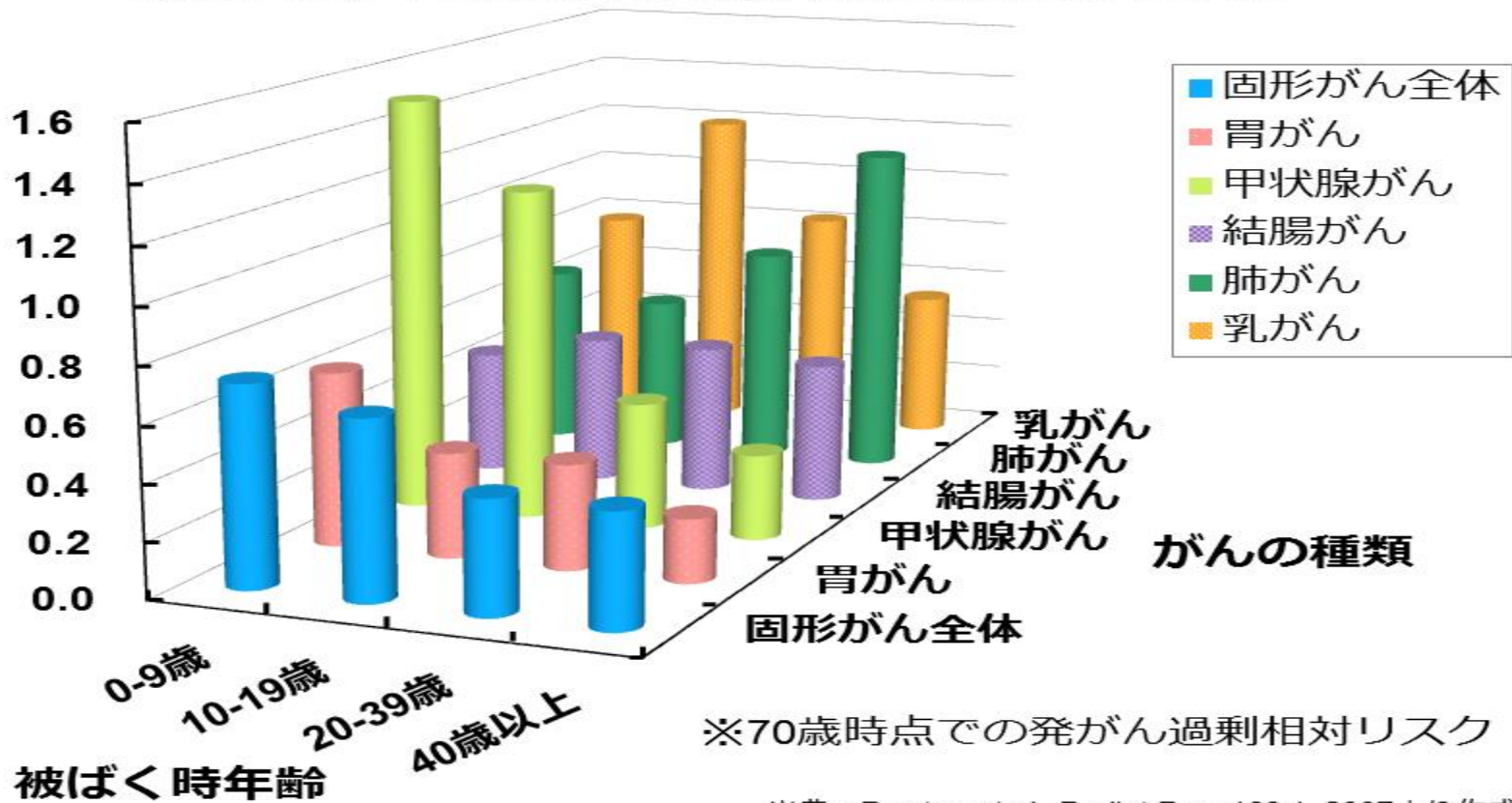
急性外部被ばくの発がん

被ばく時年齢とがんの種類



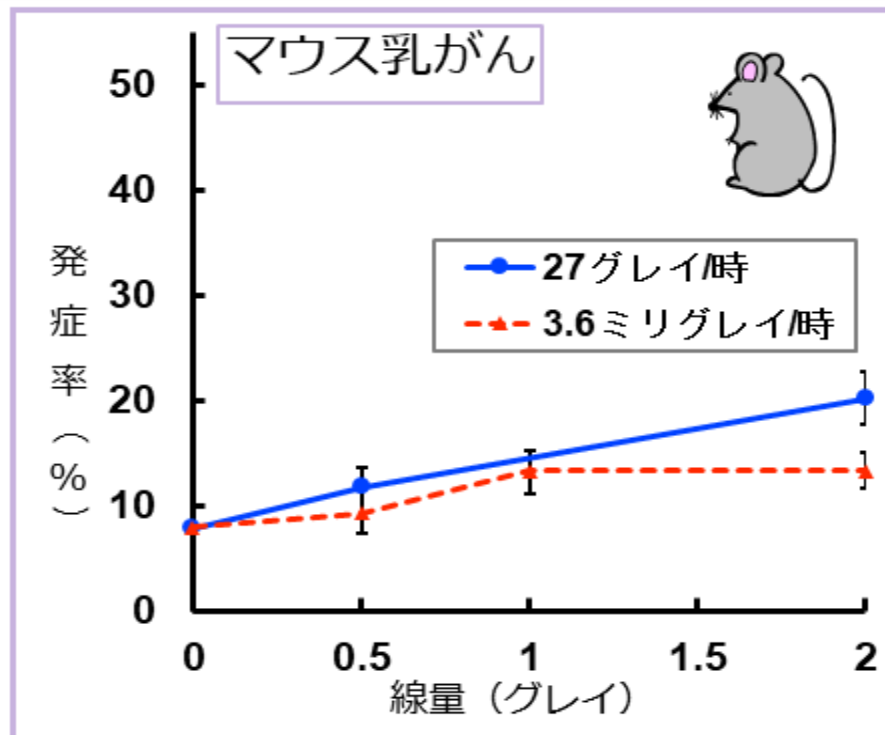
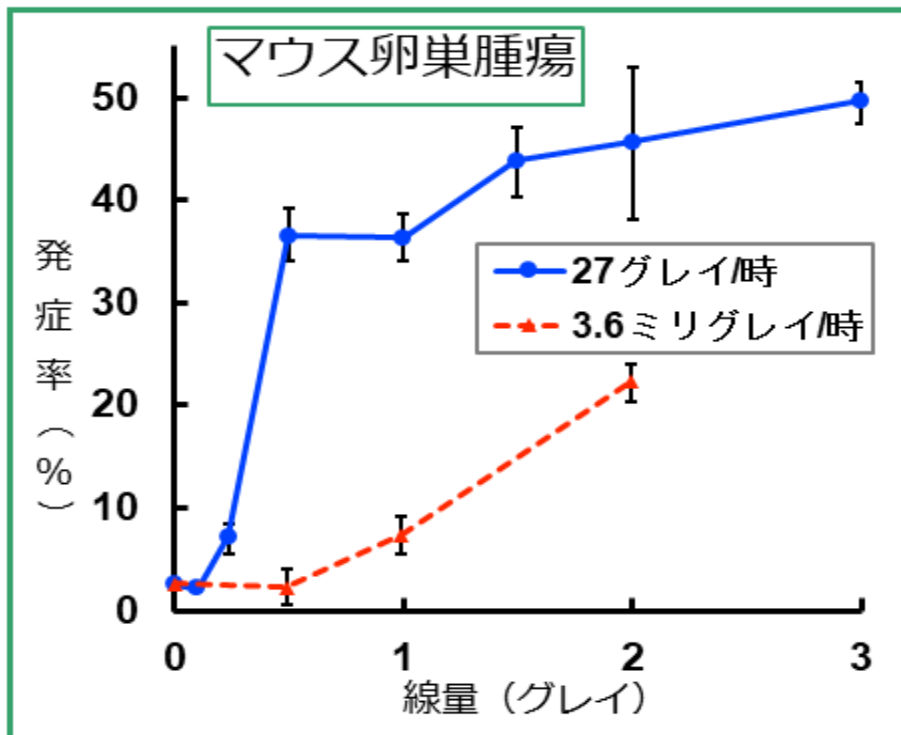
被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク

過剰相対リスク※
(1グレイ当たり)



※70歳時点での発がん過剰相対リスク

出典：Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成



出典：国連科学委員会 (UNSCEAR) 1993より作成

低線量・低線量率のリスク

$$= \frac{\text{高線量・高線量率のリスク}}{\text{線量・線量率効果係数}}$$

機関	線量・線量率効果係数
国連科学委員会 (UNSCEAR)1993	3より小さい (1~10)
全米科学アカデミー (NAS)2005	1.5
国際放射線防護委員会 (ICRP)1990,2007	2

避難のリスク便益分析のまとめ

- 避難に伴う余命短縮は**510万人・日**
- 避難で避けた被ばくリスクは**185万人・日**
- 避難に伴うリスクが、避けたリスクより**2.8倍**大きい
- 高齢者の被ばくリスクが年齢平均値の**5分の1**であることを考慮すると、**14倍**大きい。
- 計算に用いたリスク係数は原爆被爆者（高線量率被ばく）のデータをもとにしているが、避難の被ばくは低線量率被ばくなので、リスク係数は**2分の1**。これを考慮すると、**28倍**大きい。
- **結論：長期化した避難は正当化されない。**

避難中の健康影響

生活不活発病

- 体を動かさないと、体の様々な機能が低下する。これは生活不活発病と言われ、1980年代から知られている。
- 血液循環機能の低下、肥満、筋骨格の脆弱化、うつ病、早期老化などの症状が特徴である。
- 実験的に再現することが可能で、予防と回復による治療法があり、幸いにもそれらは安価、安全、簡便で効果的であると述べられている¹。
- 厚生労働省は、地震などの災害時の生活不活発病（廃用症候群とも呼ぶ）に対する注意喚起を発表している²。
- 東電福島事故で避難勧告で、仮設住宅などに移った人々は、体を動かす機会やその動機を失った（補償金）。

避難に伴う放射線被ばく以外の健康影響を、心理的要因だけと理解するのは誤り

1. Bortz II WM. The disuse syndrome. West J. Med, 1984,141(5), 691-694

2. 「生活不活発病に注意しましょう」、生活機能低下予防マニュアル、厚生労働省

放射線被ばく以外の健康影響（チェルノブイリ事故）

こころへの
影響

欧州での人工流産の増加－チェルノブイリ原発事故－

チェルノブイリ原発事故発生：1986年4月26日



遠隔地での人工流産の増加

ギリシャ：1987年1月の出生率が激減
⇒1986年5月に妊娠初期の胎児の23%が人工流産と推定

イタリア：事故後5か月間は1日当たり約28～52件の
不必要な中絶があったと推定

デンマーク：少しあった

スウェーデン、ノルウェー、ハンガリー：なかった

出典：Proceedings of the Symposium on the effects on pregnancy outcome in Europe following the Chernobyl accident.
Biomedicine & Pharmacotherapy 45/No 6, 1991より作成

出典：環境省 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料

注：ハンガリーは100ミリシーベルト以上の被ばくでないと中絶できなかった。
定量的基準を用意することが重要との教訓が得られる。

放射線被ばく以外のリスク

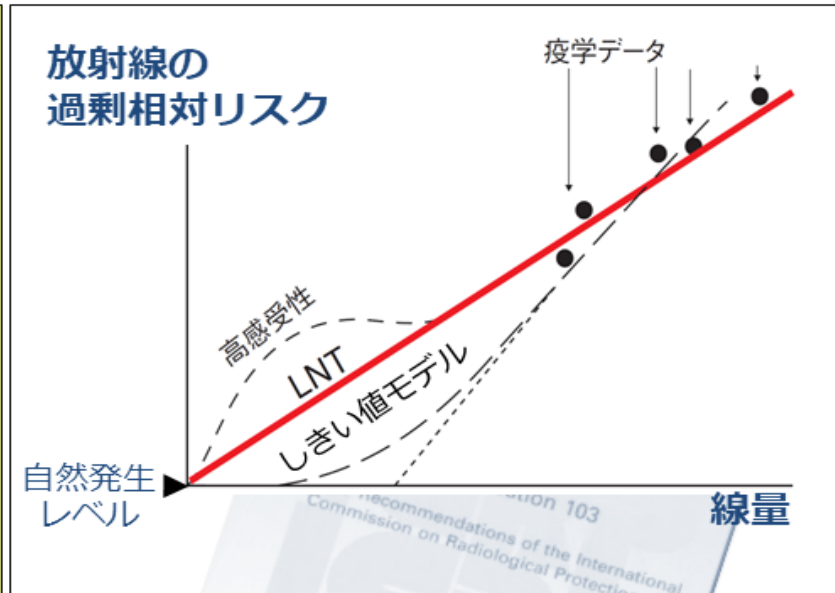
- 放射線量を制限しても防げない
- 放射線被ばくリスクの枠組みでは考慮できない
- しかし、ICRPと原子力関係者は放射線被ばくリスクの枠組みでしか考えてこなかった。WHOも（定量的データがなかったので）考慮できていない
- ICRP,WHOはリスクコミュニケーションの必要性を述べているが、国民相手に機能したか？機能するか？
- 災害関連死は、阪神淡路大震災以降、日本で制度化され、データがある。災害弔慰金の趣旨があるが、死亡は事実で、リスクとして、考慮できる。
- 著者の論文は、初めて、原発事故の避難のリスク・ベネフィットを定量的に示した。（介護ホームの災害関連死や、南相馬市の災害関連死を医学的に分析した論文はある）。
- リスクコミュニケーションで防げると考えられているようだが、対話が必要なので無理（日本国民数は1億人、原子力関係者数は1万人）。逆効果もある（安全の話はリスクの話なので、心理的には危険のイメージが伝わる）

LNTモデルをめぐる論争

防護の原則

LNTモデルをめぐる論争

- ◎支持：
全米科学アカデミー（2006）
放射線被ばくには「これ以下なら安全」と言える量はない
- ◎批判的：
フランス医学・科学アカデミー（2005）
一定の線量より低い放射線被ばくでは、がん、白血病等は実際には生じず、LNTモデルは現実には合わない過大評価



⇒ **国際放射線防護委員会（ICRP）** は、**放射線防護**の目的上、**単純かつ合理的な仮定**として、**直線しきい値なし（LNT）モデル**を採用

LNTモデルとALARA：改善策

- LNTモデルは、疫学（統計）なので、科学的に、論争に決着をつけるのは困難では？
- ALARA（As low as reasonably achievable）はポリシー。**ポリシーは根拠があれば改善すべき。**
- 東電事故時に日本政府はALARAをもとに対応した。（政府の法令上の手続きに瑕疵はないが）、結果的に、災害関連死が増えた

改善策

- **原子力発電所事故時に、低線量率（例えば100mSv/y以下¹）の地域にいる公衆にALARAを適用しない。**（明確な基準が事前に必要です、値を幅で与えないこと）

注：低線量被ばくに関する論点のまとめは、たとえば、Optimization: Rethinking the Art of Reasonable: Workshop Summary Report, OECD NEA, NEA/CRPPH/R(2020)2, October 2021

1. 根拠は100mSv/y以下では晩発効果が明確ではないため。避難解除の線量率が20mSv/y以下なので、高齢者はその5倍、その他の年齢は20mSv/yとする案もある。

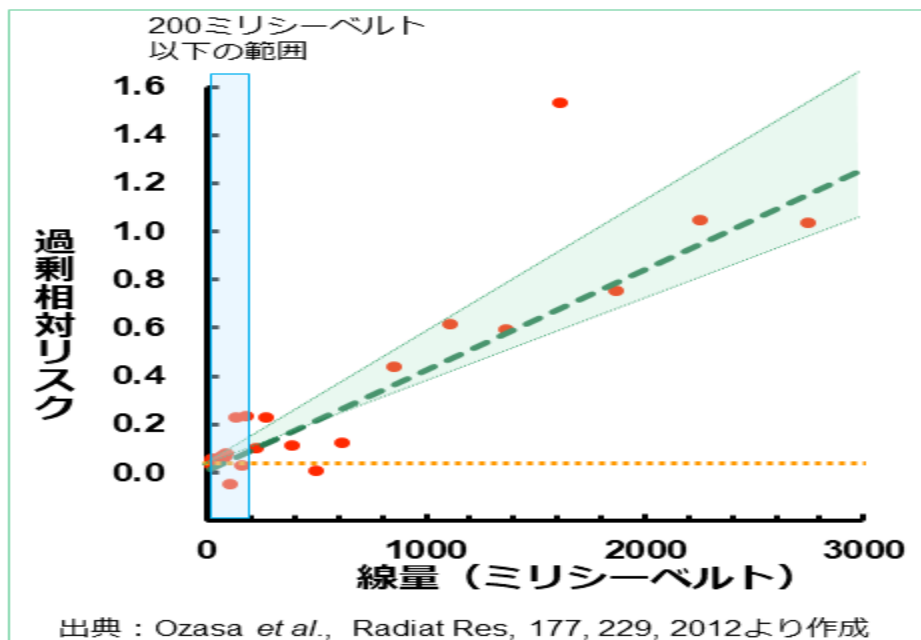
がん罹患リスクは100ミリシーベルト以上で、がん死亡リスクは200ミリシーベルト以上で、線量とリスクに比例関係が見られる。しかし100～200ミリシーベルトよりも低い線量における関係性については、研究者によって意見が分かれている。

急性外部被ばくの発がん

固形がんによる死亡と線量との関係



固形がんによる死亡（原爆被爆者での結果）



過剰相対リスク：放射線を受けなかった集団に比べ、放射線を受けた集団ではどのくらいがん発生のリスクが増加したかを調べたもの

出典：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料、3章、3.7

低線量での健康影響のまとめ

- 放射線の健康影響は、被ばくした集団（原爆被爆者）と被ばくしていない集団の発がんを調べて、統計的に比較する（疫学）。
- **100**ミリシーベルト以下の被ばくでは、両者の差は不明確で、統計的に有意ではない。
- 統計的に有意でないが、曝露量に比例して影響があるとしているのは、放射線被ばくだけ（ICRPのALARAの勧告を国の規制に取り入れている）。
- 他の分野、例えば薬の治験で、有意でない時は、薬の効果があるとは認められていない。
- 原子力・放射線事故時に、年**100**ミリシーベルト以下の地域にいる住民に、ALARAを適用しないようにすべき。

最初の1年間の集積線量が100mSv以下の市町村が多い
 大部分の市町村は早期（1年以内）に避難解除できるはず
 (避難命令の出た市町村の測定値から推定した集積線量の平均値、mSv)

	最初の1年間	避難期間中
田村市	3.3	5.78
川内町	8.65	15.85
檜葉町	9.1	17.9
葛尾村	26.3	53.6
南相馬市	16.2	63
飯館村	31	120.4
川俣町	15.4	50.9
浪江町	104.4	355.8
富岡町	43.4	165.2
大熊町	158.2	538.2
双葉町	75.1	254.8
大熊町 >5km	38.8	132
双葉町 >5km	73.9	250.7

原発立地地域の特徴を踏まえた対策例

特徴

- 原発地元：兼業農家が多い（福島県相双地域では85%）、原発と建物の業で働く傍ら、農作業（稲作）方に従事。商店、食堂、宿泊施設などを経営する方もいる。
- 高齢化（相双地域では61%が66歳以上）

対策例

- **地元住民が、自宅や農地や商店等の除染作業を行うのを可能にする。**生活不活発病の防止にもなる。彼らに放射線作業者教育を行えばよい。
- 自発的に帰還を望む住民に、早期の帰還を許可し、除染作業などに従事できるようにする。特に50歳以上の住民などに。
- これらで、コミュニティの崩壊も防げる

今後の研究テーマ例

- 東電福島事故の災害関連死者とその避難要介護度との害。東電福島事故の災害関連死者とその避難要介護度との害。東電福島事故の災害関連死者とその避難要介護度との害。
- データは日本にしかない。地方自治体にある。
- 広島・長崎の被爆者のデータは、放射線健康影響連死避に。広島・長崎の被爆者のデータは、放射線健康影響連死避に。広島・長崎の被爆者のデータは、放射線健康影響連死避に。
- **医学研究者にデータ開示を**（医者は、仕事で、守秘義務を守っている）
- 今後の研究に期待（日本の責務）
- なお、東電事故の災害関連死者の2012年度以降の。なお、東電事故の災害関連死者の2012年度以降の。なお、東電事故の災害関連死者の2012年度以降の。

東電福島事故の原子力防災と 危機管理の教訓

新しい防災対策の重点区域

○PAZ: Precautionary Action Zone

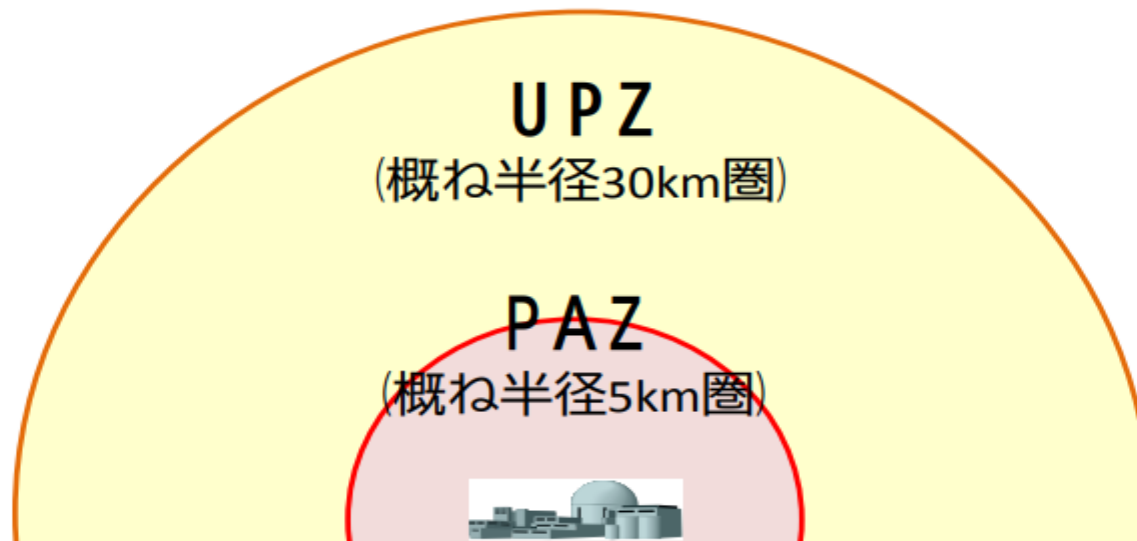
原子力施設から概ね半径5 km圏内。

放射性物質が放出される前の段階から予防的に避難等を行う。

○UPZ: Urgent Protective action planning Zone

PAZの外側の概ね半径30 km圏内。

予防的な防護措置を含め、段階的に屋内退避、避難、一時移転を行う。



出典：原子力災害対策指針のポイント、内閣府 原子力防災

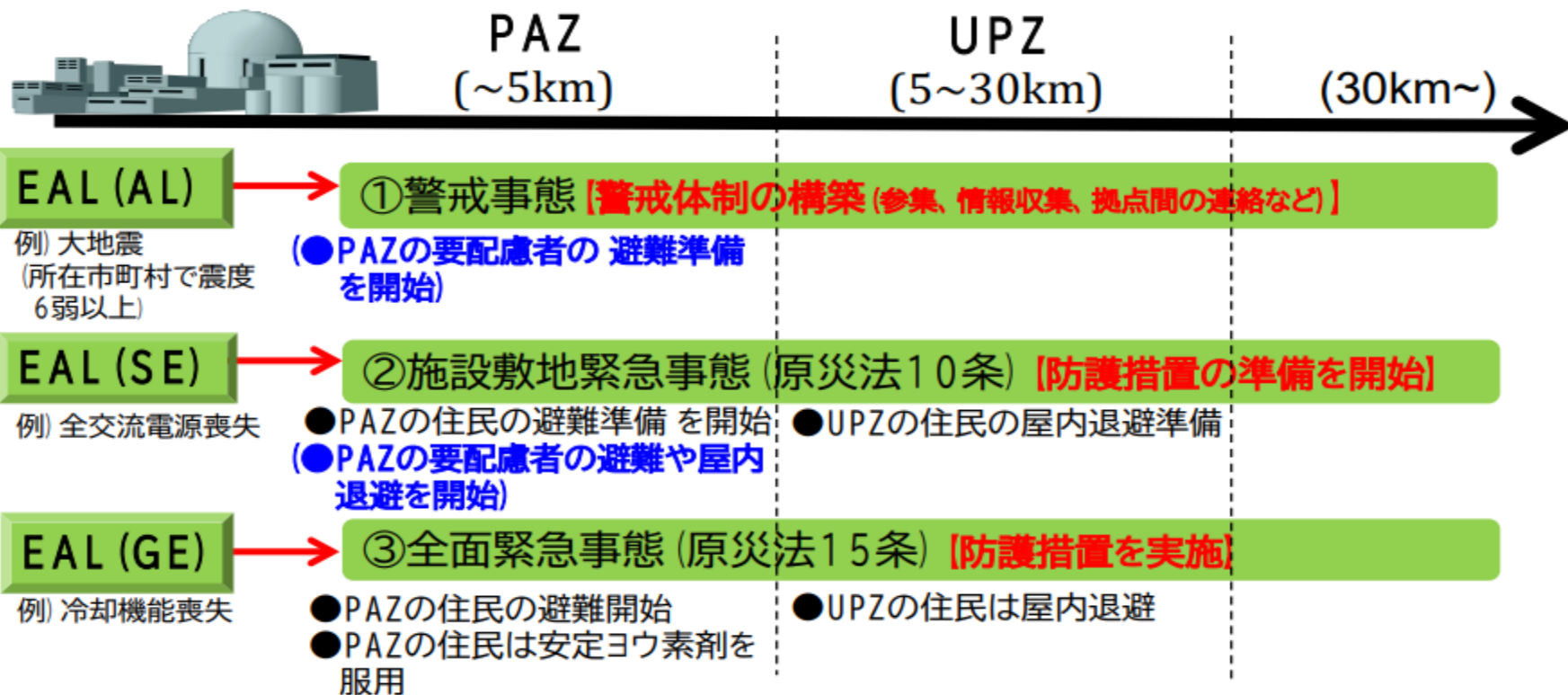
https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/pdf/02_taisakupoint.pdf

EALによる段階的避難／要配慮者は早期避難

○原子力施設の状態等に基づく、三段階の緊急事態区分を導入。その区分を判断する基準（EAL：Emergency Action Level）を設定。

○EALに応じ、放射性物質の放出前に避難や屋内退避等を行う。

※入院患者等の要配慮者の避難は、通常の避難より時間がかかるため、EAL(SE) (原災法10条)の段階から、避難により健康リスクが高まらない者は避難を開始し、避難により健康リスクが高まるおそれのある者は遮蔽効果の高い建物等に屋内退避する。



出典：原子力災害対策指針のポイント、内閣府 原子力防災

https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/pdf/02_taisakupoint.pdf

日本の原子力防災

- 防災基本計画（中央防災会議）と、原子力災害対策指針（原子力規制委員会）の二段階構造
- 前者は、第12編が原子力災害対策編で、災害予防、災害応急対策、災害復旧について記載。「・・・は・・・するものとする」の形式で、各省庁等の役割と仕事を記載している。
- 後者は「・・・は・・・ならねばならない」の型式で国や原子力事業者の役割と仕事を記載している。
- 原子力災害対策に関する指針などは、原子力規制委員会のHPに掲載されている。
<https://www.nra.go.jp/activity/bousai/measure/index.html>

日本の原子力防災指針の要改善点

- **リスク・便益の考え方が必要（米国PAGには書いてある）**
- 「住民等の被ばく線量を合理的に達成できる限り低くすると同時に、被ばくを直接の要因としない健康等への影響も抑えることが必要である」は、ALARAのため長期避難させて、災害関連死が増えたので矛盾がある。
- 放射性ヨウ素（葉物野菜や沢水、放牧牛の牛乳）の摂取制限は、放出後（測定後）ではなく、大規模放出（全面放射能緊急事態）が予想される時に発出すべき（発出が遅れ、放射性ヨウ素を含むミルクを飲んだ子供が甲状腺がんを発症したチェルノブイリ事故の教訓を生かしていない）
- 避難解除の条件として、生活インフラの復旧を挙げているが、避難期間が長期化し、災害関連死が増えるので、よくない。
- ALARAを復旧期にも公衆に不適用とし、住民も参加して、生活インフラ復旧を図るのがよい（原子力災害を特別扱いしないのがよい）
- 米国は外部被ばくによる半径10マイルのEPZ(Emergency Planning Zone)と、内部被ばくによる半径50マイルのEPZがある。外部被ばくと内部被ばくを分けるのは合理的では？

出典1：原子力災害対策指針、原子力規制委員会、令和元年7月3日

出典2：避難指示解除の要件、平成27年6月12日原子力災害対策本部決定・閣議決定（抄）

原子力防災指針の日米比較

- 米国（PAG）：考え方が書いてある
- 日本：手続きが書いてある。日本特有？
- 手続きは、事象進展とその対策に不確定がある大規模災害では、機能しない。東電福島事故では防災センサーが機能しなかった。
- 日本にもマニュアル¹はあるが、手続きに関するマニュアルで、考え方は書いてない。
- 災害対策では災害の全体像を頭の中に描ける必要がある。手続きではなく、知識や考え方の継承が必要。
- 日本には、過酷事故を含む安全や防災の全体像の解説書や研修資料がない（現象や防止技術の論文は多数あるけれども）。作成は研究開発機関の役割？ 研究論文を作るだけでは困る。米国NRCの安全の研修資料の基になった報告書は公開されている²。防災はPAGに考え方が書いてある。

1. 原子力災害対策マニュアル 原子力防災会議幹事会、令和4年9月2日一部改訂

2. Perspectives on Reactor Safety (NUREG/CR-6042, SAND93-0971, Revision 2)

東電福島原発事故の教訓（健康影響）

- 放射線被ばくによる公衆への健康影響は認識できないのに、福島県では長期の避難によって2000人を超える災害関連死が発生し、その90%が高齢者で、生活不活発病が原因と考えられる。
- **放射線被ばくりスクの枠組みでは他の健康リスクを考慮できない。**
- リスク便益分析を行うと、避難で避ける放射線被ばくりスクより、避難に伴う災害関連死のリスクが2.8倍から28倍大きい。リスクと便益のバランスを考慮した原子力災害対策指針が必要
- 災害関連死を防ぐには、避難期間は短いほど良い。
- 兼業農家が多く、高齢者が農作業を担っている日本の特徴を考慮し、対策すると、災害関連死もコミュニティ崩壊も防げる。
- これらの教訓は、原子力発電所が農業地帯に立地し、高齢化が進んでいる中国・韓国・フランス等でも重要。
- **放射線は低線量では、危ないと考えることの影響が、実際のリスクよりはるかに大きい。**明確な基準を決めておく必要がある。
- **他の健康被害を防ぐため、避難を伴う事故の時にALARAの原則を低線量地域にいる公衆に適用しないことにすべき。**

東電福島事故の危機管理の教訓

- **緊急時対応は最悪ケースを防ぐために行うとの意見は誤り。**なぜなら、最悪ケースは、次元の指標（被ばく防止）でしか考えられないので
- 東電福島事故では、放射線被ばく防止のみを考えたため、避難が長期化し、生活不活発病による災害関連死の増加を招いた。
- 緊急時対応は、様々な要素を勘案して、一元的に行うべき。そのための訓練は行われているか？訓練は抜き打ちで行うべきでは？東大炉の経験では、シナリオを知らせず、抜き打ちで行った訓練が一番効果があった。
- 英国の危機管理は見事だった。狂牛病対応の失敗の経験で改善され、機能した¹

1. Robin W. Grimes, Yuki Chamberlain, and Atsushi Oku, “The UK Response to Fukushima and Anglo-Japanese Relations” Science and Diplomacy, June 2014

東電福島事故時の英国の対応

- **SAGE**（緊急時科学的助言グループ）が立ち上がった。主席科学顧問と関連省庁・専門家で構成。過去には2009年（インフルエンザ）、2010年（アイスランド火山噴火）で活動。
- 情報を集め、評価し、事象進展に応じた解釈をして、首相と内閣府広報担当に助言した。
- 情報を国内外から集め、放射性物質が福島県にとどまると予測した。東京にいる英国人に対するリスクは小さく、避難の必要はないとした。
- サイエンス・メディアセンターを通じて情報を提供した。主席科学顧問が発言し、科学者が独立に意見を述べ、国民の政府の決定への信頼を助けた。
- 主席科学顧問は英国大使館員や日本在住の英国人と4回電話会議で話し、質疑応答し、その様子を英国大使館がHPで公開した。これで事故の影響が理解された。
- 日本には**SAGE**に相当する活動がなく、日本の原子力専門家は信頼を失っていたので、英国の情報は日本政府が情報の信頼性を確認するのにも役立った。
- その後、日英原子力対話、規制や廃止措置での協力が行われている。

東電福島事故時の放出推定値過大評価の教訓

- 欧米原子力大国は、使用済み燃料プールのリスクを過大評価し、放出量が大きいとした。広範囲の避難を呼びかけたが、これが過大評価だった。（英国は過大評価ではなく、英国国民は東京にとどまってよいとしていた）
- 使用済み燃料プールに水があることは、ヘリコプターに乗っていた東電社員が確認し、東電の会議でも確認されていたが、これが国内外に伝わらなかった。
- 使用済み燃料プールの水が蒸発するには20日以上かかる*
- 原子炉から取り出してから時間がたった燃料は空気でも冷却できる。
- なお、東電事故は軽水炉の典型的な事故だが、3基が炉心溶融しており、放出量の点で最大に近い事故である。
- ドイツは誤った情報をもとに、脱原発を決めたことになる。

* Gauntt R. et al., Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012), SAND2012-6173, July 2012, Sandia National Laboratories

東電福島原発事故の教訓（危機管理）

- 事故時に指揮系統が混乱し、政府や東電本部の対応が、福島第一原発の現場と、国内外を混乱させた（例：使用済み燃料プールに水があることが伝わらなかった）。
- 英国政府と英国大使館の対応が見事だった。危機管理の経験と知見をもとにした主席科学顧問による一元的説明が効果的だった。（放射性物質放出量の推定も適切で、過大でなかった。）
- 日本の原子力防災指針は手続きを記載するトップダウン型で、指揮系統混乱の教訓が反映されていない（米国はボトムアップ型で、考え方を記載）日本は考え方を説明した指針や研修資料が必要。
- 危機管理では現場や住民との接点である地方自治体の役割が重要（阪神淡路大震災の教訓）。
- 規制行政は手続きだが、安全確保は手続きだけではない。知識や経営が重要である
- 原子力規制組織が推進側の組織から独立していなかったこと等は、国会事故調の提言参照。

東電福島原発事故の教訓 (コミュニケーション)

- 事故時に、政府が、国民に対してワンボイスのメッセージ発信をできなかったこと
- 放射線被ばくりスクの国民への提供体制が整っていなかったこと（現在は改善された）。
- 放射線被ばくりスク・安全の話が繰り返さされたために、国民に放射線に対する恐怖が蔓延したこと。
- 政策情報の作成・提供や、日本語の科学情報が、依然として不十分なこと。
- 米英は、行政庁の国民に対する政策説明が充実していること。公僕としての態度が基本にあること
- トリチウムを含む処理水の放出問題にみられるように、原子力規制委員会の基準があるのに、日本では決定の責任主体があいまいになり、問題が混乱・長期化すること。
- セシウム137がインド洋や南太平洋で検出されると報道されたことがあるが、大気中核実験由来で、東電事故由来でない（誰も反論しなかったのはどうしてか？）

まとめ (その2)

東電福島事故の避難のリスク・ベネフィット解析

- 災害関連死防止には避難期間は短いほど良い。
- 提言1：**事故時は、低線量（例えば100ミリシーベルト/年以下）の地域にいる公衆にALARAを適用しないのが良い。**
- 提言2：**高齢者・希望者には、放射線取扱者教育をして、帰還させて、除染や生業の復旧に従事させるのが良い**（地元住民は、農業の傍ら、企業に勤めるか、商店・食堂・下宿等を経営している）。
- この教訓は、日本のみならず、原子力発電所が農業地帯に立地するフランス、韓国、中国などの国にとって重要である。
- 日本の指針は手続きが書いてあるが、**PAGは考え方が書いてある。PAGの方が、事故対応の点で優れている**（東電事故では事前に決めた手続きが機能しなかった。事前にすべて予測するのは不可能）

日本の原子力安全・規制・
防災にリスク・ベネフィット
の考え方が必要

リスク・ベネフィットの考え方

- 技術は（原子力利用に限らず）リスク（コスト）を伴うが、便益があるので利用している
- リスク・ベネフィットの考え方はIAEAの原子力法のハンドブックの最初に記載されている¹。
- **「どれだけ安全なら安全か」という問いには、リスク・ベネフィットの考え方で答えられる。**
- 米国のNRCには、10ミリシーベルト・人の被ばく低減は5200ドルに相当するとの、コスト・ベネフィット評価のための定量指標がある²。
- 米国の原子力防災指針にも、避難に伴うリスク・便益を考慮せよの記載がある。避難時の交通事故を考慮している（災害関連死はデータがなく、未考慮）。
- **日本の原子力安全・規制・防災には、リスク・ベネフィットの考え方がない。**

1. C. Stoiber, A. Baer, N. Pelzer and W. Tonhauser, "Handbook on Nuclear Law", July 2003, IAEA 1986

2. "Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy", NUREG-1530 Rev.1 February 2022

日本にリスク・ベネフィットの考え方がないことによる損失の例

- 原子力発電所を停止させ、新規規制基準適合審査を行ない、国民が良くなった。大津波のリスク・ペリオドは長さい) (稼働が)
- 東電事故では、避難解除が遅れて、災害関連死が増えた (避難したことによるリスクの方が、避難で避けた被ばくリスクより2.8-28倍大きかった*)
- 安全の改善で、コストが考慮できず、リスクが合理的に低減されているかが不明 (電気料金を通じた国民負担が合理的か曖昧になっている)
- **日本の原子力産業界は、コストに関する話を避けてきた。そのため現在大きい損失を被っている。電気料金も上昇し、国民負担も増大している。**

* Yoshiaki Oka, "Risks and benefits of evacuation in TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power station accident", Progress in Nuclear Energy 148 (2022) 104222, Elsevier, April 27, 2022

参考：放射性汚染食品規制のリスク便益分析 日本は食品の規制値にもコストベネフィットがない

表：余命1年延長費用のまとめ¹

対象	余命1年延長費用(億円)
野菜 3月	0.11
4月	0.77
5月	1.6
牛肉	3.7～23
米 大波地区	3.0
500Bq/kg超える地区	6.0
100～500Bq/kg地区	10
あんぽ柿	2.8

- 諸調査から得られる余命1年延長便益2000万円と比べると、野菜（3月）以外は非効率である¹
- 米の全量全袋検査が行われた。年間70億円の予算をかけて、消費者の総被ばく量を14万ベクレル減らした。損失余命回避は0.0023年で、1年の損失余命回避なら3.1兆円に相当する。これはリスクを減らす対策ではなく、基準値を超えるものが後で見つかるのを確実に防ぐ対策である²。

血税との言葉がある。費用便益分析の結果を生かした**合理的な基準値を、あらかじめ決めておく必要がある。**

出典

1. 岡 敏弘「放射性汚染食品規制のリスク便益分析」 環境経済政策学会2012年大会、2012年9月
2. 岡 敏弘「放射能汚染食品のリスク評価と規制・対策の費用便益分析」原発事故4年目における風評被害の構造と食と農の再生 郡山市役所 2015年3月14日

日本の原子炉規制に対する 米国の原子力安全専門家の意見

- 日本は新規規制基準導入の時にコストを考慮することができなかった。
- 日本には”適切な防護“の概念がない。そのために、米国流のバックフィット規則を適用することが出来ていない。
- 安全を限りなく強化することはできないと何度も述べたのだが。

日本の原子力安全について

- どこまで安全なら、安全と考えられるかという問いは、技術の活用におけるリスク・ベネフィットの考え方で対応できる。
- 日本には、原子力産業界にも原子力規制側にも、適切な安全性の概念がない。費用対効果（コスト・ベネフィット）の概念がない。
- 絶対安全はないと言いながら、それを判断する考え方がない。
- **リスク便益の考え方が日本の安全と規制に必要である。この考え方を日本の原子炉規制や防災の規則に（まずは、定性的でよいので）記載すべきである。**
- 安全は、確率にして、抽象化して考えているとダメである。稗外にあるリスクを見逃すことにもなる。
- 安全確保は、組織管理で、実際のデータで、コストを見て、地道で泥臭い作業を行う必要がある。
- 欧米の活動の歴史と全体を見ると参考になる。つまみ食いしないこと。
- たとえば、米国と日本の原子力規制委員会には、組織的にも運営でも違う点がある。比較して日本の課題を考えるとどうか。

どうすればよいか（例）

- 「原子力発電所事故時に、低線量率の地域にいる公衆に**ALARA**を適用しない」ことを国際的な基準にする活動を行う。
- 米国の原子力発電分野のリスク・ベネフィットと指標設定の経緯を調査し解説を作る。日本の規制基準化する。
- 日本の原子力防災を米国の原子力防災と比較する。日本の指針を改善する。
- 欧米の原子力防災訓練と危機管理の実態を調査し、日本と比較し、日本の改善を図る。
- 行政の結果に対する改善の仕組みを欧米と比較し紹介する。日本の仕組みを改善する

事故時に低線量地域の公衆にALARAを適用しないことの効果

- 避難の長期化に伴う災害関連死を防止できる
- 住民の除染・復旧参加が可能になり、コミュニティの崩壊を防止できる
- 事故後の除染や復旧のための国民負担・費用が低減する
- 電力会社の賠償負担額も低減する（原子力損害賠償額の上限の有無を議論するより、現実的な解になる。原子力損害賠償法については委員会でも検討したが、合意に達せず、無限責任は残ったまま。）
- 東電福島事故の避難で日本政府に手続き上の瑕疵はないが、**もし、災害関連死の問題を放置すると、次回の事故時に責任を問われます！**日本だけでなく、世界のどの国でも！米国の事故の時は米国政府機関が責任を問われます。**裁判になったら負けます。**

放射線は低線量では恐ろしい と考える方が危険である

- 例：東電福島事故の避難期間長期化、チェルノブイリ事故時のイタリアとギリシャでの中絶の増加
- 東電福島事故では、避難の長期化に伴う災害関連死のリスク（避難のリスク）が、避難で避けた被ばくリスクより2.8-28倍大きい
- 100ミリシーベルト以下の被ばくリスクは不明（疫学なので、統計的に有意でない）*
- 東電事故で避難させられた多くの市町村の集積線量は100ミリシーベルトを超えていない（参考文献2の表2.3、参考文献1のTable5）
- 有意でないものについて、リスクがあるとしているのは放射線被ばくだけでは？薬の治験で、効果が不明な時に、効果があるとしているか？
- 低線量の健康影響を研究したいので、低線量でも影響があると言っているなら、倫理を問われないか？

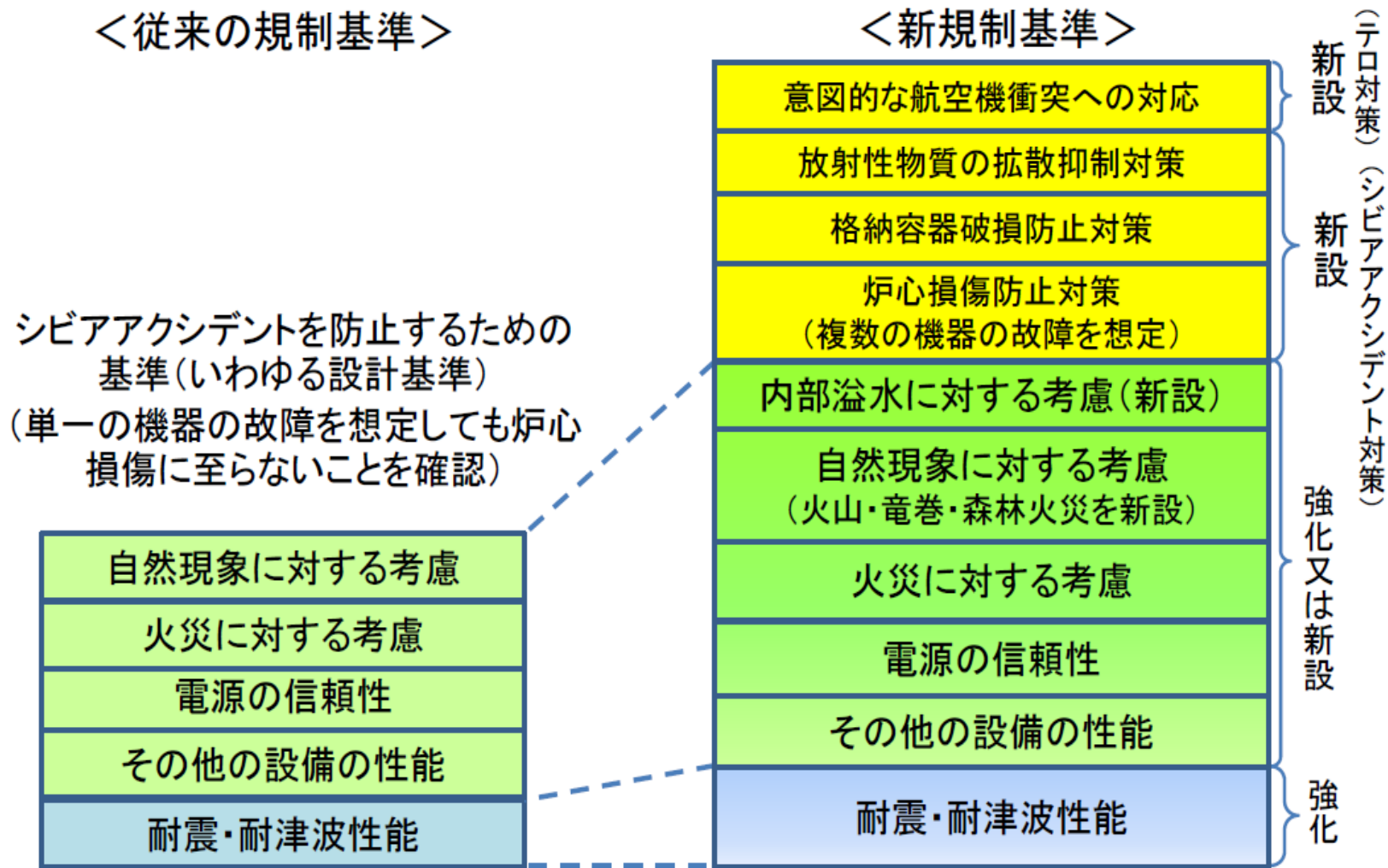
* 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料、3章、3.7

発電用原子炉の安全性は事故等の経験
を反映して改善されてきた

原子力安全は安全技術の改善より、
テロ・津波・防災等との境界分野が
重要になってきている

安全設備を積み上げるだけが安全性
向上ではない

従来の規制基準と新規規制基準の比較



(出典) 原子力規制委員会 「実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規規制基準について(概要)」 (2016年)

軽水炉開発初期の炉心設計基準の改善例（BWR）

- **Stuck rod criteria:** 停止状態から最大価値の制御棒一本を引き抜いても臨界に達しないこと：SL-1の事故（保守員が停止している炉の制御棒を手で持ち上げて臨界事故になり3名死亡）の教訓を反映した。
- **Rod drop criteria:** 制御棒落下速度制限装置を設置する：Dresden 1のトラブル（制御棒が金属疲労で折れて途中で引っかかっていた。もし運転中に落下したら臨界事故になっていた）
- **Fuel bundle worth criteria:** 炉心に燃料集合体を装荷するときに、誤って、一体釣り落しても、燃料棒の溶融が生じない
- **Fuel burnout criteria:** 運転中と異常な過渡変化状態で、燃料棒被覆管の焼損が生じないように熱流束を制限する
- 他にも、Void content and distribution criteria, Fuel clad integrity criteria, Void and temperature coefficient criteria, Control rod movement criteria, Neutron source criteria
- 加圧水型軽水炉（PWR）にも似た基準がある

発電用原子炉の安全性改善の歴史

- 炉心緊急冷却設備の試験（1970年代から）
- 炉心溶融事故対策・影響低減設備の研究開発（チェルノブイリ事故以降）*
- テロ対策（フランスの高速炉への反対派によるロケット攻撃もあったが、米国の対策は9.11以降）
- 津波対策（最近では、2000年代のインド洋大津波以降、日本原電は対策した。東電などは東日本大震災以降）
- 防災対策で、避難に伴う災害関連死を防ぐことが必要になっている：低線量地帯にいる住民にALARAを適用しないことを提案中

原子力安全の専門家に対する 注意喚起

安全を安全技術だけから見ていても
安全性が向上するとは限らない。

視野を広く
リスク・ベネフィットで

本紹介：原子力発電と社会

原子力発電と社会

経済、安全、廃棄物、法制度の課題



東京大学名誉教授

前・内閣府原子力委員会委員長

岡 芳明

原子力の常識を正す

課題を俯瞰した世界最初の書籍

欧米の知見と日本への教訓

AMAZON 2024年3月刊

電子版：500円

ペーパーバック：5280円
(335頁)

<https://www.amazon.co.jp/dp/BOCYCNVBRX>

経済自由化によって、安価な電力が供給されるようになるか？

原子力発電は、なぜ最も危険な発電方式と考えられるようになったのか？

放射性廃棄物は解決不可能な問題なのか？

技術の利用には危険を伴うが、どこまで安全なら安全と言えるのか、どう判断すればよいのか？など

災害関連死分析の参考文献

1. Yoshiaki Oka, “Risks and benefits of evacuation in TEPCO’s Fukushima Daiichi nuclear power station accident”, Progress in Nuclear Energy 148 (2022) 104222, Elsevier, April 27, 2022 (open access)
2. 「原子力発電と社会：経済、安全、廃棄物、法制度の課題」AMAZON、2024年3月刊、2.2.3節
3. 「原子力発電はなぜ最も危険と考えられるようになったのか？」国際環境経済研究所、2024年4月24日

コメント：意見を述べるときは、これらの資料で挙げた参考文献も読んでください。根拠を示して論述していますので。

原子力政策関連の発表資料

1. 岡 芳明「日本の原子力発電の課題」東大原子力専攻講演資料、2023年11月28日
2. エネルギードミナンス、強く豊かな日本のためのエネルギー政策、非政府の有志による第7次エネルギー基本計画 第3版、II.2.1-II.2.5、キャノングローバル戦略研究所 2024年4月16日
3. 岡 芳明「原子力発電と社会：経済、安全、廃棄物、法制度の課題」AMAZON, 2024年3月刊
4. 岡 芳明「発電用原子炉の開発」AMAZON, 2024年6月予定

ありがとうございました