原子力の負の歴史を乗り越えて

東京大学

岩井　敏

目次

- １．原子力に関する基礎知識
- ２．原子力の兵器利用（核兵器）
- ３．IAEAの設立と役割
- ４．原子力事故の歴史
- ５．リスクコミュニケーション

1．原子力に関する基礎知識

- 特殊相対性理論
  - ➢相対性原理

    「物理法則は、すべての慣性系（静止または等速運動している座標系）で同一である」
  - ➢光速度一定の原理

    「真空中の光の速度は、すべての慣性系で等しい」

空間3次元と時間1次元を合わせて4次元時空として捉える物理学

1．原子力に関する基礎知識

- 特殊相対性理論を用いて導出される結果のひとつ
  質量（m）とエネルギー（E）の等価性。
- $\boldsymbol{E = mc^2}$　　C:光の真空中速度（$3 \times 10^8 \mathrm{m/s}$）

- 特殊相対性理論全体の分かりやすい説明は下記web等を参考にしてください。
- (1) 高校生と文系のための相対性理論 （今野滋）

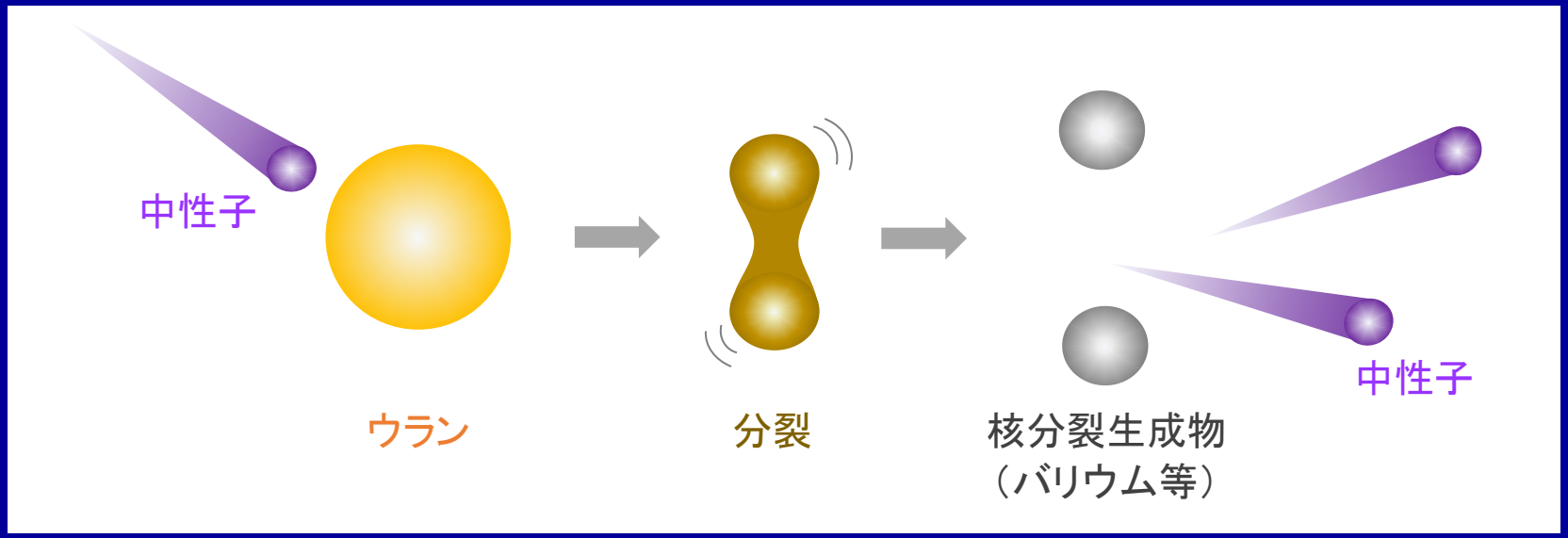
  http://sig3.org/soutairon/index.html

  (2) 海城中学高等学校　平成25 年度　数学科リレー講座5日目
  ミンコフスキー　幾何～非ユークリッド幾何としての特殊相対性理論～

  https://www.kaijo.ed.jp/wp-content/uploads/2016/02/2013summer-5_2.pdf

1．原子力に関する基礎知識

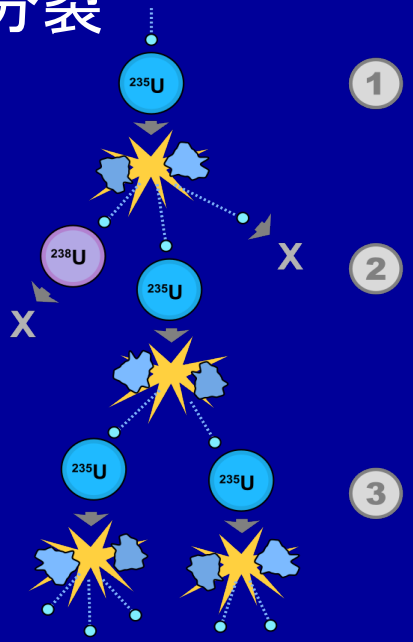
- 核分裂反応
- 原子核が分裂して同程度の大きさの原子核に分かれること。
- 1938年に、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンらが天然ウランに中性子を照射し、反応生成物にバリウムを発見した。
- この結果をリーゼ・マイトナーとオットー・ロベルト・フリッシュらがウランの核分裂反応であると解釈し、fission（核分裂）の語を当てた。



1. 原子力に関する基礎知識

- 誘導核分裂：U-235、Pu-239、Pu-241など核分裂しやすい原子核に中性子が衝突して発生する核分裂。エネルギーの低い中性子（とくに熱中性子）で核分裂を起こしやすい。
- 自発性核分裂：Pu-240、Cf-252など超ウラン元素などの不安定な原子核が自発的に分裂する核分裂

- 核分裂連鎖反応
- nuclear chain reaction



PD Wikipedia,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fission_chain_reaction.svg

1．原子力に関する基礎知識

臨界 （Critical）

- 核分裂連鎖反応により、中性子の生成（核分裂）と消滅（吸収、漏洩）が均衡している状態のこと。臨界状態となる核分裂物質の最少の質量を臨界量（臨界質量）であり、化学形、物理形状、環境条件で異なる。米国臨界安全ハンドブックTID-7016によれば、金属U-235で22.8kg、金属Pu-239 で5.6kgである。ちなみに、天然ウランには核分裂性核種U-235は0.7%しか含まれていないため、臨界質量はtonのレベルとなる。

遅発臨界（Delayed critical）,即発臨界（Prompt critical）

- 核分裂で発生する中性子（即発中性子）だけでなく、核分裂片から発生する中性子（遅発中性子）を含めて臨界になっている状態が遅発臨界。通常の発電用原子炉は、制御可能である遅発臨界で運転される。
- 即発中性子だけで臨界になる状態は即発臨界で、制御不可能。

目次

- １．原子力に関する基礎知識
- ２．原子力の兵器利用（核兵器）
- ３．IAEAの設立と役割
- ４．原子力事故の歴史
- ５．リスクコミュニケーション

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 物理学上の研究、発見と核エネルギー
- 原子炉の開発
- 2種類の原子爆弾の開発
- 水素爆弾の開発
- 核実験と第五福竜丸事件

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

物理学上の研究、発見と核エネルギー

1905: アルベルト・アインシュタインが、質量とエネルギーの等価性を証明する「特殊相対性理論」発表

$$E = mc^2$$

($E = mc^2$ の導出の説明の分かりやすいwebの例示:

https://www.youtube.com/watch?v=HLVbzWaM5NM)

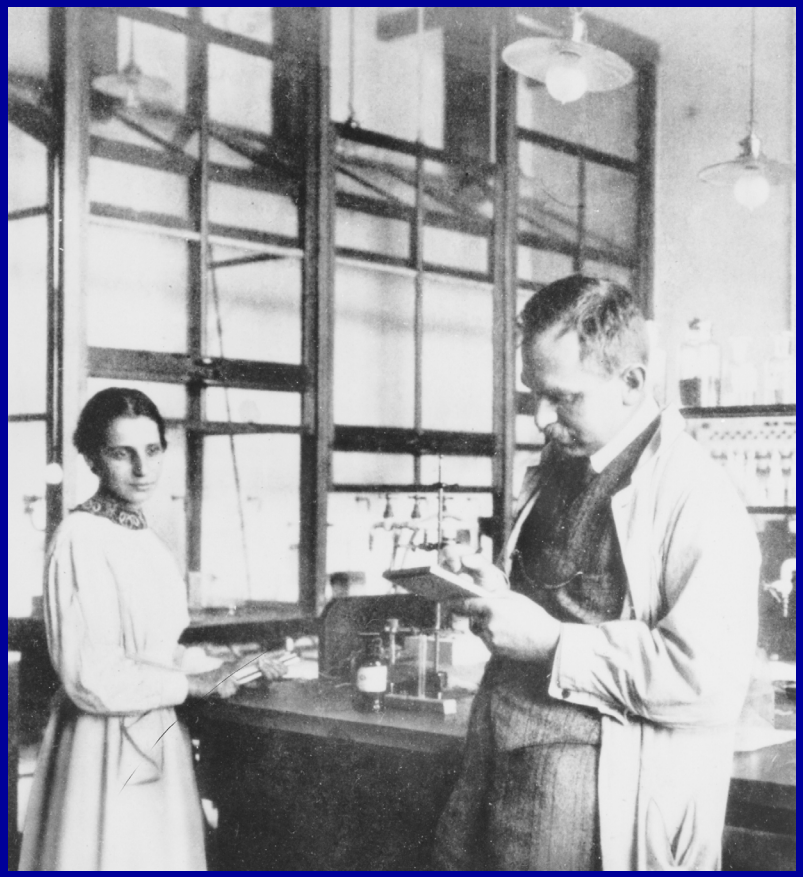
1938: 核分裂の発見

オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンらが天然ウランに中性子を照射し、反応生成物にバリウムを発見した。リーゼ・マイトナーとオットー・ロベルト・フリッシュらがウランの核分裂反応であると解釈した。

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

原子核分裂の発見

リーゼ・マイトナー（物理学者）とオット・ハーン（化学者）



National Archives CATALOG, https://catalog.archives.gov/id/558596

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

マイトナーの考察による^{235}Uの核分裂のエネルギー

・核分裂の前後で質量欠損が発生している。

^{235}Uの1原子核の核分裂で $E \approx 200\mathrm{MeV}$のエネルギーを放出する。

・この結果はアインシュタインの$E = mc^2$の式と一致する。

$$E = \{M(^{235}U)c^2 + M(n)c^2\} - \{M(fp1)c^2 + M(fp2)c^2 + k \cdot M(n)c^2\}$$

n： 中性子　(k=2～3)

$fp1$：核分裂片1

$fp2$：核分裂片2

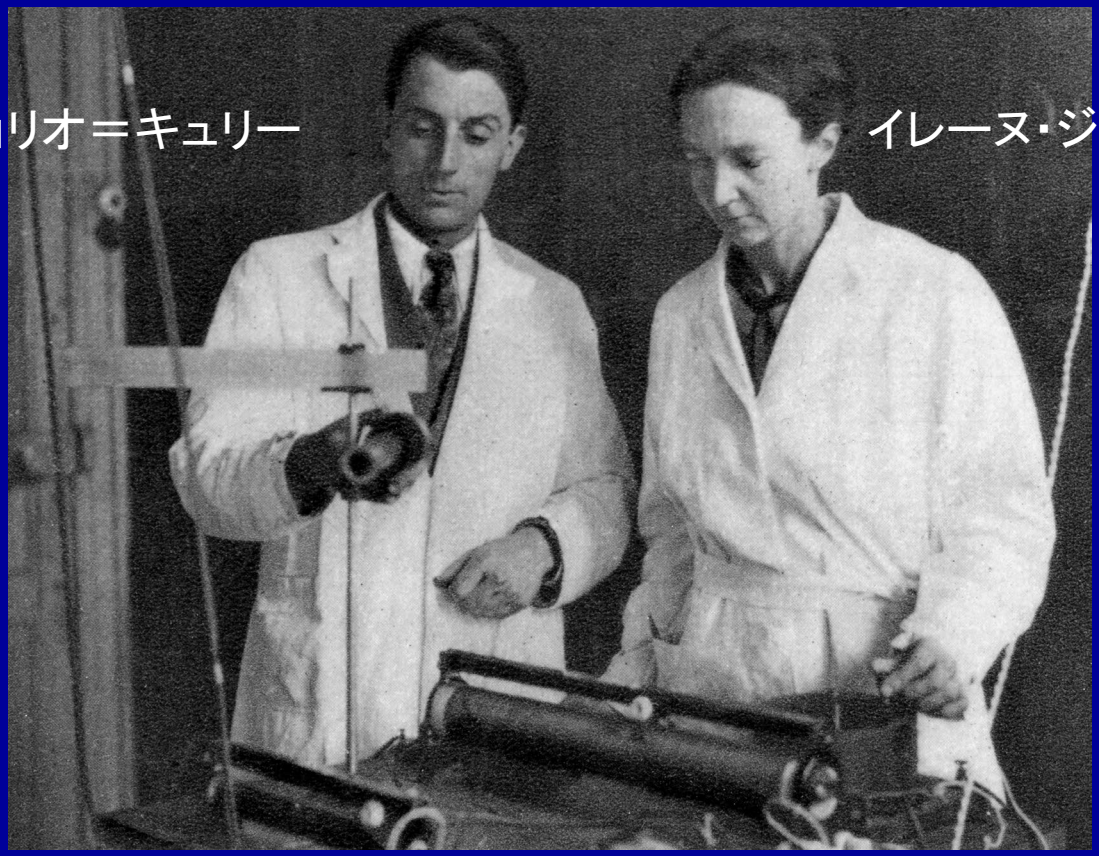
2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 1939:
- エンリコ・フェルミは、核分裂によって中性子が新たに放出される可能性が非常に高いことを指摘。
- ジョリオ=キュリー夫妻が核分裂によって生じる中性子の数を測定し、2個～3個であることを発見。このことは核分裂連鎖反応が可能であることを示唆した。

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

ジョリオ＝キュリー夫妻

フレデリック・ジョリオ＝キュリー

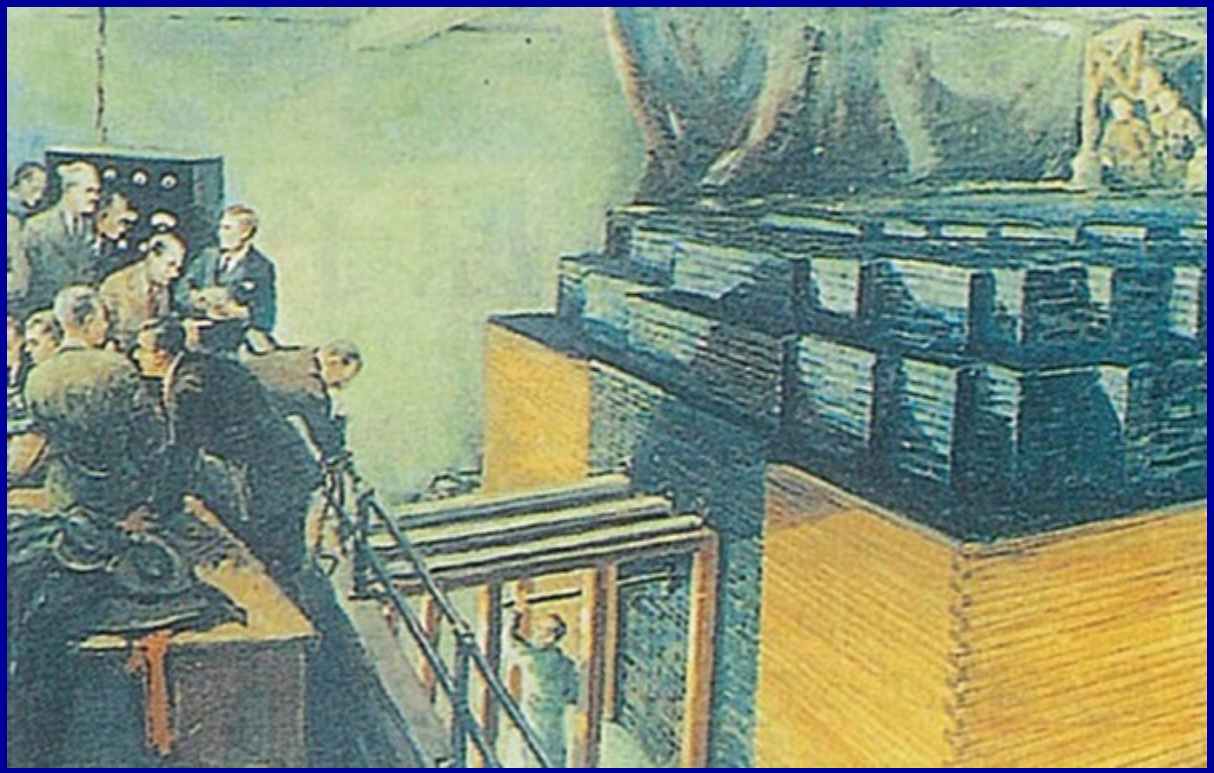


イレーヌ・ジョリオ＝キュリー

‡出典：Heritage Image/アフロ

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 1942年:エンリコ・フェルミが核分裂連鎖反応を天然ウラン(35トン)と黒鉛ブロック(350トン)を用いて実証(世界初の原子炉CP-1:Chicago Pile-1)



‡出典:2章 原子力開発と発電への利用 原子力開発の歴史, 日本原子力文化財団, https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-02-01.html

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

プルトニウムの生成

1940: グレン・セオドア・シーボーグらが天然ウランに重陽子(np)を照射して、Pu-238を生成(初めてのPu元素生成、ただし、Pu-238は核分裂性核種ではない。)

1941: グレン・セオドア・シーボーグが天然ウランに中性子(n)を照射してPu-239を生成
Pu-239は核分裂性核種

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

米国の核開発-マンハッタン計画-

Manhattan Project

1942～1947：米国が、第二次世界大戦中に英国、カナダと共同で実施した核兵器開発計画

- **ウラン爆弾**：天然ウランの殆どは非核分裂性のU−238であり、核分裂性のU−235は0.7%しかない。兵器として使用するには、U−235の濃縮が必要。
- **プルトニウム爆弾**：核分裂性のPu−239を原子炉で生成する。



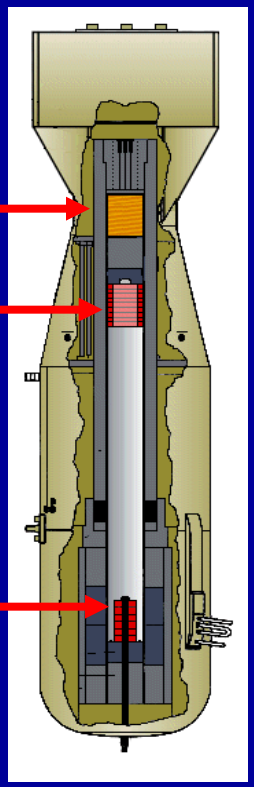
2. 原子力の兵器利用(核兵器)

ウラン爆弾

- U-235の濃縮
- 天然ウラン(0.7%)→0.85%→20%→高濃縮ウラン(82%)

熱拡散法　ガス拡散法　電磁濃縮法

両端に置かれたU-235の塊の一方を火薬の爆発力でもう一方のウラン塊にぶつけ、臨界量を超過(超臨界)させて起爆する原理(砲身方式)である。
火種となる中性子源はPo-Be

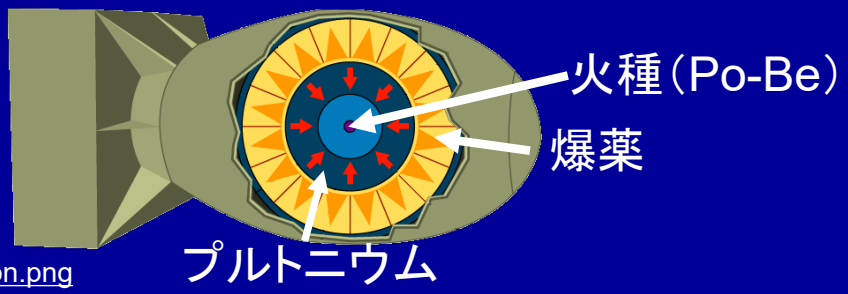


出典:HowardMorland (2009), Wikipedia,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Little_Boy_Internal_Components_(no_labels).png

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

プルトニウム爆弾

- 原子炉で生成したPu-239には、自発性核分裂を起こす少量のPu-240が混入していて、分離困難。そのため、ウラン爆弾のように、砲身方式(核分裂性物質の塊2個の衝突)を用いると、中心部分だけが早期に臨界を越え、小さい爆発を起こし(過早爆発)、Pu-239全体が臨界を超える前に飛散してしまい、爆弾として使えない。
- →低密度のプルトニウムを周りの爆薬で爆縮させ(爆縮レンズ)、プルトニウムを中心に集めての一挙に全体が臨界を超えさせる爆縮方式を採用。



PD Wikipedia,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Implosion_Nuclear_weapon.png

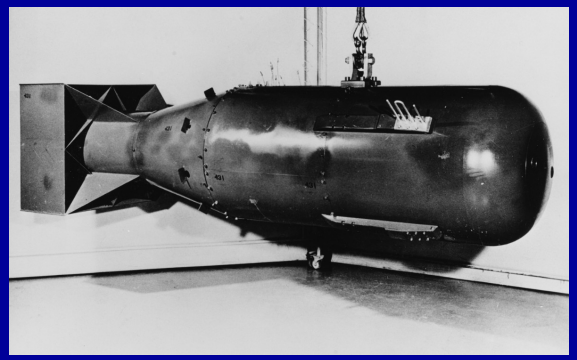
2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- ウラン爆弾:工学的原理は比較的単純であるが、ウラン濃縮コストと取扱い安全性の観点から、主流とはならなかった。

- プルトニウム爆弾:プルトニウム爆弾では、技術的に難易度が高い爆縮レンズを開発せざるをえなかった。そのため、実証実験として1945年7月16日に、ニューメキシコ州で核実験(トリニティ実験:世界初の核実験)を実施した。
- プルトニウムを核兵器として用いる際のこのような爆縮レンズなどの高い技術的障壁が、核不拡散に役立っている。

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

- 広島市にウラン爆弾リトルボーイ投下
- 1945年8月6日　8:15　爆撃機B-29 エノラゲイ



‡出典：Naval History and Heritage Command,
https://www.history.navy.mil/our-collections/photography/numerical-list-of-images/nhhc-series/nh-series/NH-123000/NH-123862.html

死者：約14万人
重軽傷者：79,130人
（数字出典：https://spaceshipearth.jp/atomic-bomb/）

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 長崎市にプルトニウム爆弾ファットマンを投下
- 1945年8月9日　11:02　爆撃機B-29 ボックスカー



PD U.S. Department of Defense, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fat_Man_(replica_of_nuclear_bomb).jpg

- 死者:73,884人
- 重軽傷者:74,909人
- (数字出典;https://nagasakipeace.jp/search/about_abm/scene/iryoku.html)

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

マンハッタン計画の医学的遺産

- **保健物理学（Health Physics）の名称誕生**：マンハッタン計画では研究者、作業者の健康管理部門として、Health Divisionが作られ、その中で、放射線防護、放射線影響を扱うのは物理学部署（Physics Section）であったが、Radiation Protection Section でなく、**Health Physics Section**と呼ばれた。
- **原爆被爆者の疫学調査**：被爆者集団の放射線健康影響の疫学調査データ→放射線防護の基盤の知識

  1947：原爆傷害調査委員会（ABCC:Atomic Bomb Casality Commission）の設立（米国）

  1975：放射線影響研究所（RERF:Radiation Effects Research Foundation）に改組（日米共同）

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 各国の最初の原爆核実験

- 1945.7.16　米国　(トリニティー実験)　Pu爆弾
- 1949.8.29　ソ連　Pu爆弾
- 1952.10.3　英国　Pu爆弾
- 1960.2.23　フランス　Pu爆弾
- 1964.10.16　中国　高濃縮U爆弾
- 1974.5.18　インド　Pu爆弾
- 1998.5.28　パキスタン　Pu爆弾
- 2006.10.12　北朝鮮　Pu爆弾

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- 核兵器の威力向上(原爆から水爆へ)
- 原爆はPu量を大型化すると、爆縮時の不安定性が大きくなる。

→原爆を起爆剤として、核融合反応を利用する水爆を開発。核融合の材料は重水素化リチウム(LiD)。

$^{6}Li + n \rightarrow He + T$

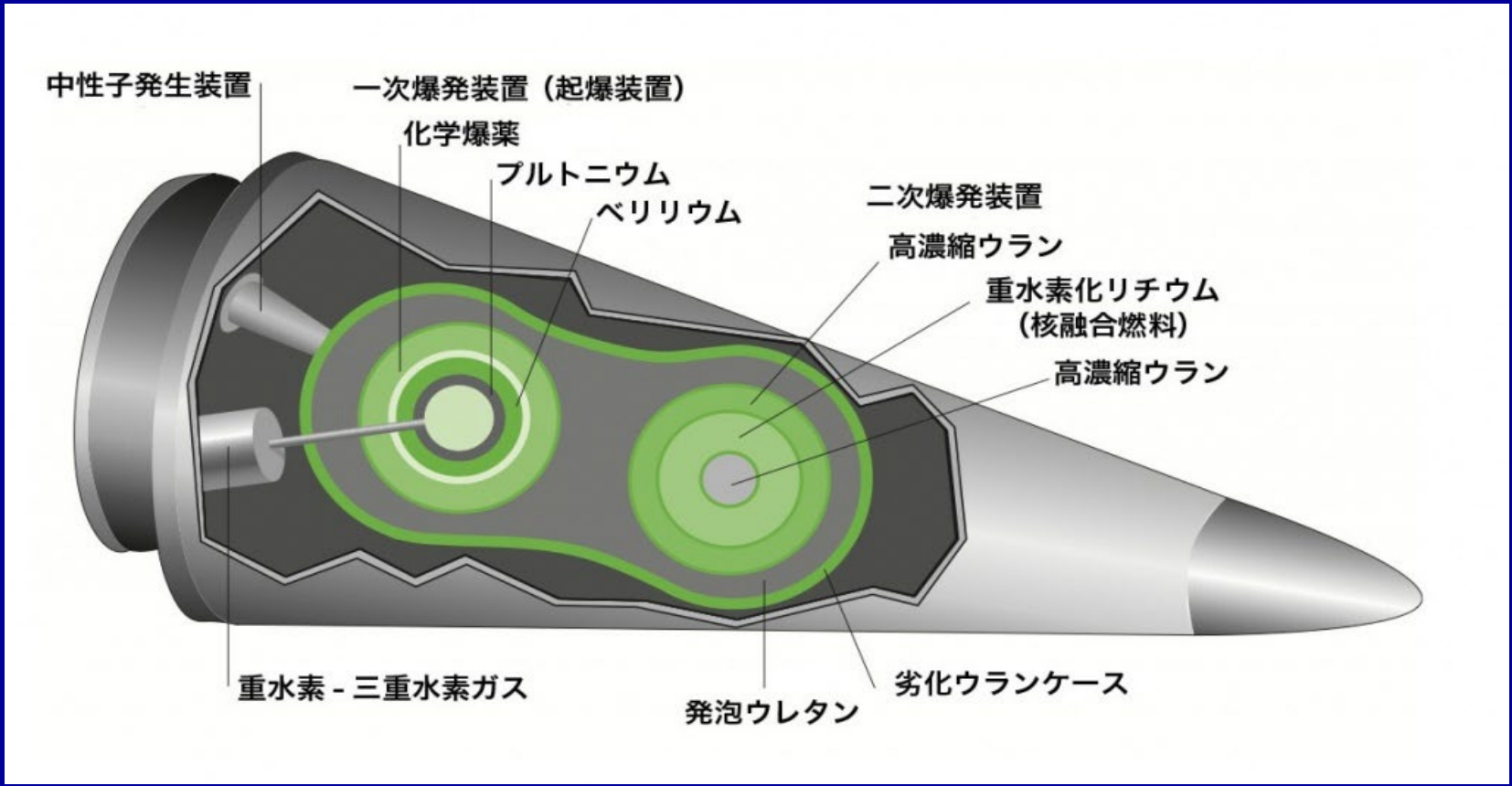
$T + D \rightarrow He + n +$エネルギー(核融合反応)

(D:重水素、T:トリチウム)

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

- **水爆(水素爆弾)**

米国ICBM搭載のW-87型核弾頭(水爆)



‡出典：長崎大学核兵器廃絶研究センター, https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/fms/nuclear_commentary

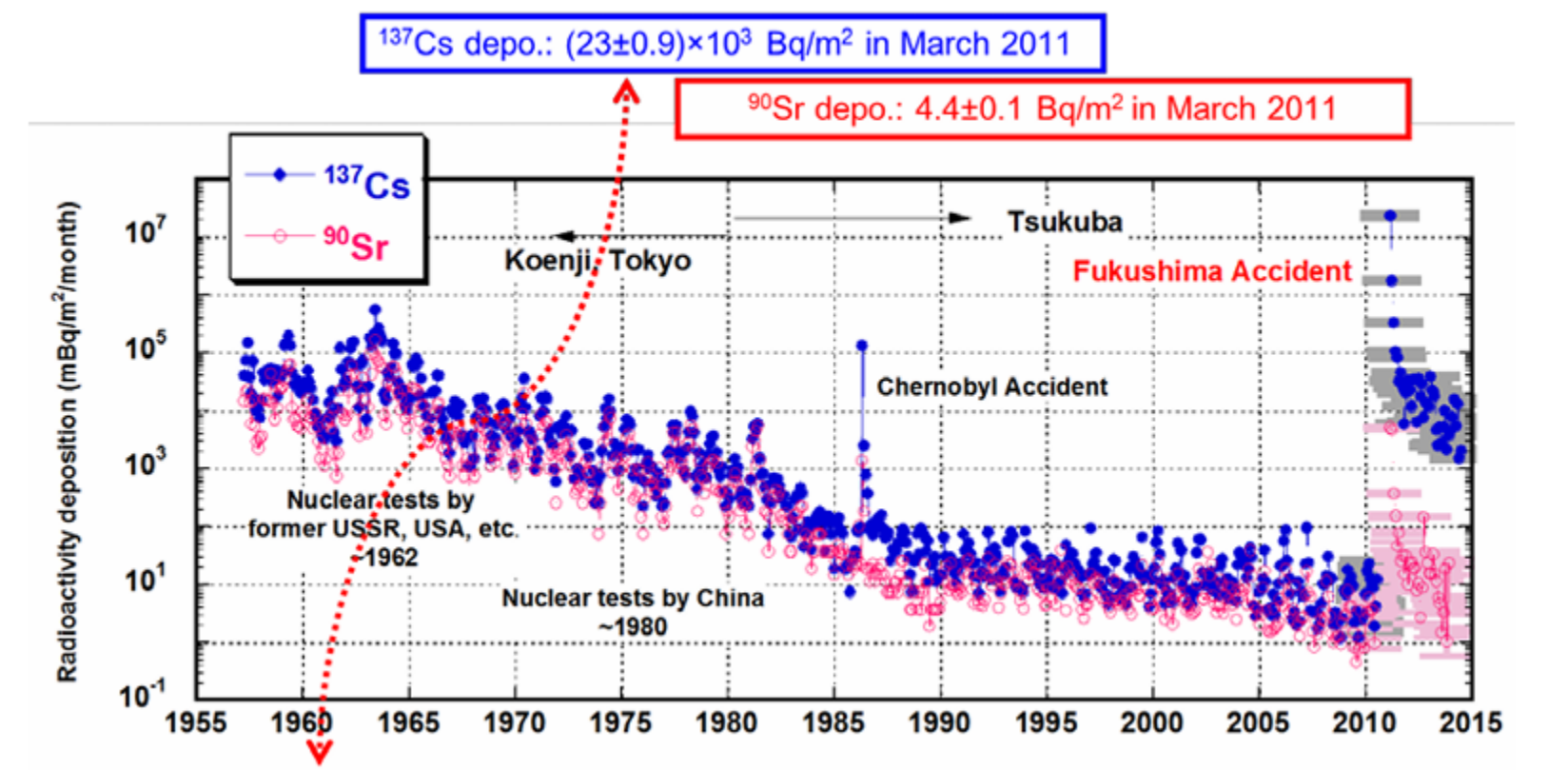
2. 原子力の兵器利用(核兵器)

各国の最初の水爆核実験

- 1952.11.1　米国(液体D,Tを用いた非実用兵器)
- 1954.3.1　米国(実用可能水爆)
- 1953.8.12　ソ連(ブースト型核分裂兵器)
- 1955.11.22　ソ連(実用可能水爆)
- 1957.11.8　英国
- 1967.6.17　中国
- 1968.8.24　フランス
- 2016.1.16　北朝鮮
- 合計　2379回の原水爆核実験(1945～2024現在)

2. 原子力の兵器利用（核兵器）

核実験のよる関東地方の環境放射能



出典：環境における人工放射能の研究 2015, 気象研究所 環境・応用気象研究部 予報研究部,
https://www.mri-jma.go.jp/Dep/ap/ap4lab/recent/ge_report/2015Artifi_Radio_report/2015Artifi_Radio_report.pdf

2. 原子力の兵器利用(核兵器)

第五福竜丸事件(ビキニ事件)

- マグロ漁船第五福竜丸は、米国が1954年3月1日、ビキニ環礁で行った水爆実験場の付近に居合わせたことにより、多量の放射性降下物を浴びた、乗組員23名が急性放射線症となった。
- 1名が、被ばくから約半年後の9月23日に死亡した。死因は被ばくによる再生不良性貧血→輸血による肝炎ウイルス症
- 1955年　国連は「原子放射線の影響に関する科学委員会(国連科学委員会:UNSCEAR（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）」設置を決議。政府調査によれば同時に被ばくした船が1422隻あった。

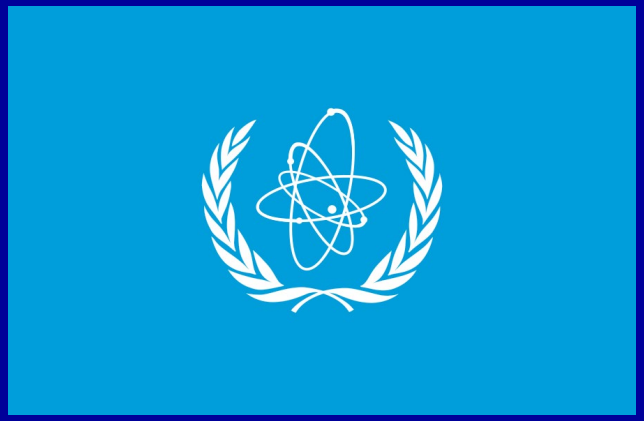
目次

- １．原子力に関する基礎知識
- ２．原子力の兵器利用（核兵器）
- ３．IAEAの設立と役割
- ４．原子力事故の歴史
- ５．リスクコミュニケーション

3．IAEAの設立と役割

国際原子力機関
（IAEA:International Atomic Energy Agency）

- 1953年　国連総会でのアイゼンハワー米国大統領の演説「Atoms for Peace」
- 1957年　IAEA設立（国連後援の自治機関）
- 本部はオーストリアのウィーン
- 加盟国：159ヵ国



3. IAEAの設立と役割

- IAEAの設立目的
  - ➢ 原子力の平和利用の促進

    原子力発電分野、非発電分野（医療、保健、産業利用など）、原子力安全、核セキュリティ、技術協力

  - ➢原子力の軍事利用転用の防止

    非核保有国の核物質が核兵器や他の核爆発装置へと転用されるのを防止・検知するために、核不拡散条約(NPT）第3条1項で、非核保有国はIAEAと包括的保障措置協定（**CSA**：**Comprehensive Safeguards Agreement**）を締結し、その保障措置（査察や検証）を受諾することが義務付けられている。

3．IAEAの設立と役割

核不拡散条約（NPT：Treaty on the Nonproliferation of Nuclear Weapons）

- 1970年の発効
- 米国、ロシア、英国、フランス、中国の5か国を「核保有国」*とし、それ以外の「非核保有国」への核兵器の拡散を防止するとともに、誠実な核軍縮交渉を義務づけ、さらに、原子力の平和的利用のための協力を促進することを主たる目的とする条約である。
- 締約国数は191か国・地域（北朝鮮を含む。ただし、北朝鮮は2003年に脱退を宣言）。2023年5月現在インド、パキスタン、イスラエル及び南スーダンは未加入。
- ＊NPTでは「1967年1月1日より前に核兵器を保有し核実験を実施した国」を核保有国と認めている。

3．IAEAの設立と役割

核不拡散条約(NPT)の問題点と限界

- CSA：包括的保障措置協定：NPTに加盟する非核保有国が対象であり、その国のすべての核物質と核活動に対してIAEAが保障措置（査察、検証）を適用する。これにより、IAEAはその国の核活動全般を監視する権限を持つ。非核保有国は締結の法的義務あり。
- VOA（Voluntary Offer Agreement：ボランタリーオファー協定）：核保有国（米、露、英、仏、中）が自発的に選定した特定の民間核施設に対して適用される。これにより、IAEAは選定された施設に対してのみ査察を行う。核保有国は締結の法的義務なし。

3. IAEAの設立と役割

- 包括的核実験禁止条約(CTBT: Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty)
- 宇宙空間、大気圏内、水中、地下を含むあらゆる空間での核兵器の核実験による爆発、その他の核爆発（資源探査など核兵器以外の核爆発利用）を禁止する条約。1996年に国連総会で採択。1997年に日本加入。
- 核兵器禁止条約（TPNW：Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons)
- 核兵器の開発、実験、製造、取得、保有、使用、威嚇などを禁止する国際条約。2017年に採択、核保有国は全て非加入であり、米国の拡大核抑止で、ロシア、中国、北朝鮮に対抗している日本も非加入。

3．IAEAの設立と役割

現代の核兵器の問題

- 核の水平拡散:Horizontal Nuclear Proliferation
- 核の垂直拡散：Vertical Nuclear Proliferation

- 核抑止：Nuclear Deterrence
- 拡大核抑止：Extended Nuclear Deterrence
- 核の傘：Nuclear Umbrella

目次

- １．原子力に関する基礎知識
- ２．原子力の兵器利用（核兵器）
- ３．IAEAの設立と役割
- ４．原子力事故の歴史
- ５．リスクコミュニケーション

4. 原子力事故の歴史

- ウクライナにあるロシア語表記のチェルノブイリ(Чернобыль)原子力発電所について、ウクライナの政府は、2022年に公式にウクライナ語の名称「チョルノービリ(Чорнобиль)」を使用することを決定した。しかし、国際的には依然として「チェルノブイリ」という名称が広く知られているため、ここでは従来どうりの「チェルノブイリ」を使用する。

4. 原子力事故の歴史

- INES（国際原子力・放射線事故尺度）
- スリーマイル島2号機原発（TMI-2）事故(1978)
- チェルノブイリ4号機原発事故(1986)
- JCO臨界事故（1999)
- 福島第一原発事故（2011)
- 事故後に原子力施設の安全性向上のために設立された自主規制組織

4. 原子力事故の歴史

INES（国際原子力・放射線事故尺度）

- 国際原子力・放射線事象評価尺度:INES（International Nuclear and Radiological Event Scale）は、原子力発電所などの事故やトラブルについて、それが安全上どのような意味を持つものかを表すため、国際原子力機関(IAEA)と経済協力開発機構・原子力機関（OECD/NEA）が定めたもので、1992年から運用されている。原子炉などの損傷程度や放射性物質の放出量などを基準に、0～7のレベルが決められる。

4. 原子力事故の歴史

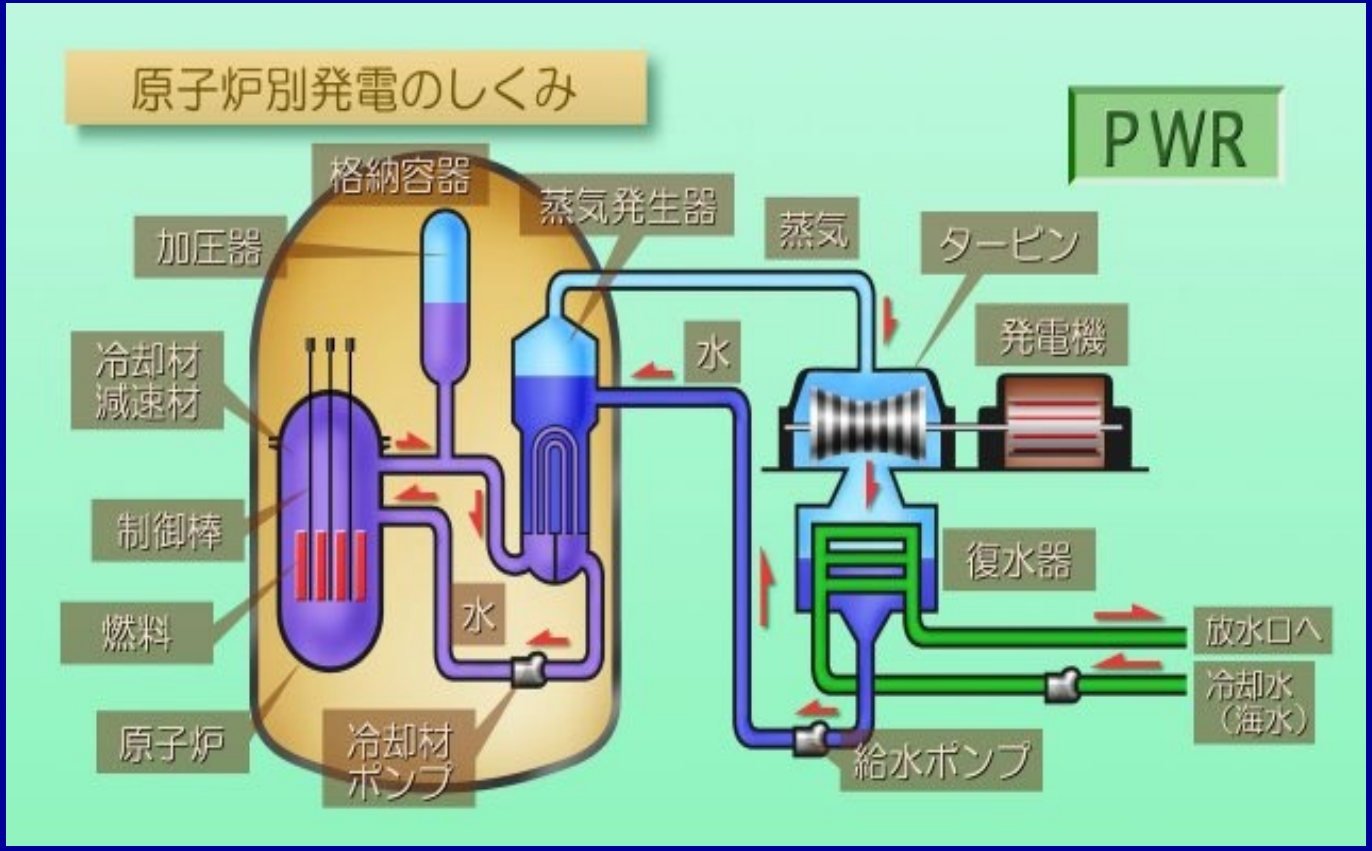
INES

レベル	放射性物質の事業所外への放出	事業所内への影響	事例
7　深刻な事故	重大な外部放出	原子炉・放射性物質障壁の壊滅・再建不能	チェルノブイリ事故 福島第一事故
6　大事故	かなりの外部放出	原子炉・放射性物質障壁の致命的被害	キシュティム事故
5　広範囲な影響を伴う事故	限定的な外部放出	原子炉炉心・放射性物質障壁の重大な損傷	チョークリバー事故 ウインズケール火災 スリーマイル島事故 ゴイアニア被ばく事故
4　局所的な影響を伴う事故	少量の外部放出	原子炉炉心・放射性物質障壁のかなりな損傷／従業員の致死的な被ばく	SL-1核反応炉事故 セラフィールド事故 JCO臨界事故
3　重大な異常事象	極めて少量の外部放出	重大な放射性物質による汚染／従業員の急性放射性障害発生する被ばく	動燃東海火災事故
2　異常事象		かなりの放射性物質による汚染／従業員の法定線量限度を超える被ばく	JAEA大洗Pu汚染事故
1　逸脱			
0　尺度未満			
評価対象外	安全性に関与しない事象		

4. 原子力事故の歴史

スリーマイル島2号機原発（TMI-2）事故

加圧水型軽水炉（PWR)による原子力発電所の仕組み



‡出典：福井県原子力環境監視センター, https://www.houshasen.tsuruga.fukui.jp/pages/radiation/plant/pwr.html

4. 原子力事故の歴史

スリーマイル島2号機原発（TMI-2）事故

事故の経緯

- 1978.3.28　米国ペンシルベニア州
- 制御用空気系の故障で2次系の主給水系ポンプ停止
- 原子炉一次冷却水の温度、圧力上昇
- 「加圧器逃し弁」が開き、原子炉は緊急停止し、圧力低下
- 一次系圧力低下のとき閉じるべき「加圧器逃し弁」が故障して、固着→一次冷却水の流出
- 運転員の判断ミスでECCS(非常用緊急冷却装置)停止

→炉心の2/3が露出して、燃料破損と水素発生（水と燃料被覆管のZrとの反応）。

・ECCS手動起動による冷却と水素除去により事故収束

4. 原子力事故の歴史

スリーマイル島2号機原発（TMI-2）事故

運転員の認識ミスと対応の遅れ

運転員が事故の進行を正しく認識できなかった。

一次冷却水が流出して、様々な警報が出ているにも拘わらず、局所的に沸騰して、加圧器の水位計の数値が上昇したことだけに着目。一次系冷却水は増加していると誤判断して、ECCS（非常用緊急冷却装置）を停止した。

放射性物質の漏洩と影響

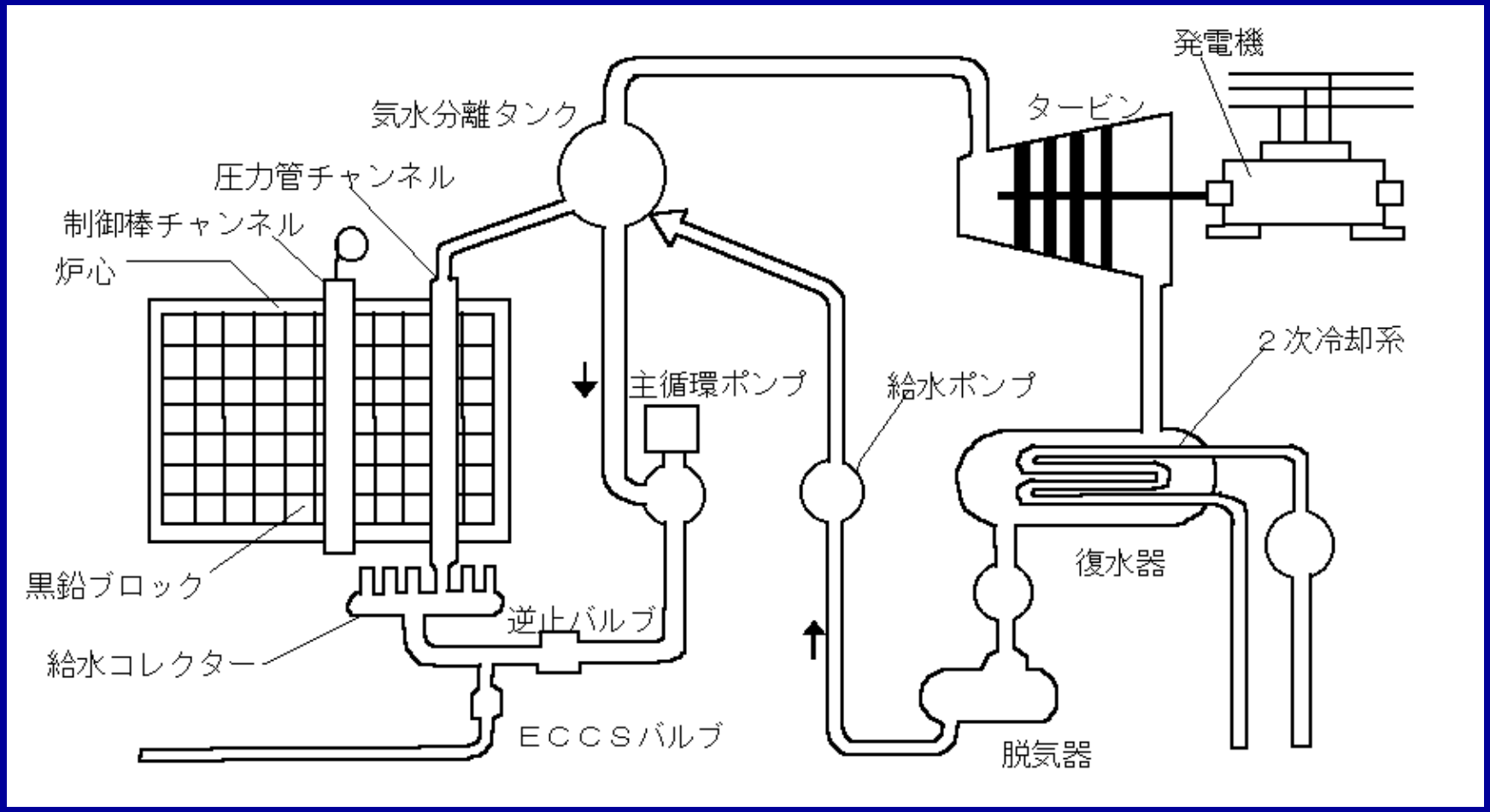
大半の放射性物質は原子炉格納容器内に留まったが、一部の放射性希ガス、およびI-131等が放出された。

事故時にプラント周辺にいたと仮定した場合の被ばく線量は、1mSv以下であり、また5マイル（約8km)以内に住んでいた人の平均仮定線量は0.09mSvと推定された。（5マイル以内の妊婦、乳幼児には退避勧告が出された。）

4. 原子力事故の歴史

チェルノブイリ4号機原発事故

黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉(RBMK)による原子力発電所の仕組み

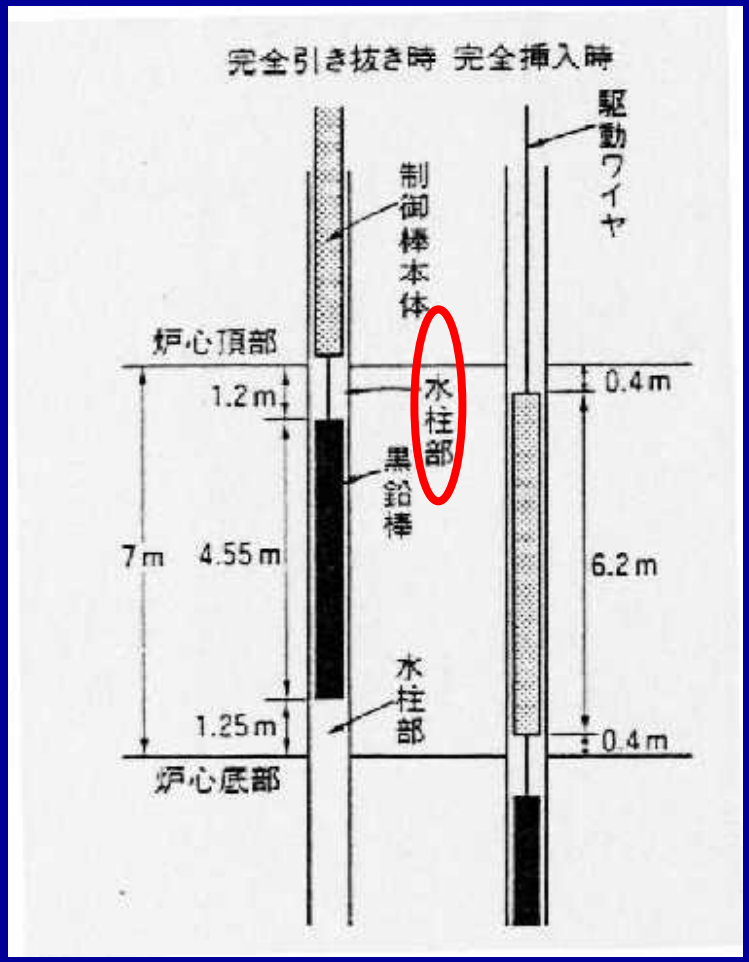


‡出典:チェルノブイリ原発事故, RBMK型原子炉の仕組み, 今中哲二, https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/Chernobyl/Henc.html

4. 原子力事故の歴史

チェルノブイリ原子炉の制御棒構造

この制御棒本体部は、ボロンが入っており、中性子を吸収しやすいので核分裂を抑えるが、水柱部は、中性子のエネルギーを下げる働きがあるため、核分裂を促進する。



‡出典：PBMK炉の制御棒の概略, 今中哲二, https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/Chernobyl/GN/GN9204.html

4. 原子力事故の歴史

チェルノブイリ4号機原発事故

事故の経緯

- 1986.4.26　　ウクライナ（旧ソ連）
- 原子炉の低出力で所内電力を得る実験を実施
- 原子炉出力を低下させた→予定どおり実験が開始できず→炉内に中性子を吸収しやすいXe-135が蓄積→核分裂が減少して出力が予定より低下→出力回復のため制御棒を引き抜く→Xe-135の急激な減少と冷却水のボイド発生のため、水に吸収されない中性子が増加して、核分裂数が急増し、原子炉出力が不安定化→制御棒を挿入したが、制御棒の特性上、急激に出力上昇し、暴走（即発臨界）→水蒸気爆発→黒鉛と水蒸気反応→H_2とCOの生成と爆発（格納容器が無いため外部へ放射性物質放出）、黒鉛の燃焼火災発生

4. 原子力事故の歴史

事故の要因

事故当初は運転員の規則違反が原因とされたが、1991年には制御棒の構造の問題が要因とされた。

緊急事態作業員への影響

大規模な黒鉛火災鎮火のため、消防士など237名が対応し、2.3～16Gy被ばくした93人のグループから、28人が3か月以内に死亡した。主な死因は火傷であるが、急性放射線障害（骨髄、腸）の症状が見られた（UNSCEAR 報告書2008）。

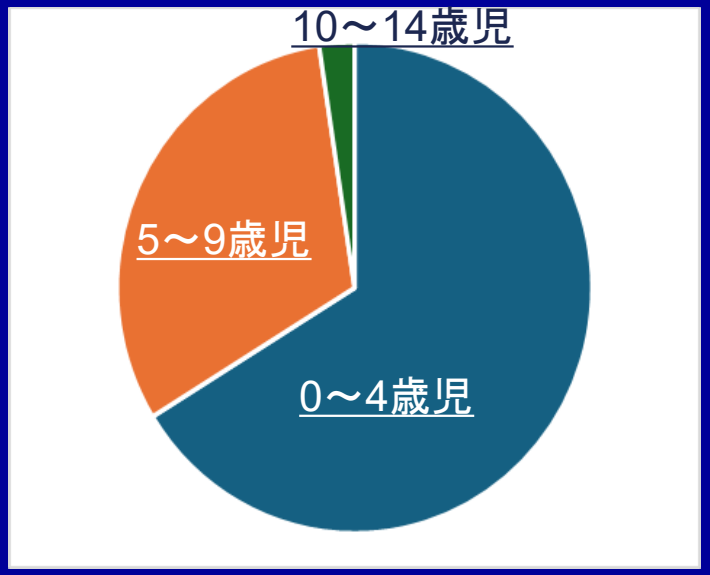
4. 原子力事故の歴史

チェルノブイリ事故における小児甲状腺がん

UNSCEAR2008

- 1991～2005年　6848例（18歳未満）、5127例（14歳未満）
- 1991～2015年　19233例（18歳未満）　UNSCEAR2018白書

小児甲状腺がん発症者の被ばく時年齢群別の割合



食物連鎖によって汚染した野菜や牛乳、肉を食べた子供たちの中で、小児甲状腺がんが発症した。事故数年後から、とくに被ばく時年齢0～4歳児の発症割合が多かった。

図の数値出典：”菅谷昭ほか：ベラルーシにおけるチェルノブイリ原発事故後の小児甲状腺ガンの現状“の表2の数値より作成：
https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/Chernobyl/saigai/Sgny-J.html

4. 原子力事故の歴史

JCO臨界事故

核燃料製造会社JCOで高速増殖実験炉常陽向けの燃料の原料となるウラン濃縮度18.8%（U-235／U-238+U-235）の硝酸ウラニル溶液（$UO_3(NO_3)_2$）を製造中に発生（ 軽水炉燃料濃縮度3～5%）

1999.9.29

- 規則違反で、手作業により沈殿槽に硝酸ウラニル溶液（金属ウラン質量換算約9.6kg）をバケツ注入。

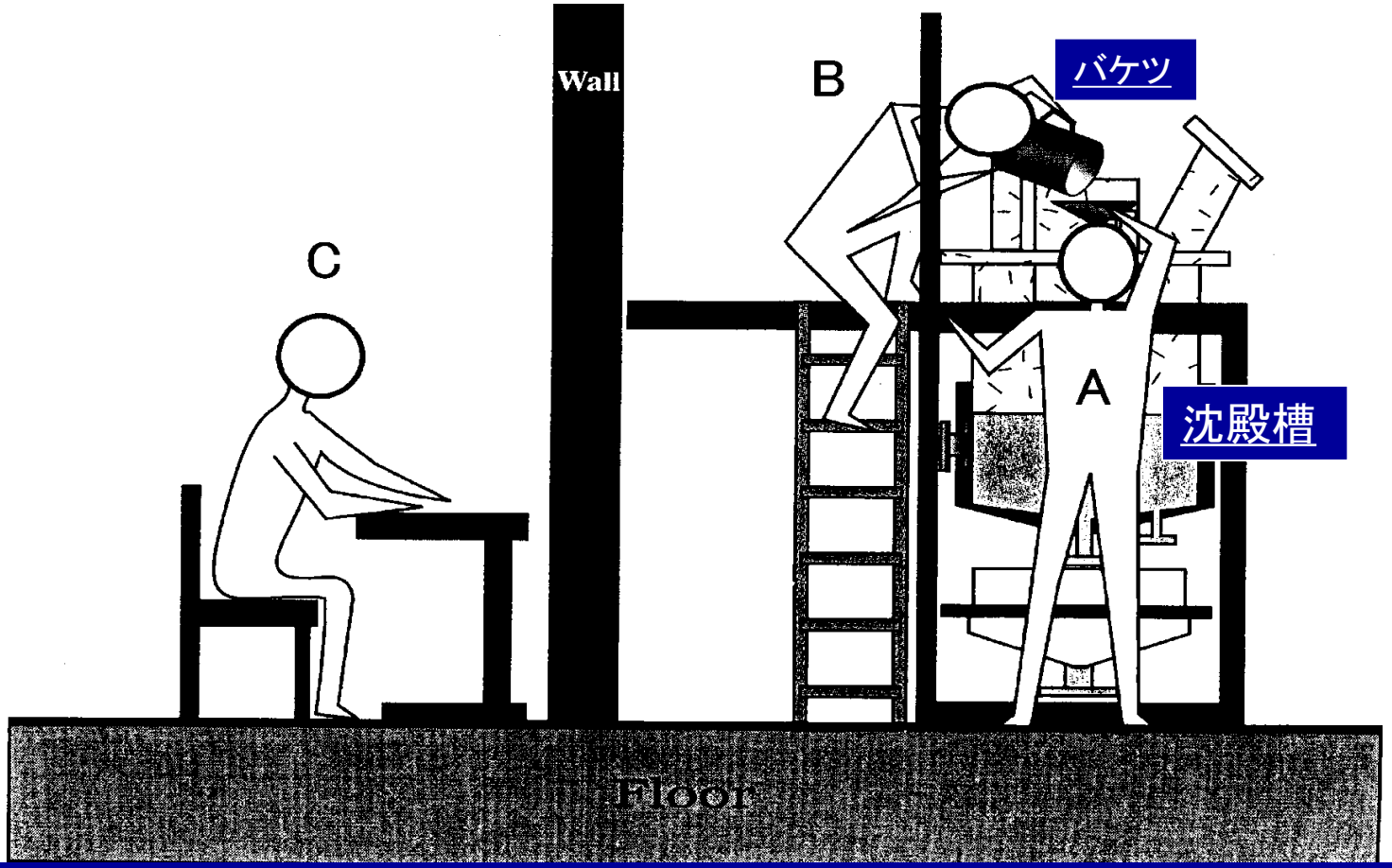
1999.9.30

- 引き続き手作業により沈殿槽に硝酸ウラニル溶液（金属ウラン質量換算約7.2kg）をバケツで注入。
- 10:35頃沈殿槽内の硝酸ウラニル溶液が即発臨界に達し、警報装置が鳴る。

4. 原子力事故の歴史

JCO臨界事故

JCO臨界事故が発生した時の作業者の位置関係

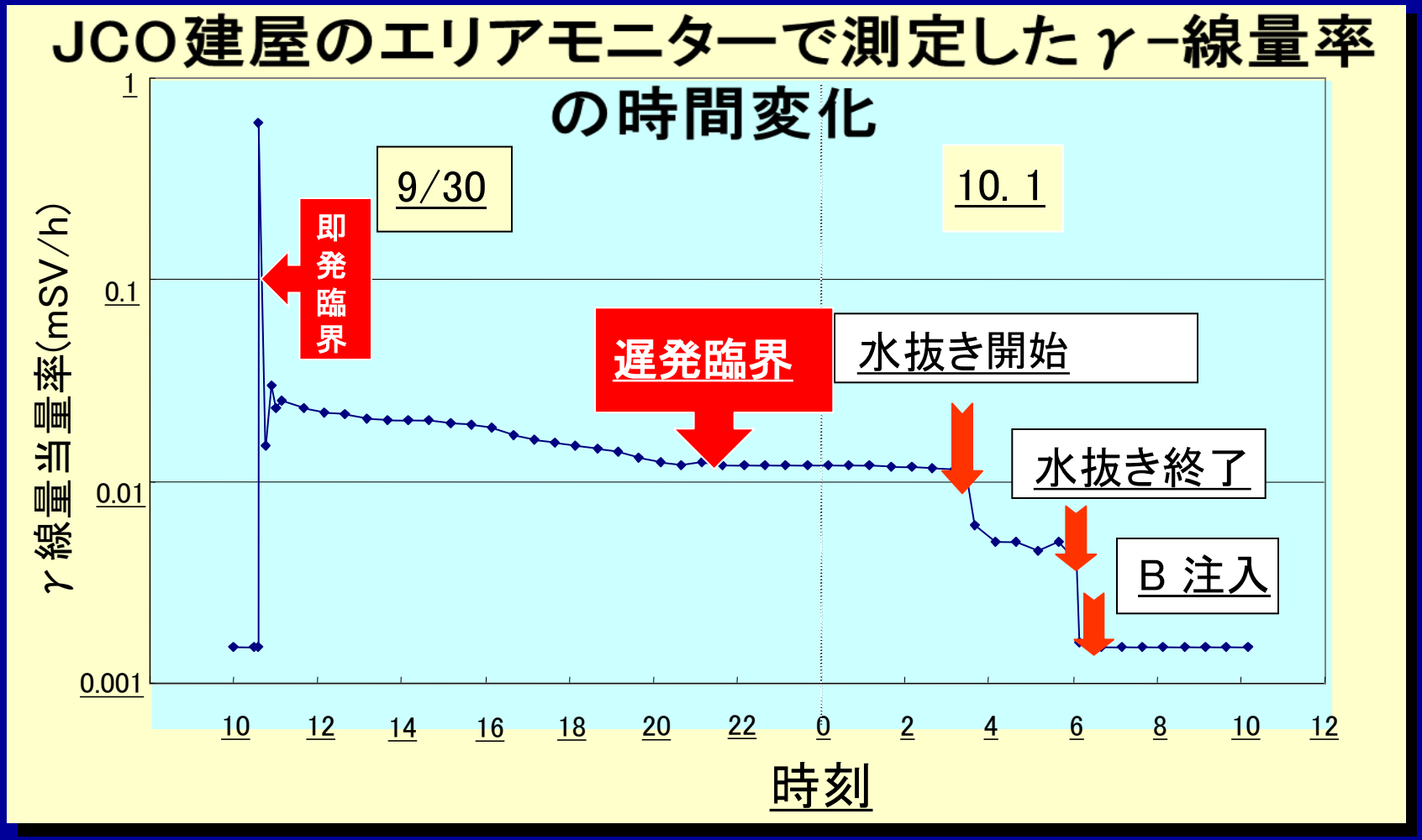


図の出典：河内清光作成ppt　JCO事故における被ばく患者の物理的線量評価　p. 43の図（私信）

4. 原子力事故の歴史

JCO臨界事故

臨界状態の変化と収束



4. 原子力事故の歴史

JCO臨界事故

事故の影響（中性子とγ線の外部被ばく）

- 事故現場の3名の作業者
-

作業者	線量（GyEq）	経過
A	16～24.5	1999.12.21　死亡
B	6～9.4	2000.4.27　死亡
C	2～5	1999.12.20　退院

- JCO作業者169名：　48～0.06mSv
- 緊急作業者260名:　9.4～0.0002mSv
- 住民　264名：　16～0mSv

4. 原子力事故の歴史

JCO事故

事故の要因

- 事故の直接的原因は、「硝酸ウラニル溶液を均一化する作業中に、そもそも使用目的が異なり、また臨界安全形状に設計されていない沈殿槽に、事業者が安全確保のための手順を逸脱して、臨界量以上のウランを含む硝酸ウラニル溶液を注入したこと」である。
- （引用：https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2013pdf/20130308131.pdf）
- 何故、作業手順を逸脱する行動をとったのか？
  - 作業者の考え方
  - 経営者の考え方

4. 原子力事故の歴史

JCO臨界事故の図、数値に関する出典:

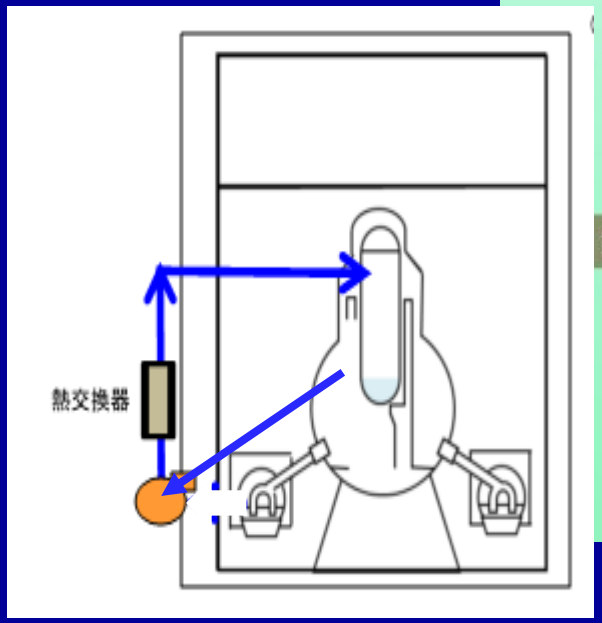
- 1. 放射線医学総合研究所:ウラン加工工場臨界事故患者の線量推定 中間報告書　NIRS-M-138 （2000）
- 2. 放射線医学総合研究所:ウラン加工工場臨界事故に対する環境測定 ・線量推定　NIRS-M-150　(2001)
- 3. 放射線医学総合研究所:東海村ウラン加工工場臨界事故に関する放医研報告書　NIRS-M-143 （2001）
- 4. 放射線医学総合研究所:ウラン加工工場臨界事故患者の線量推定 最終報告書　NIRS-M-153 （2002）
- 5. T.Momose et al., Dose Evaluation Based on 24Na Activity in the Human Body at the JCO Criticality Accident in Tokai-mura J.Radiat.Res. 42 Suppl. S95-105 (2001)
- 6. 科学技術庁資料 （株）ジェー・シー・オー東海事業所臨界事故に係わる一時滞在者及び防災業務関係者等の線量評価について(2000年10月13日）

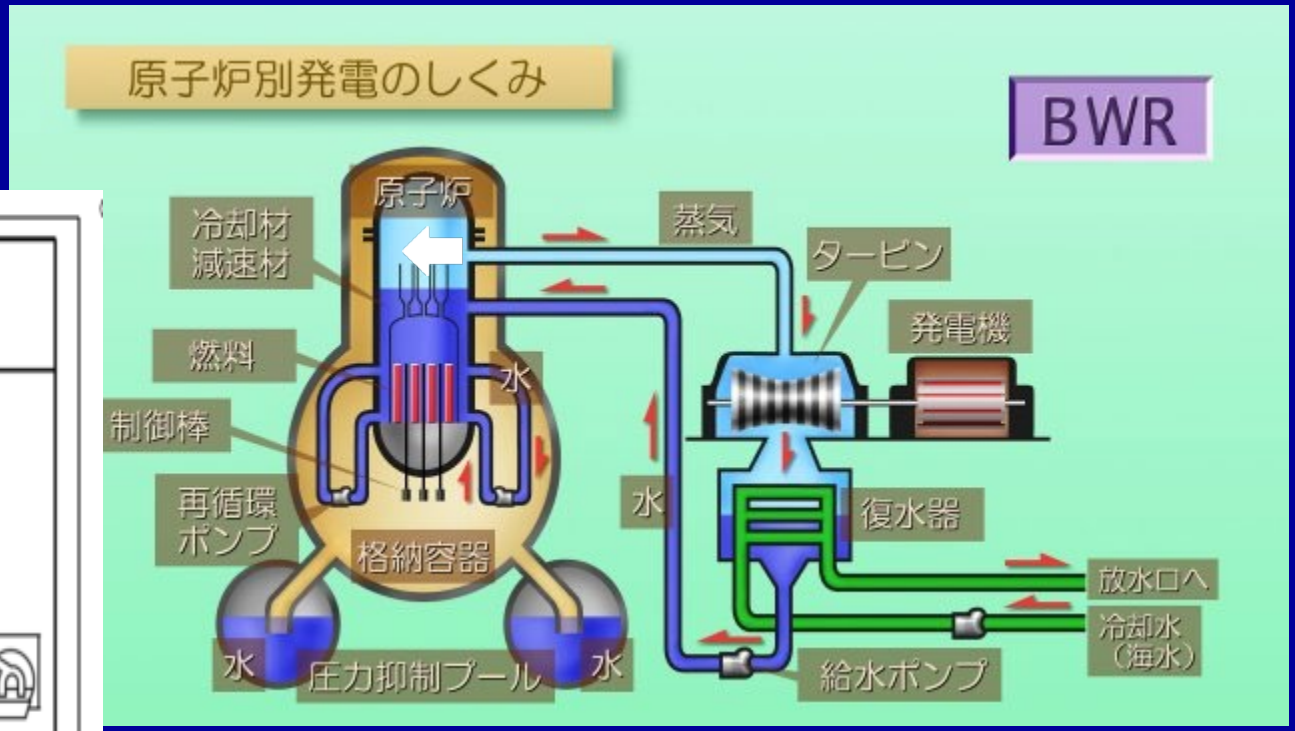
4. 原子力事故の歴史

福島第一原子力発電所事故

沸騰水型軽水炉(BWR)による原子力発電所の仕組み

残留熱除去系





‡出典:福井県原子力環境監視センター,
https://www.houshasen.tsuruga.fukui.jp/pages/radiation/plant/bwr.html

‡出典:BWR原子炉冷却系統設備の概要(平成23年11月25日), 原子力安全・保安院,
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9498833/www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/28/003/3-1.pdf

4. 原子力事故の歴史

福島第一発電所事故

事故の経緯

- 2011.3.11　東日本大震災による運転中原子炉(1～3号機)緊急停止(4号機は定検中)、外部電源喪失→非常用ディーゼル発電機作動
- 地震発生50分後、津波のため非常用ディーゼル発電機が水没し機能喪失

→残留熱除去系、ECCS(非常用緊急冷却装置)など使用不可能

→1～3号機は、冷却ができず、炉心溶融、水素発生、圧力容器破損(1,3号機)、格納容器に穴(1,2号機)

2011.3.12　1号機建屋で水素爆発

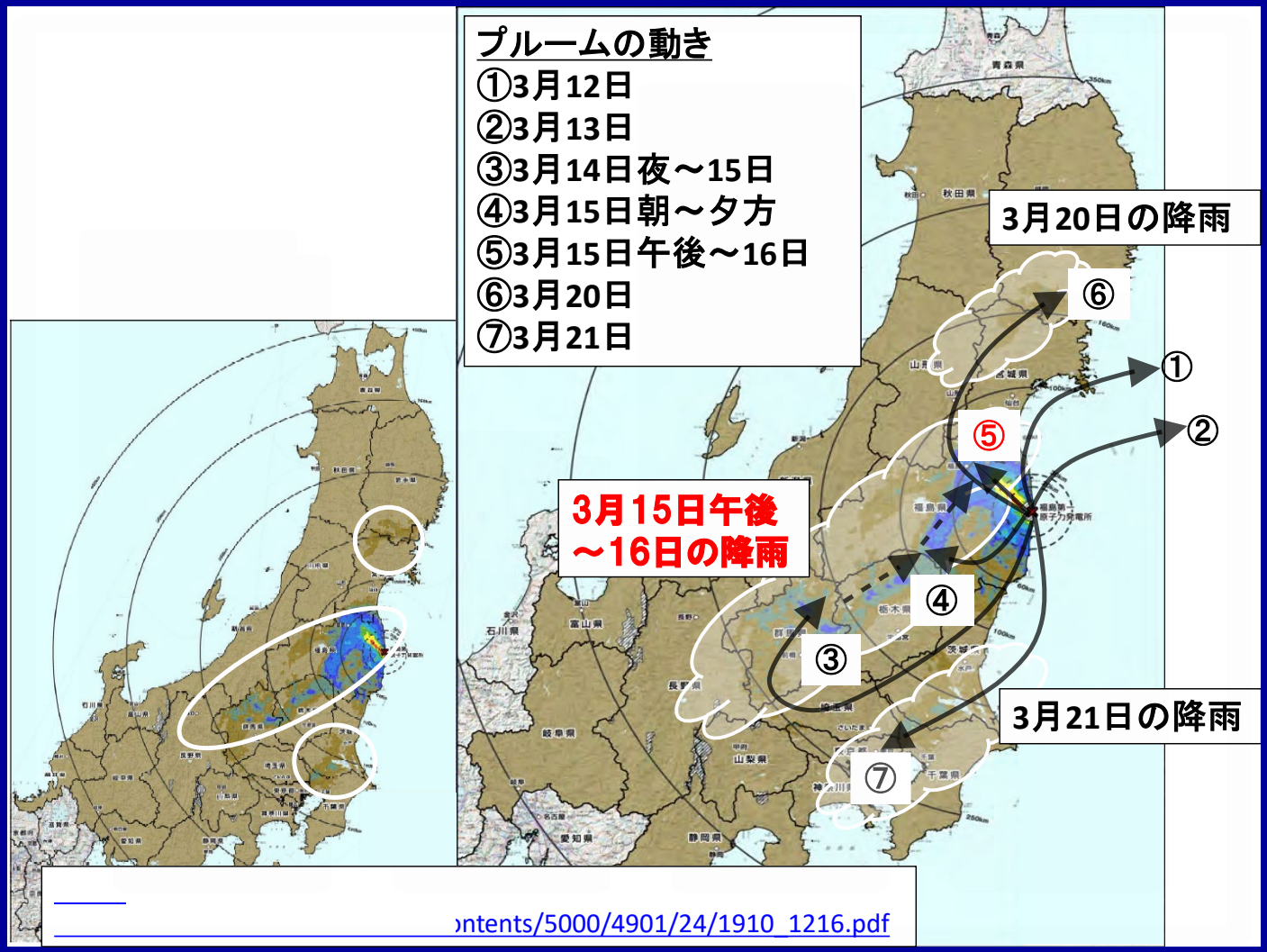
2011.3.14　3号機建屋で水素爆発

4. 原子力事故の歴史

- 2011.3.15　4号機建屋水素爆発（3号機由来の水素）
- 2011.3.15　2号機格納容器破損により、大量の放射性物質が外部に放出され、特に北西方向に流れ、降雨の影響で沈降。

4. 原子力事故の歴史

放出された放射性物質の拡散



‡出典：文部科学省

4. 原子力事故の歴史

福島第一事故で環境に放出された放射能量

核種	福島第一(PBq)	福島第一／チェルノブイリ
Xe-133	11000	1.69
I-131	160	0.09
Cs-134	18	0.38
Cs-137	15	0.18
Sr-90	0.14	0.01

PBq=10^{15}Bq

放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料, 平成29年版, 環境省
（https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-02-02-05.html）のデータをもとに作成

4. 原子力事故の歴史

福島県民健康調査での小児甲状腺がん

- 福島第一事故時に18歳以下の福島県民30万人に甲状腺がんの検査を実施して、2024年現在までの13年間で約200人の甲状腺がん発症者を発見した。
- 高感度超音波検査を行ったことで、自然発生の小児甲状腺がんを早期に発見している可能性大（発症年齢、遺伝子変異の型、想定される外部・内部被ばく線量から検討した結果、チェルノブイリとは異なる）。
- チェルノブイリ事故とは異なり、福島事故による放射線被ばくの影響による小児甲状腺がんの増加は考えにくい。

4. 原子力事故の歴史

福島第一原発事故の要因

- 設計と立地の誤り
  - 非常用ディーゼル発電機が、大津波で水没する位置に設置されていた（米国における設計をそのまま導入。海抜が低い方が、冷却用海水取水電力消費が少）。
  - 巨大津波来襲対策よりも、経営上の問題解決を優先
- 海外の原発の大事故に対する反応
  - TMI-2事故に対しても、炉心が損傷しても、格納容器があるため、外部への影響は小さいと評価。
  - チェルノブイリ事故に対しては、炉型と社会体制の違いのみ強調。

参考文献：北村俊郎, 原子力学会誌, 55 (6), pp. 338-341(2013)

4. 原子力事故の歴史

事故後に原子力施設の安全確保のために設立された自主規制組織

- INPO（米国原子力発電運転協会）：TMI事故を受けて、1979年に米国発電事業者が設立。専門家（現場実務経験者）による原子力発電所の安全性の相互評価（ピアレビュー）、支援活動を行う。INPOの活動を通じて得られた信頼性の高い発電所評価データは、保険会社がリスクを適切に評価し、発電所の運営者が必要な保険を取得するための基盤となっている。
- OSART（運転管理調査チーム）：1982年にIAEAが組織化。原子力発電所の安全性についてIAEA加盟国へ専門家調査団を派遣して助言及び援助を行うため、当初は開発途上国への技術援助が目的であったが、現在は、先進諸国でも原子力の安全対策に協力する目的でOSARTを受け入れるところが出てきている。

4. 原子力事故の歴史

事故後に原子力施設の安全性向上のために設立された自主規制組織

- WANO（世界原子力発電事業者協会）：チェルノブイリ事故を受けて、世界の原子力発電事業者が、相互交流により原子力発電所の運転の安全性と信頼性を高めることを目的に1989年5月に設立。
- INSAF（世界核燃料安全ネットワーク）：JCO事故を受けて、国内外の核燃料サイクル事業者が、安全に関する情報を交換する組織で、2000年4月に設立された。
  安全情報および社会的受容性に関する情報を、主としてインターネット上で行う活動を実施。

4. 原子力事故の歴史

事故後に原子力施設の安全確保のために設立された自主規制組織

- NSnet(ニュークリアセイフティネットワーク):
  JCO事故を受け、国内の原子力事業者(電力会社、プラントメーカーなど)が、日本版WANOを目指して、1999年に設立。専門家(現場実務経験者)による原子力プラントの相互評価(ピアレビュー)、安全技術支援活動、原子力学会の学会標準作成の支援を実施。2005年、JANTI(日本原子力技術協会)が設立され、事業は引き継がれた。
- JANSI(原子力安全推進協会):福島事故を受けて、2012年に国内の原子力事業者が、原子力発電プランントの安全性追求のためにJANTIを改組して設立。特に、専門家(現場実務経験者)による原子力プラントの相互評価(ピアレビュー)を強化し、日本版INPOを目指す原子力産業界の自主規制組織。

目次

- １．原子力に関する基礎知識
- ２．原子力の兵器利用（核兵器）
- ３．IAEAの設立と役割
- ４．原子力事故の歴史
- ５．リスクコミュニケーション

5. リスクコミュニケーション

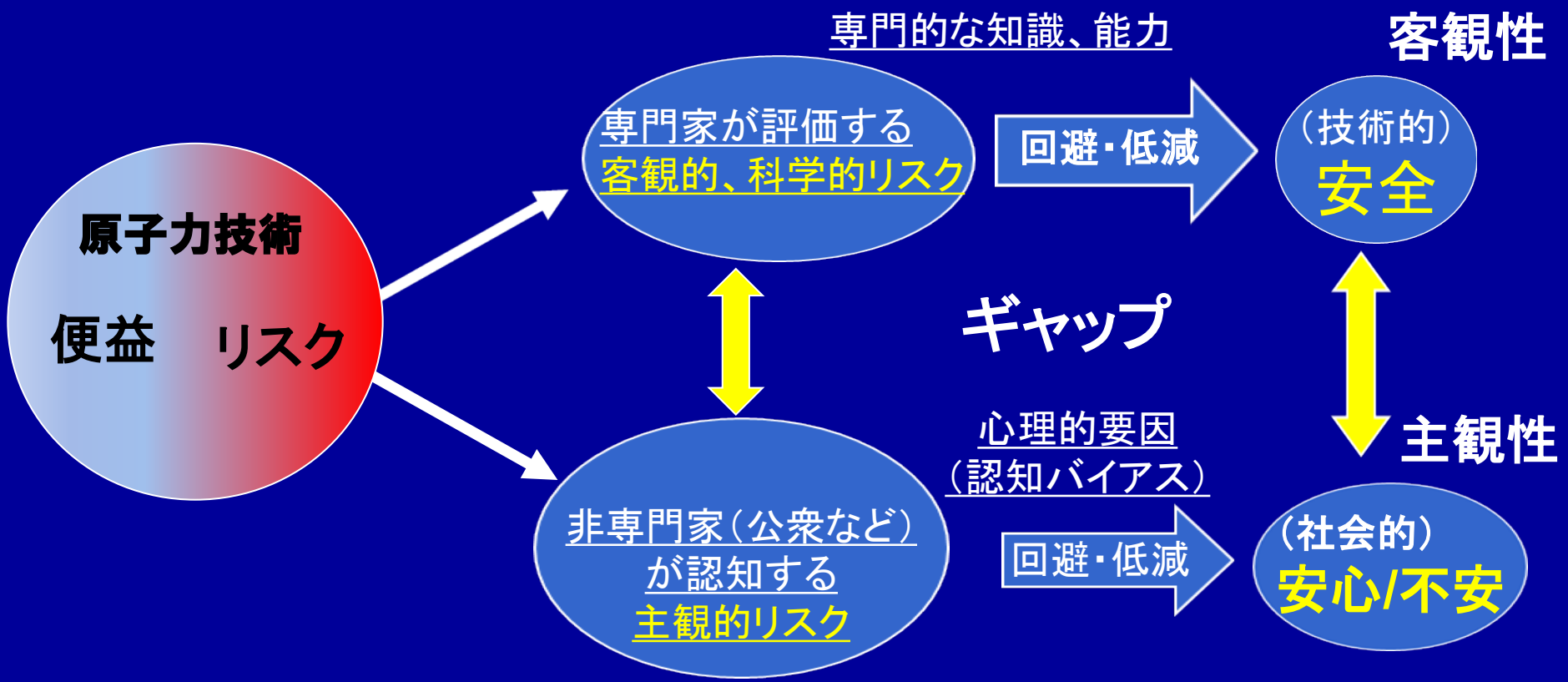
- Danger(デインジャー):回避しがたい危険要因(Hazard)に対して、対応できず、受け身となる立場の人々にとっての危険
- Risk(リスク):回避しがたい危険要因(Hazard)に対して、予測、観測、評価、対策をとることができる可能性がある人々にとっての危険

- 危険要因(Hazard) → 対応できない人:Danger
  → 対応できる人:Risk

参考:鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

- 原子力技術の便益(Benefit)とリスク（Risk)



参考：鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

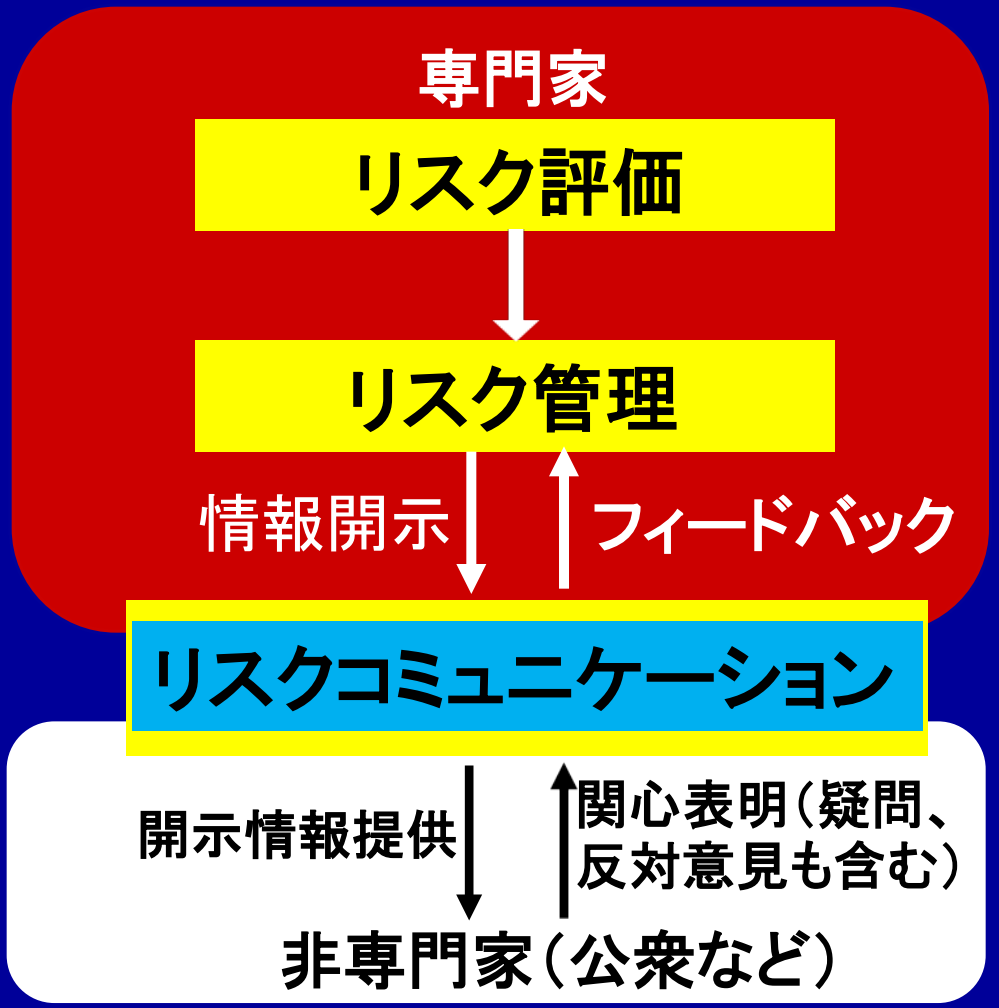
- 技術的な「**安全（Safety)**」を提供するだけではなく、社会的な「**安心(Pease of mind)**」に貢献することも専門家の役割

- 原子力技術に関するリスクコミュニケーション

  環境問題や科学技術に対して、社会全体(とくに利害関係者：Stakeholder）でリスク情報を共有し、情報交流を通じて、合意形成(Consensus building)を図ること

5. リスクコミュニケーション

- リスクコミュニケーションの方法



リスク＝損失規模×発生確率
客観的、定量的の評価

リスクの損失規模と発生確率に応じたリスク管理
（詳細は次頁）

知識、認識のギャップを埋める

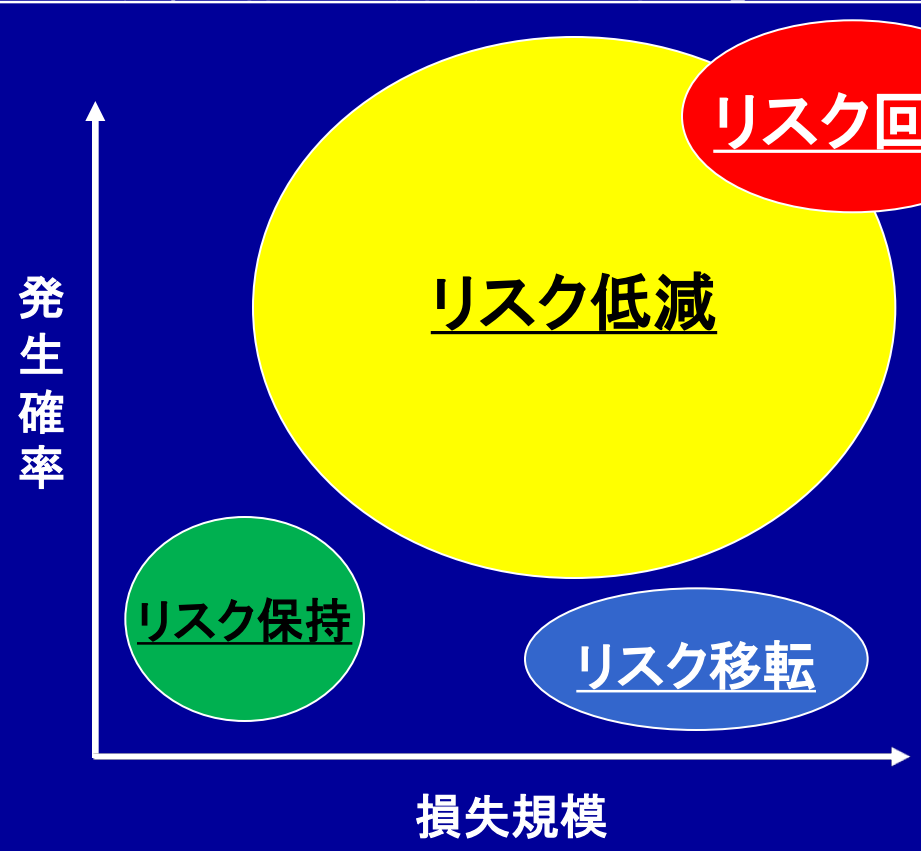
専門的、技術的なことはよくわからない

参考：鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

- リスク管理（Risk management）

安全性、環境保全性、経済性の「価値」のバランス



リスク回避：リスク要因のない代替え手段を探すこと

リスク低減：損失規模や発生確率の低減対策をとること

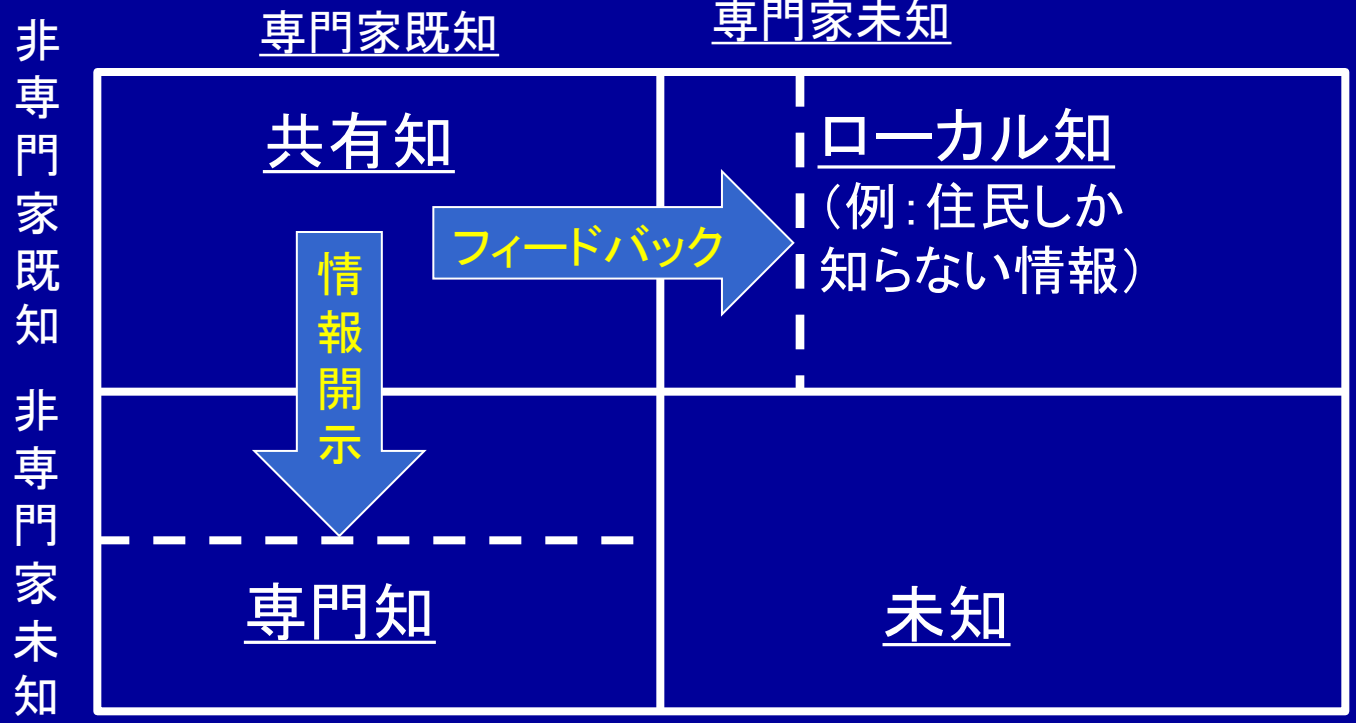
リスク移転：保険(生命、財産など）の保険をかけること

リスク保持：リスクを受入れ、保持すること

参考：鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

- リスクコミュニケーションの目標は「専門家と非専門家（公衆など）の共有知領域を可能な限り拡大すること」 → 合意形成をめざす。



参考：鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

合意形成が困難なケース

- 「客観的なリスク評価に基づく安全性」が高くても、非専門家（公衆など）の「不安感を払拭することが容易でない」場合

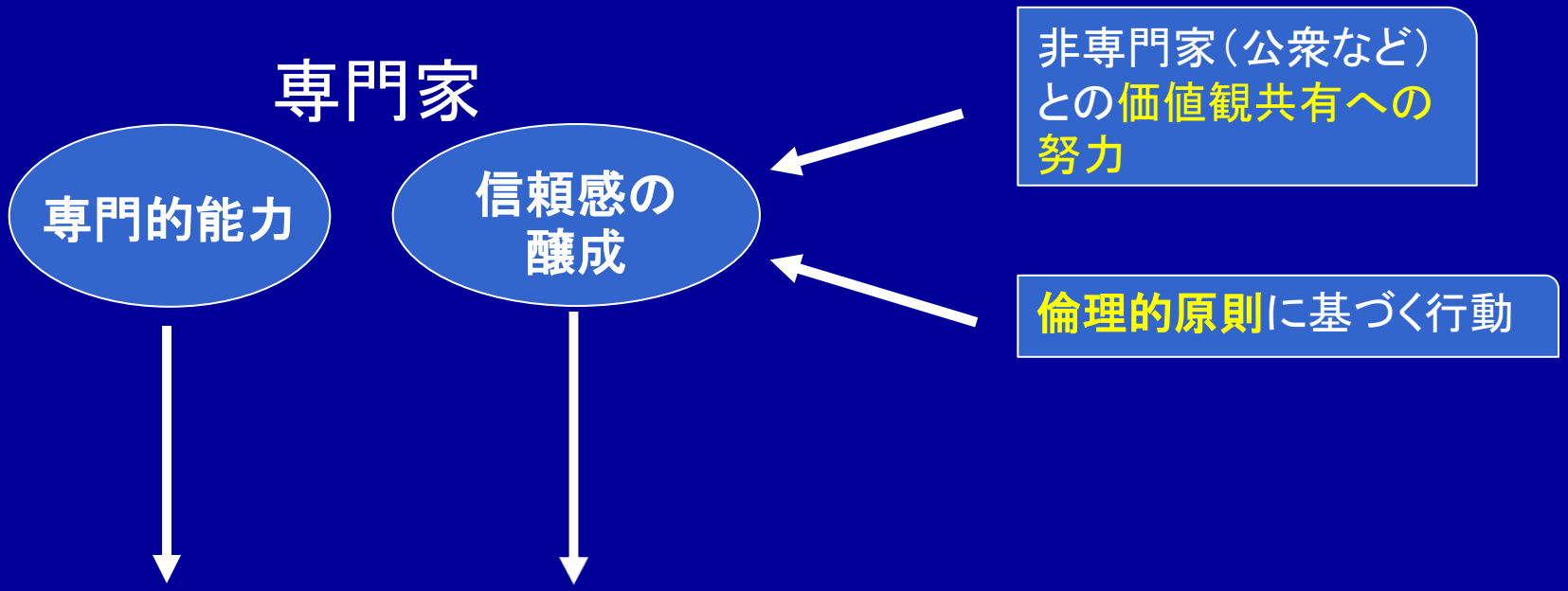
  →合意形成が困難

- 原因：専門家が非専門家（公衆など）の「信頼」を得られていない場合

参考：鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

- 「安全」を「安心」に繋ぐために



安全 ✚ 信頼 ➡ 安心 ➡ 合意形成

5. リスクコミュニケーション

- 専門的能力:リスク管理の妥当性の説明

  安全性、環境保全性、経済性のバランスの妥当性

- 価値観の共有への努力: 人の価値観は多様であるが、他者との価値観の相違を認識し、それを尊重する努力
  - 何故必要なのか
  - 誰の利益になるのか

参考: 鳥羽瀬孝臣, リスクコミュニケーションに求められる倫理, pp. 4-7, 技術士2010.1

5. リスクコミュニケーション

- 倫理的原則に基づく行動：
  - （1）説明責任（Accountability）：意思決定者の義務
  - （2）透明性（Transparency）：審議や決定の情報開示
  - （3）包括性（Inclusiveness）：**Stakeholder*** の参加

＊放射線防護では**Stakeholder** は「利害関係者」と訳される。ただし、利害関係者には多様な立場の人々が含まれていることに注意し、意見表明の不平等性の発生に注意が必要。「包括性」とは一般的には、公衆（住民など）などの意思決定プロセスへの参加。

参考：ICRP Publ. 138「放射線防護体系の倫理基盤」