

京都大学技術職員研修  
(第45回)

## 原子炉のシビアアクシデントに関する研究

令和2年9月18日

京都大学百周年時計台記念館2階  
国際交流ホールI 他 オンライン講義  
京都大学工学研究科原子核工学専攻  
元教授 杉本 純

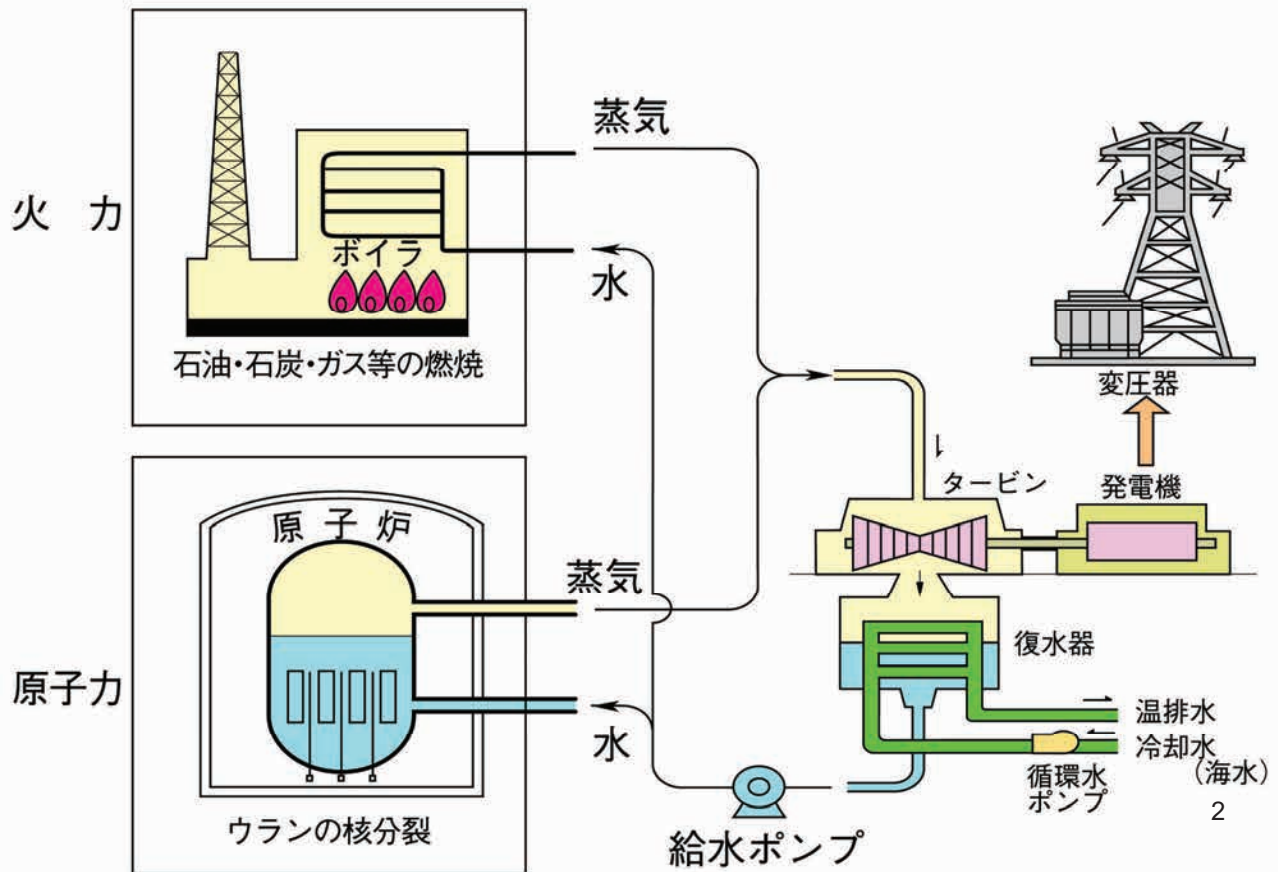
0

### 内 容

1. はじめに
2. シビアアクシデントの事例
  - ースリーマイル島事故
  - ーチェルノブイリ事故
  - ー福島第一原子力発電所事故
3. シビアアクシデントに関する研究
  - ー日本原子力研究開発機構
  - ー京都大学原子核工学専攻
4. これからの原子力
5. おわりに

1

# 火力発電と原子力発電の違い



## 1. はじめに

### ・原子炉施設の安全確保の基本的考え方

#### 深層防護(多重防護: Defense-in-depth)

「異常の発生を未然に防止するとともに、仮に異常が発生したとしてもそれが事故にまで拡大し、周辺公衆に放射線障害を及ぼすことのないよう多段の十分な事故防止対策を講ずること」

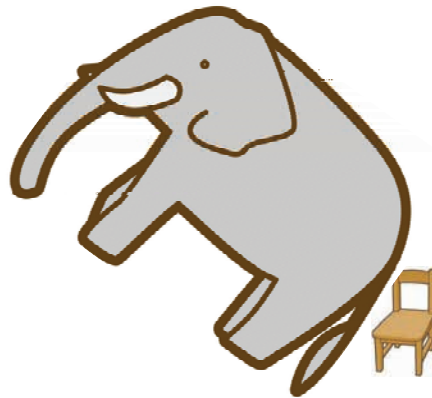
- 第1のレベル: 異常の発生の防止
- 第2のレベル: 異常の拡大及び事故への進展の防止
- 第3のレベル: 周辺への放射性物質の異常放出の防止
- 第4のレベル: シビアアクシデント対策
- 第5のレベル: 防災

(日本では福島原子力発電所事故までは、第3レベルまでが規制の対象)

# シビアアクシデント(過酷事故、炉心損傷事故)

## 定義

原子炉施設の安全設計において想定している**設計基準事象を大幅に超える事象**で、適切な炉心の冷却または反応度の制御ができない状態となり、**炉心の重大な損傷に至る事象**



4

## 2. シビアアクシデントの事例

スリーマイル島(TMI)事故 (1979.3) 米国

チェルノブイリ事故 (1986.4) 旧ソ連(ウクライナ)

福島第一原子力発電所事故 (2011.3)

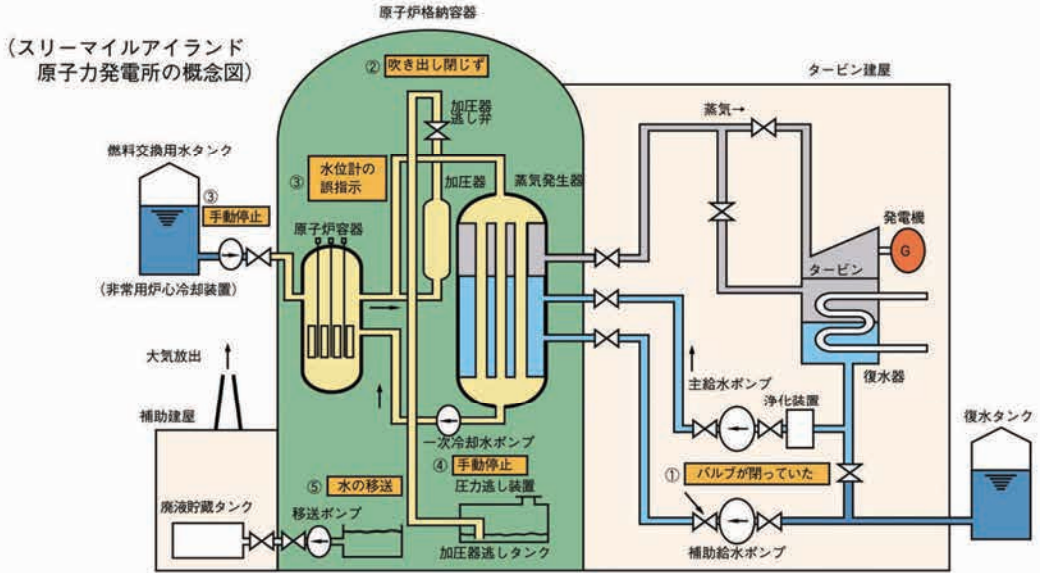
# スリーマイルアイランド原子力発電所事故の概要

○事故の主な経緯

1979年3月28日、アメリカのペンシルバニア州スリーマイルアイランド（TMI）原子力発電所2号機で主給水ポンプが停止。補助給水ポンプが自動起動したものの、ポンプ出口弁全閉で二次冷却水循環水が循環せず、また、自動起動したECCSを運転員が誤判断し、手動で停止したなど機器の故障や誤操作の結果、炉内構造物が一部溶解した。

○事故の影響

周辺の公衆が受けた放射線の量は最大で1ミリシーベルト、平均0.01ミリシーベルトと健康上影響のない極めて低いレベルであった。



出典：三島良績監修「わかりやすい原子力」他

6

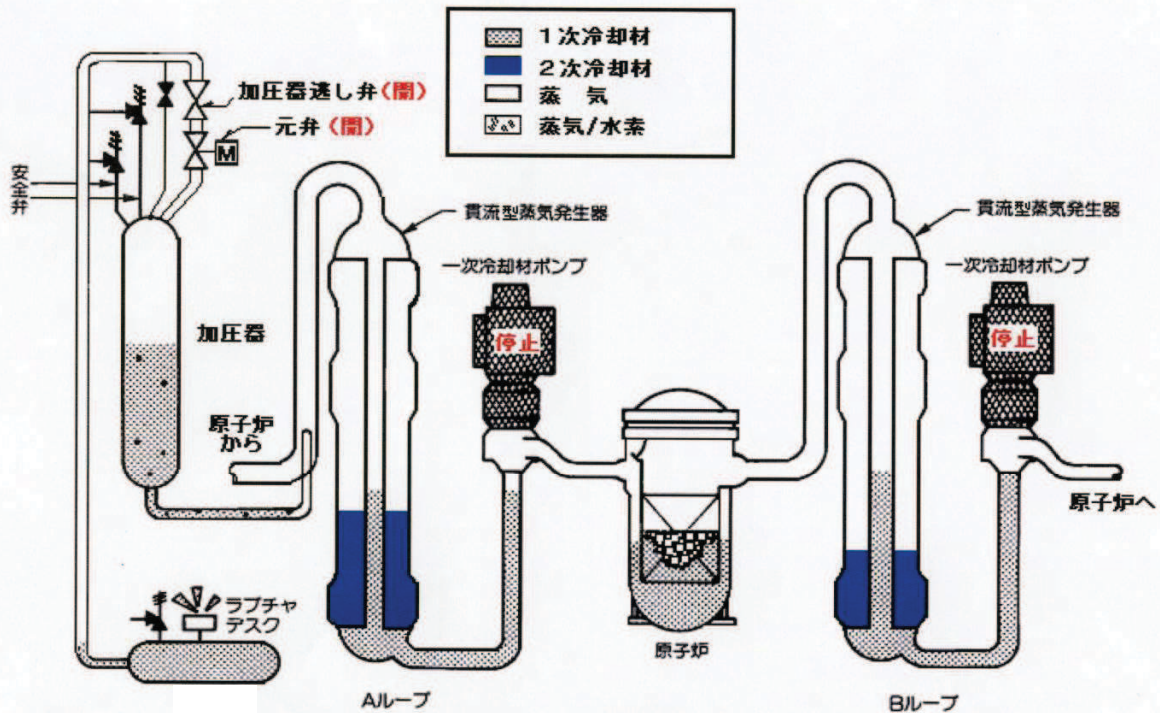
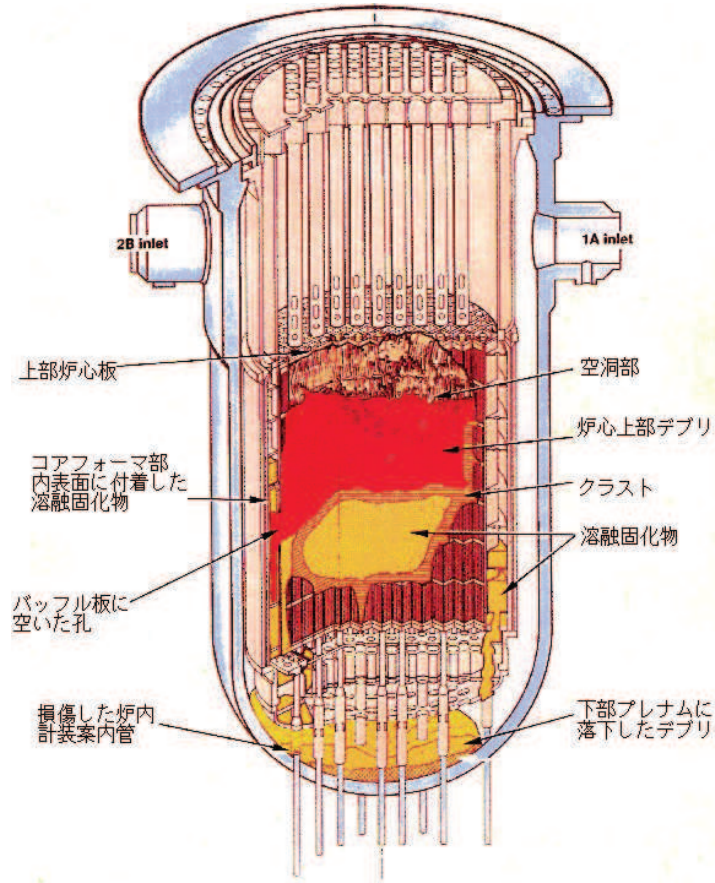


図3 事故発生後約2時間後のプラント状況 (一次冷却材ポンプ停止)

[出典] 科学技術庁原子力安全局(編):米国原子力発電所事故調査報告書第3次、原子力安全委員会月報 昭和56年6月号(通巻第33号)、p.41

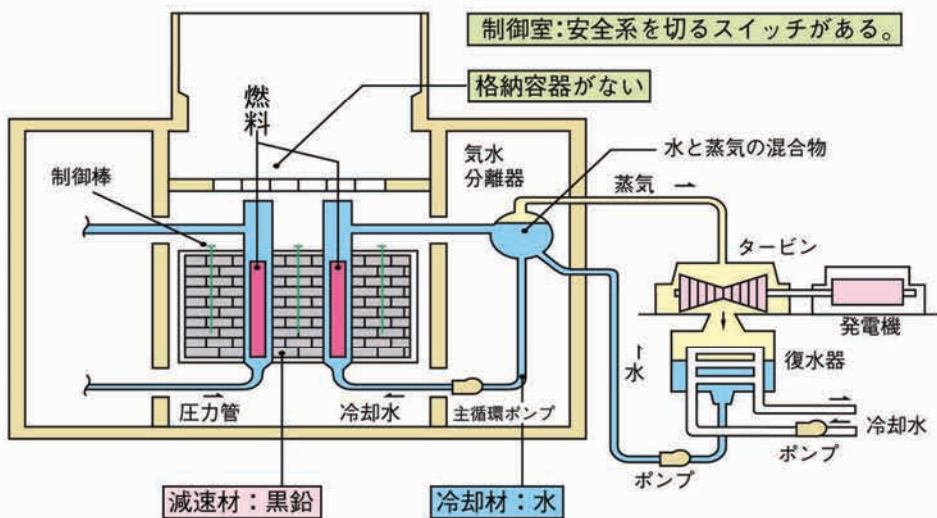
# スリーマイル島原子炉の最終状態



8

# チェルノブイリ原子力発電所の構造

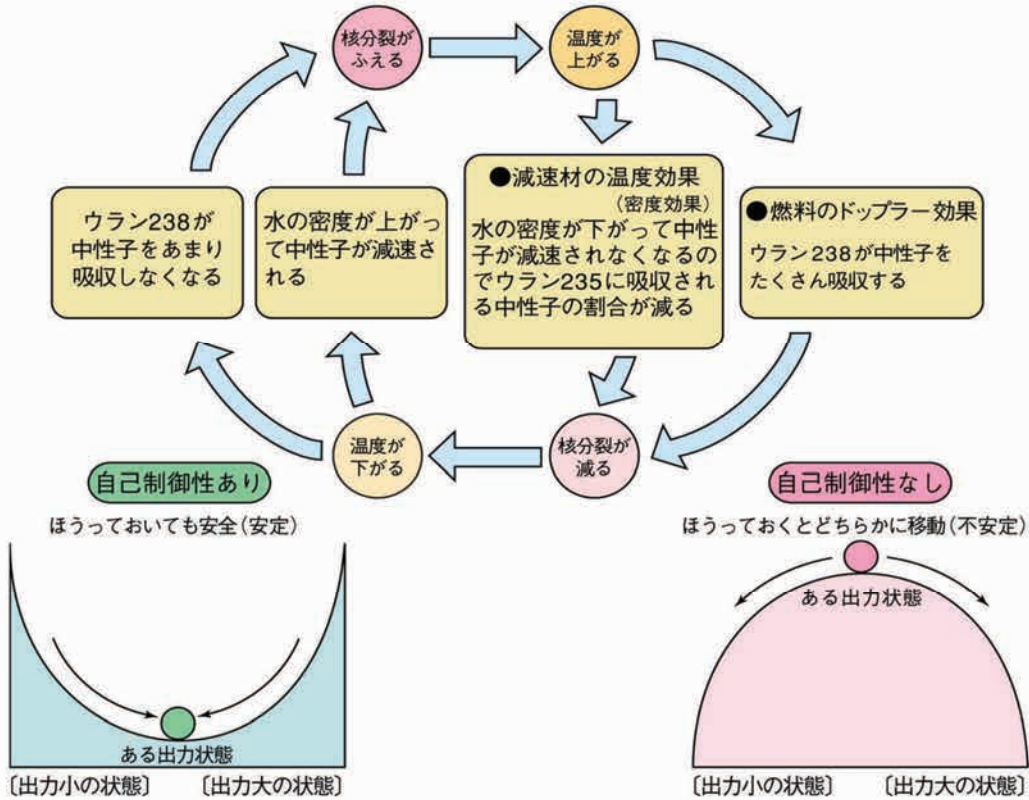
(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉 RBMK)



	日本の原子炉	チェルノブイリの原子炉
自己制御性	あり	なくなる場合がある
冷却材	水	水
中性子の減速材	水	黒鉛
安全装置	インターロックにより危険操作の防止	容易にはずせる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

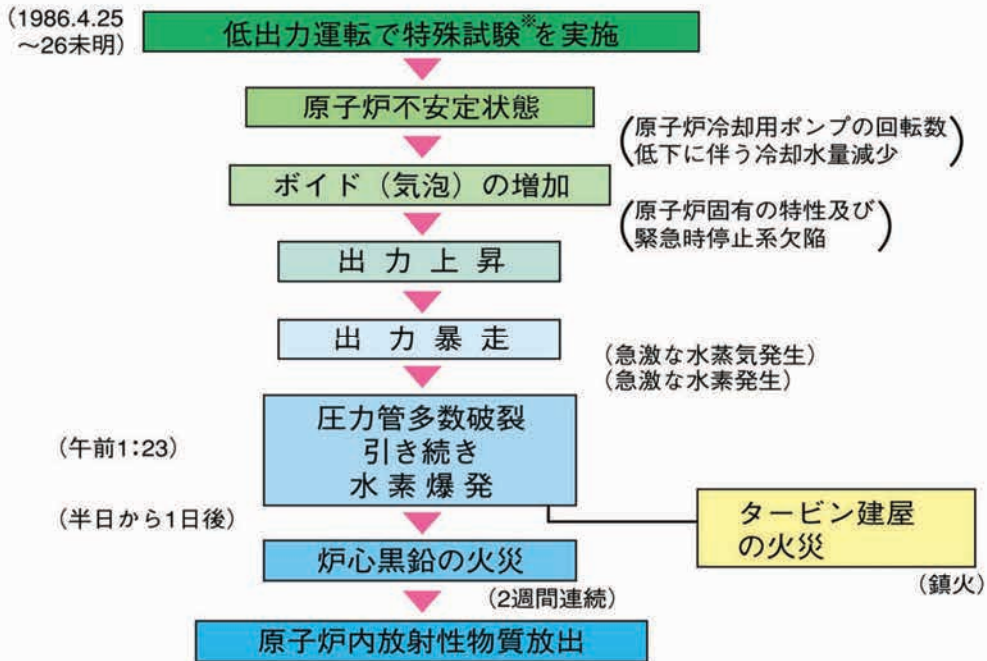
出典：資源エネルギー庁パンフレット 9

## 原子炉の固有の安全性(自己制御性)



10

## チェルノブイリ原子力発電所事故の経過



※外部からの電力の供給を停止した時に、タービン発電機の慣性回転エネルギーを電気出力としてどこまで利用できるか確認するための特殊な試験

出典：旧科学技術庁パンフレット

11

# 福島原子力発電所事故

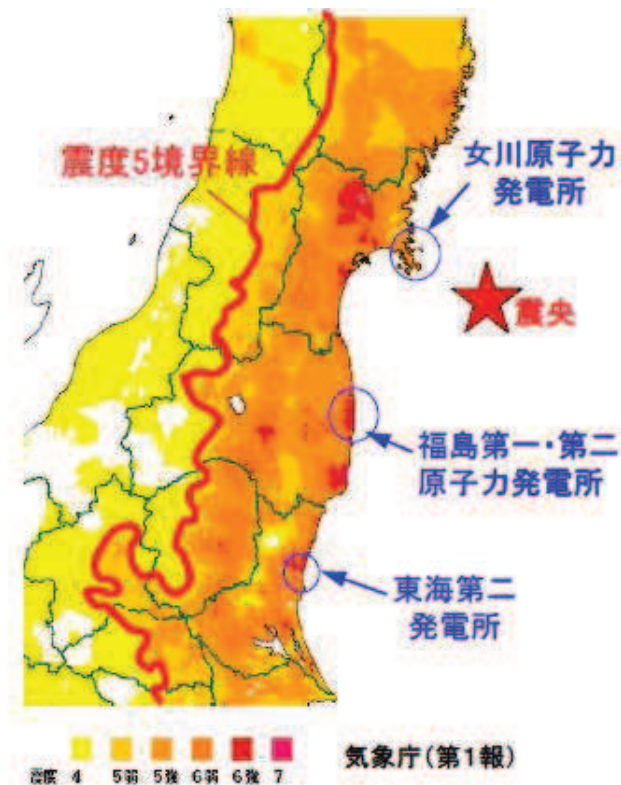
福島県双葉郡大熊町(1~4号機)・双葉町(5~6号機)



12

## 事故の経緯

東日本大地震  
(2011.3.11,14:46)  
の震度分布



## 鉄塔の倒壊

受電設備、鉄塔の倒壊により、外部からの電源供給が停止



14

一旦起動した非常用発電機が津波(15:37)の浸水により停止

防潮堤(高さ約10m)を乗り越えて侵入



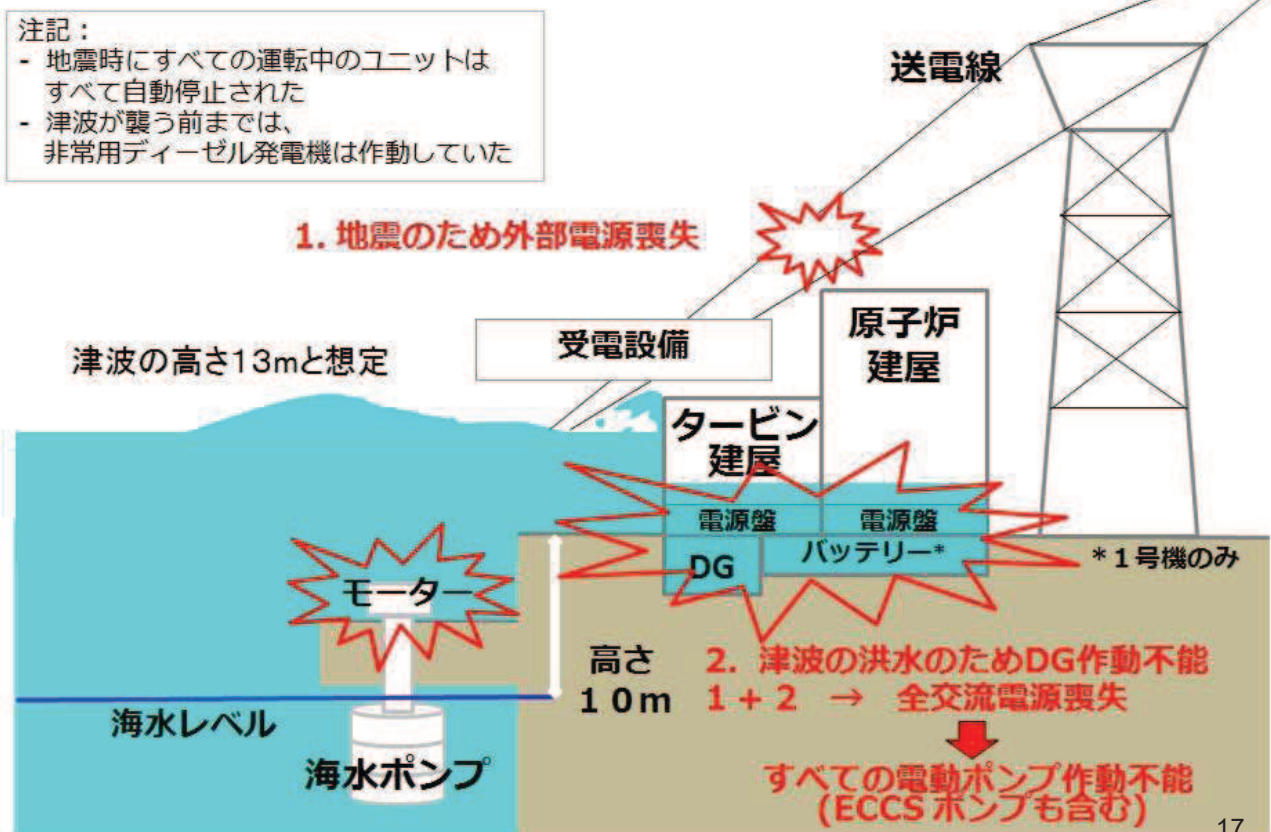
15



# 津波後の福島第一原子力発電所の状況

号機	1	2	3	4	5	6
状態	定格運転中			定期検査中		
外部電源	×	×	×	×	×	×
非常用発電機 A 空冷	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	○ <sup>A</sup> ×
非常用電源盤	×	×	×	×	×	○
常用電源盤	×	×	×	×	×	×
直流電源	×	×	○	×	○	○
海水冷却ポンプ	×	×	×	×	×	×

## 津波による電源系停止、海水冷却系停止の状況

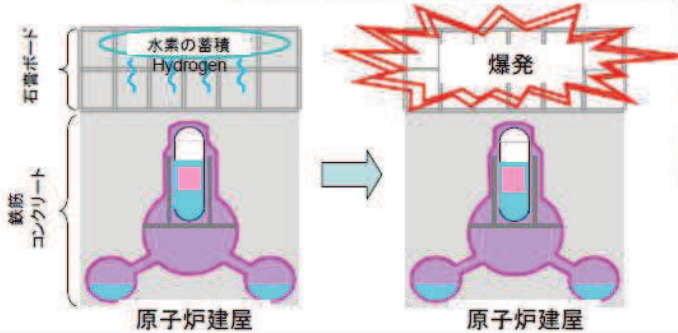
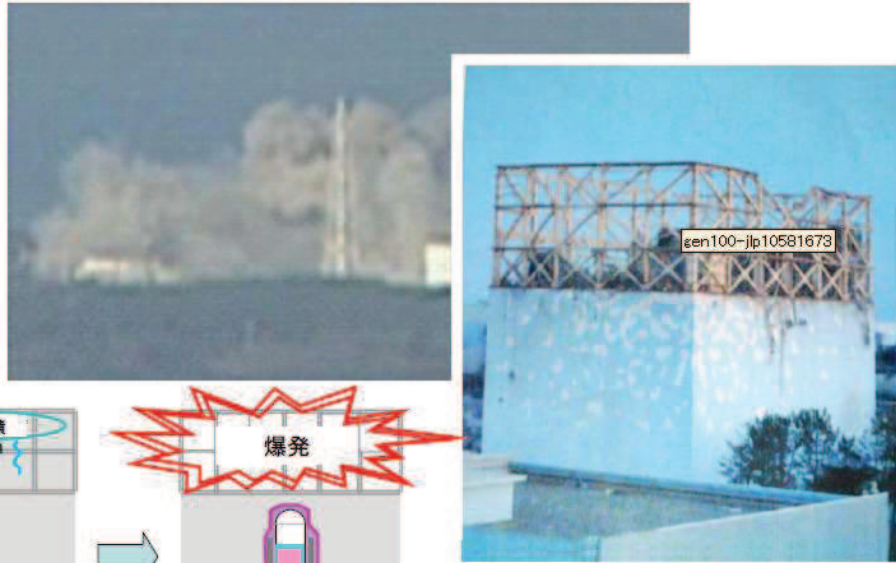


### 3-7. 1号機における主要な事象の進展 (3/4)

#### オペレーションフロアで水素爆発

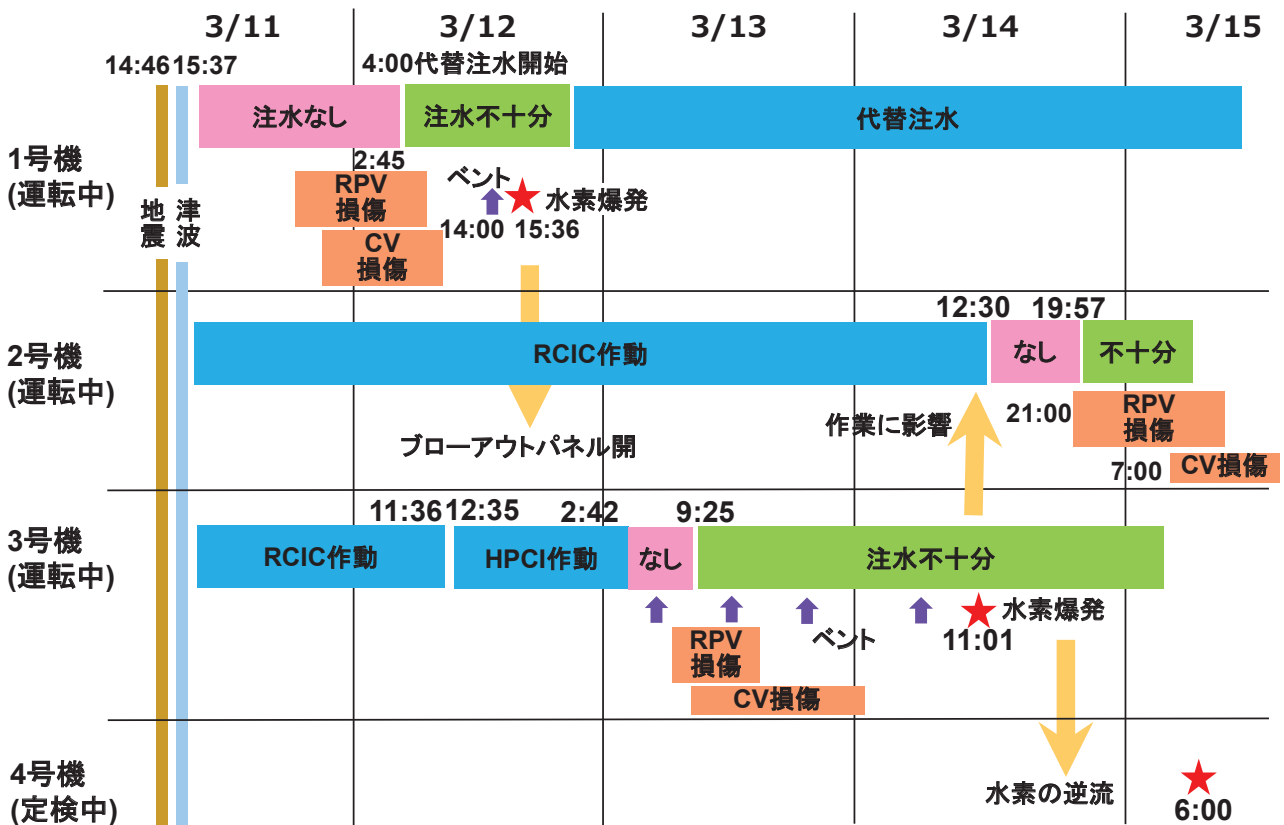
#### 水素爆発

1号機: 3/12 15:36  
 3号機: 3/14 11:01  
 4号機: 3/15 6:00



18 19

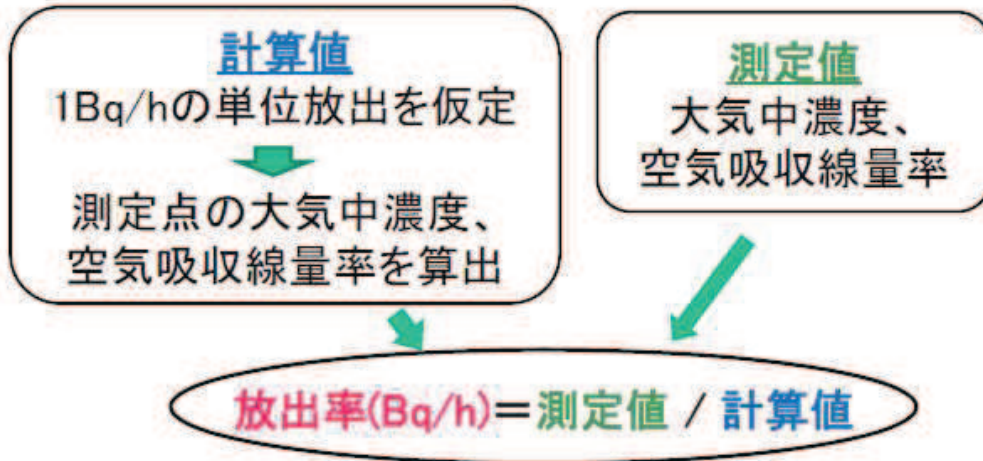
#### 原子炉圧力容器及び格納容器の損傷経過の推定



[参考] 政府事故調査報告書(2012.7)

# 大気拡散からの放出放射性物質の推定 (SPEEDIを用いた逆推定、原子力機構 茅野ら)

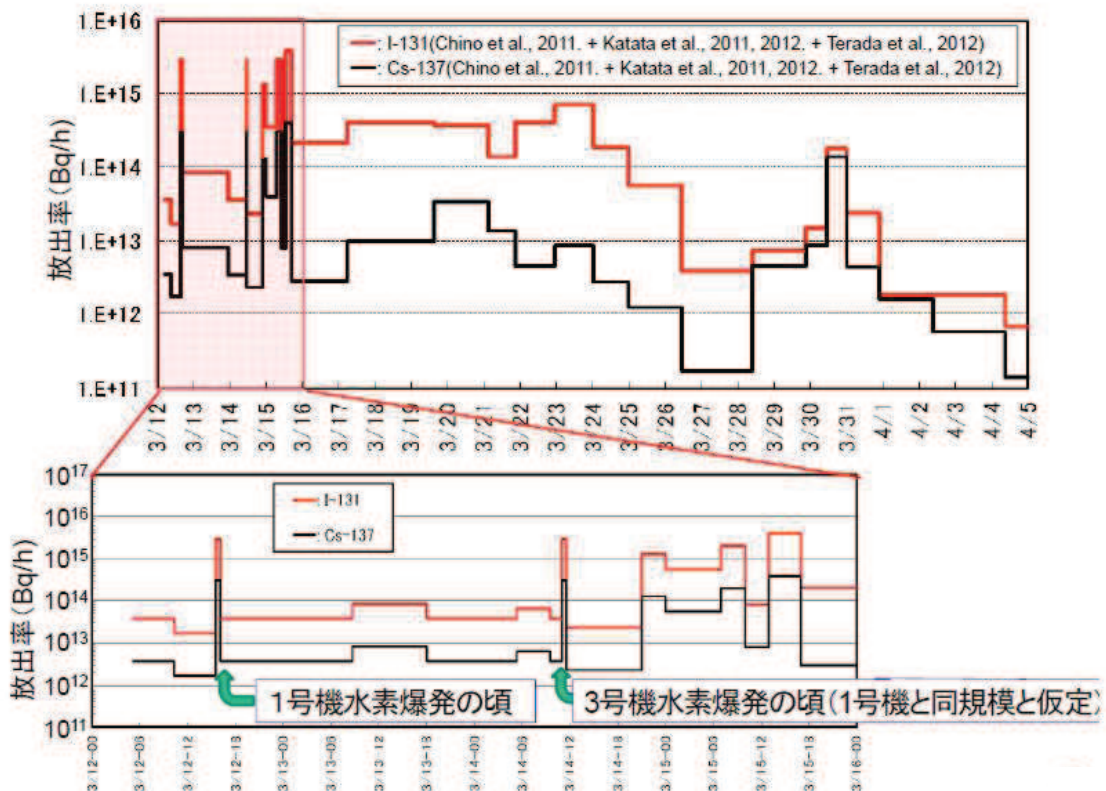
## 放出量推定手法の概念



<http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/jaea1.pdf>

20

## 放出放射性物質の推定(SPEEDIコードによる)



<http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/jaea1.pdf>

21

## 環境に放出された放射性物質の推定量

機関	ヨウ素131	セシウム137
原子力機構・安全委(H23.8)*	130	11
原子力機構 (H24.3)*	120	9
基盤機構・保安院 (H24.2)**	150	8.2
東京電力(H24.6) *	500	10
(参考)チェルノブイリ事故	1760	85

(単位:  $10^{15}$  Bq)

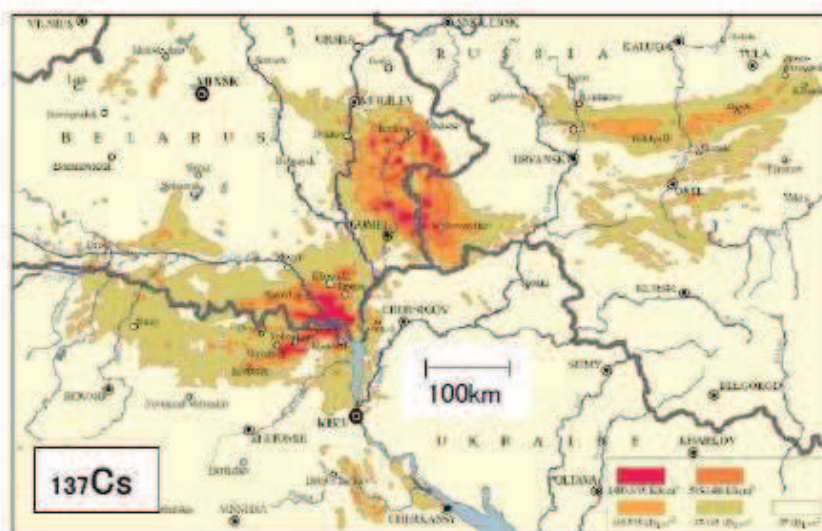
\* 環境モニターデータと拡散解析(SPEEDI/DIANA等)に基づく推定

\*\* 原子炉の事故進展解析(MELCOR)に基づく推定

22

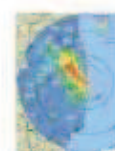
## 土壌汚染の状況の比較

### チェルノブイリ



### 汚染レベル毎の面積

37-185kBq/m <sup>2</sup>	: 162,160km <sup>2</sup>
185-555kBq/m <sup>2</sup>	: 19,100km <sup>2</sup>
555-1480kBq/m <sup>2</sup>	: 7,200km <sup>2</sup>
>1480kBq/m <sup>2</sup>	: 3,100km <sup>2</sup>



ほぼ同縮尺 福島

原子力委員会資料、角山2011.6.14<sup>23</sup>

## 福島事故とTMI、チェルノブイリ事故との比較

	事故のタイプ	格納容器の機能	放射性物質の放出 ( $10^{15}\text{Bq}$ )	作業者の急性放射線障害	公衆の中長期的放射線影響	避難
チェルノブイリ	反応度事故	全喪失(格納容器なし)	~1,760(I-131) ~85(Cs-137) $3 \times 10^{-2}$ (Pu-239) 他	134人(うち、3ヶ月以内に28人死亡)*	甲状腺ガン の増大 (6,000人超、 うち15人死亡)*	公衆への告知の遅れ (1.5-7日) 約135,000人が避難
福島	全交流電源喪失事故	一部喪失(2号機、1-3号機では格納容器ベント)	~160(I-131) ~15(Cs-137) $3 \times 10^{-6}$ (Pu-239) 他	0	多分なし**	公衆への告知は概して 早め。約 88,000人が 避難
スリーマイル島	冷却材喪失事故	健全	$6 \times 10^{-4}$ (I-131)	0	なし	8km以内の妊婦乳幼児に避難勧告も直ぐ解除

\* WHO, IAEA (2006)& UNSCEAR(2011)24

\*\* UNSCEAR(2014)

## UNSCEAR報告書(2014.4.2)

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

「2011年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルとその影響」

- 世界18ヶ国・5国際機関から110名以上の専門家が参加
- 福島原発事故の結果として生じた放射線被ばくにより、今後がんや遺伝性疾患の発生率に識別できるような変化はなく、出生時異常の増加もないと予測



SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION  
UNSCEAR 2013 Report

Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

SCIENTIFIC ANNEX A:

Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami



## 従来の基準と新基準との比較

- 従来と比較すると、シビアアクシデントを防止するための基準を強化するとともに、万一シビアアクシデントやテロが発生した場合に対処するための基準を新設

### ＜従来の規制基準＞

シビアアクシデントを防止するための基準（いわゆる設計基準）  
（単一の機器の故障を想定しても炉心損傷に至らないことを確認）

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

### ＜新規制基準＞

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 （複数の機器の故障を想定）
内部溢水に対する考慮（新設）
自然現象に対する考慮 （火山・竜巻・森林火災を新設）
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

（テロ対策）（シビアアクシデント対策）

新設  
新設  
強化又は新設

強化

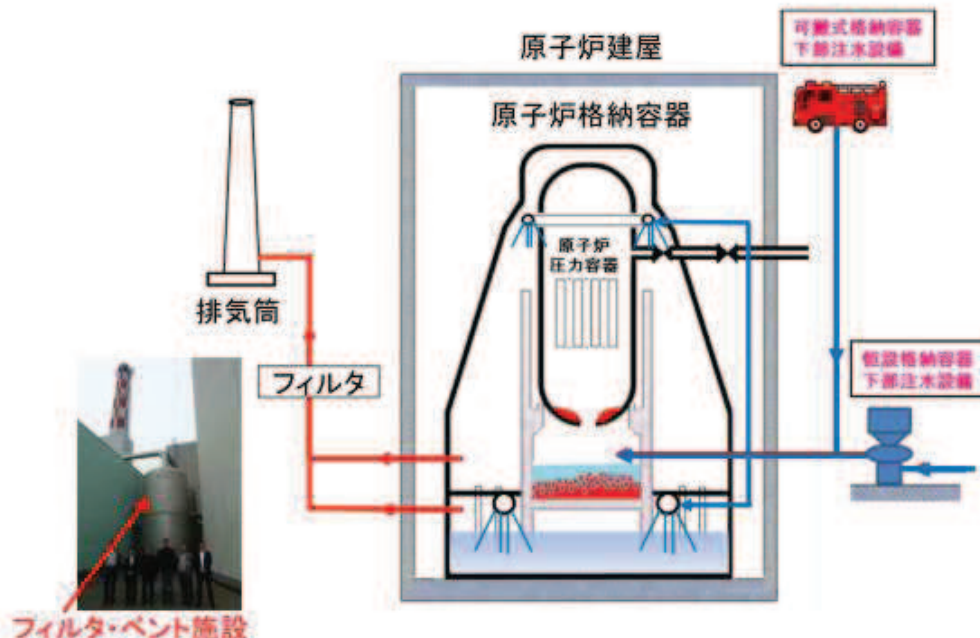
8

[https://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0013\\_08.pdf](https://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0013_08.pdf)

26

## 格納容器破損防止対策

- 炉心損傷が起きたとしても格納容器を破損させないための対策を要求。  
 (例1) 格納容器内圧力及び温度の低下を図り、放射性物質を低減しつつ排気するフィルタ・ベントを設置(BWR)。  
 (例2) 熔融炉心により格納容器が破損することを防止するため、熔融炉心を冷却する格納容器下部注水設備(ポンプ車、ホースなど)を配備。



17

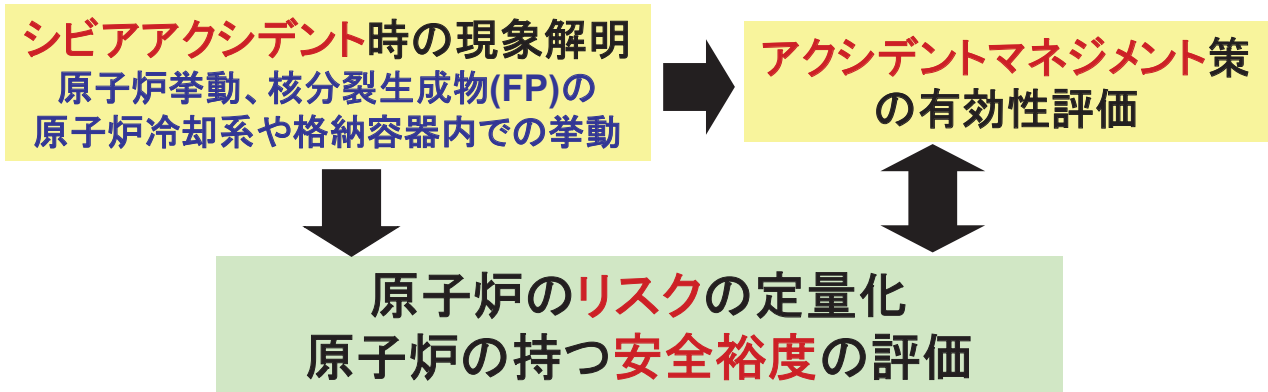
[https://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0013\\_08.pdf](https://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0013_08.pdf)

20

27

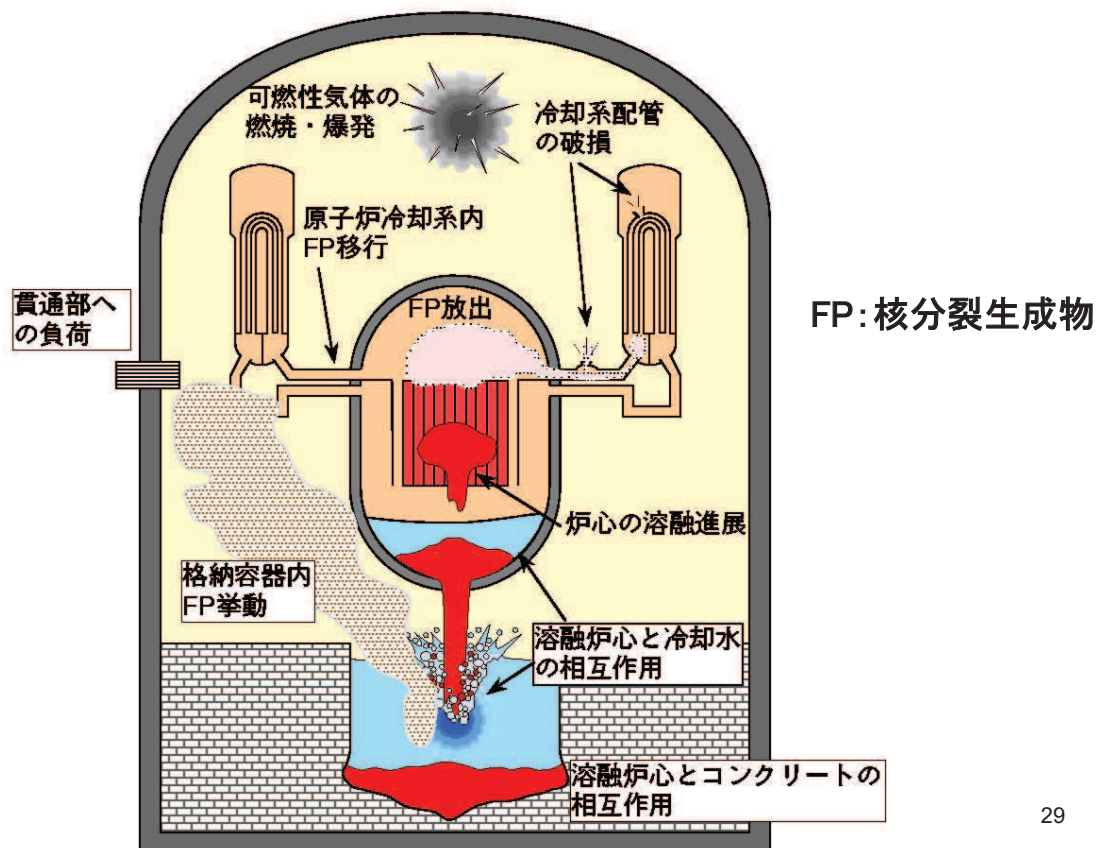
### 3. シビアアクシデントに関する研究

#### 研究目的



28

#### シビアアクシデント時の主な現象



29

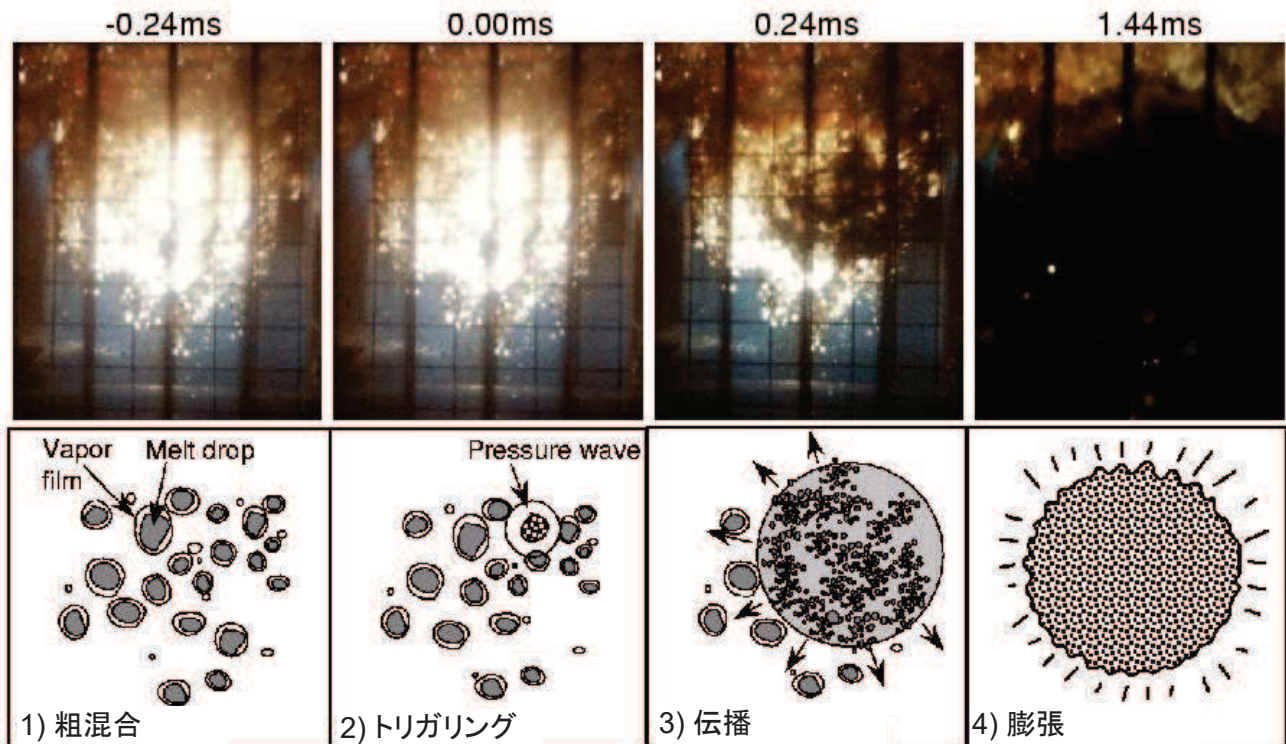
## 事故時格納容器挙動試験(ALPHA)



30

## 溶融炉心冷却材相互作用試験(ALPHA)

### 水蒸気爆発の高速度写真

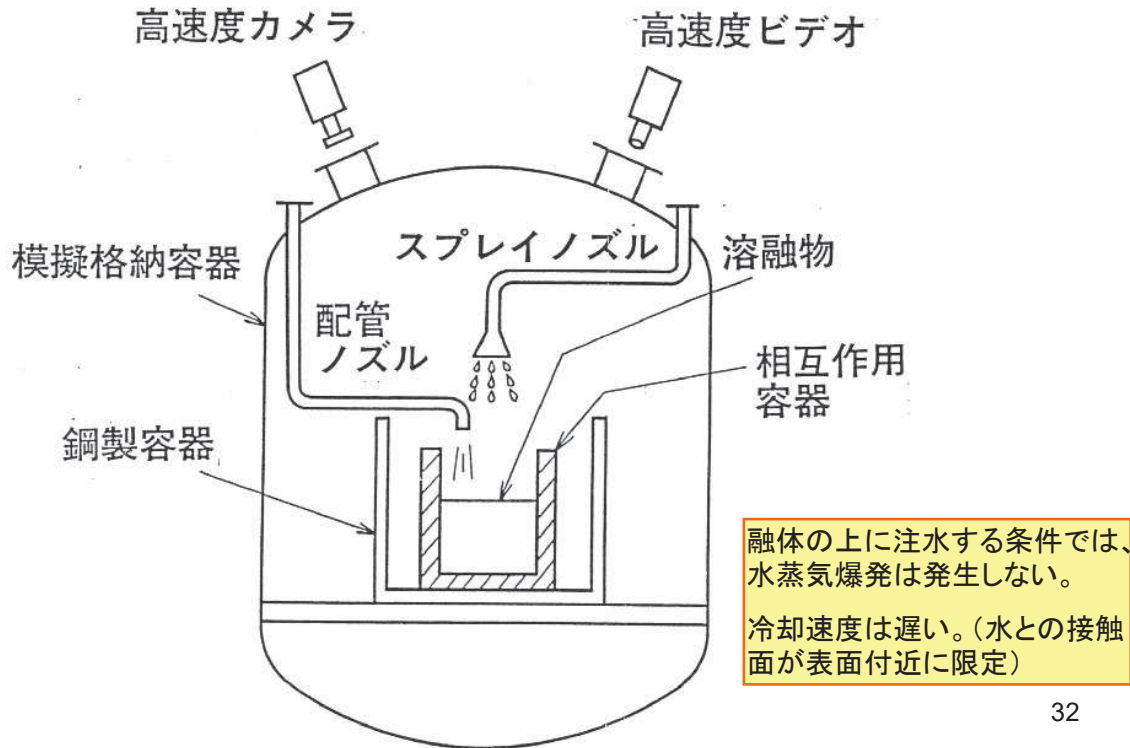


• ALPHA STX-19: 20kgのテルミット溶融物(Fe+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2700K)を室温の水中に投下  
[Yamano et al., Nuclear Engineering & Design, 155, 369-389, 1995.; Moriyama et al., JAERI-Data/Code 99-017]

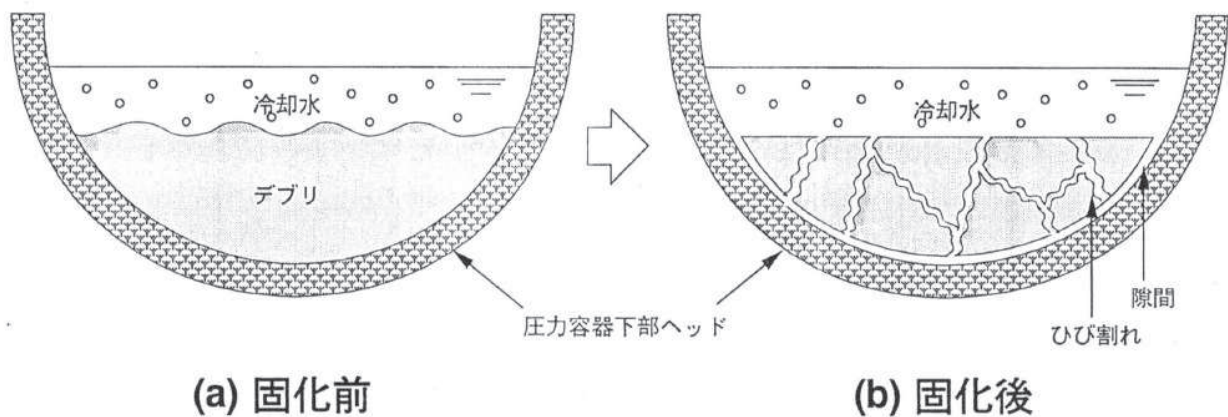
31



## 溶融物冷却性実験の概念図

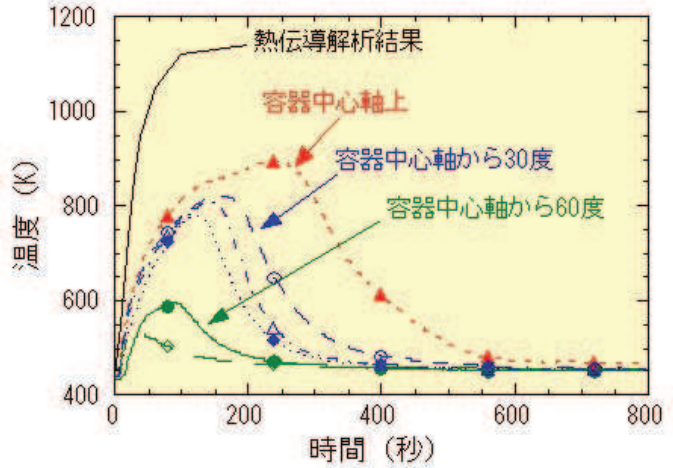
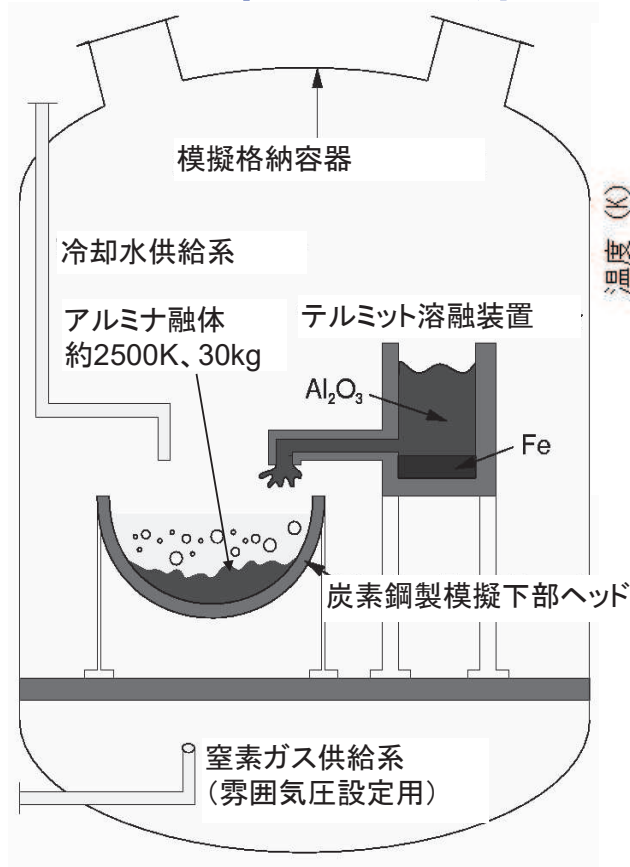


## 推定されている下部ヘッド デブリ冷却メカニズム



Reference: R. E. Henry and D. A. Dube, "Water in the RPV: A Mechanism for Cooling Debris in the RPV Lower Head", Proc. of the Specialist Meeting on Selected Containment Severe Accident Management Strategies, pp. 93-104, June 13-15, 1994, Stockholm, Sweden

# 压力容器内溶融炉心冷却性実験

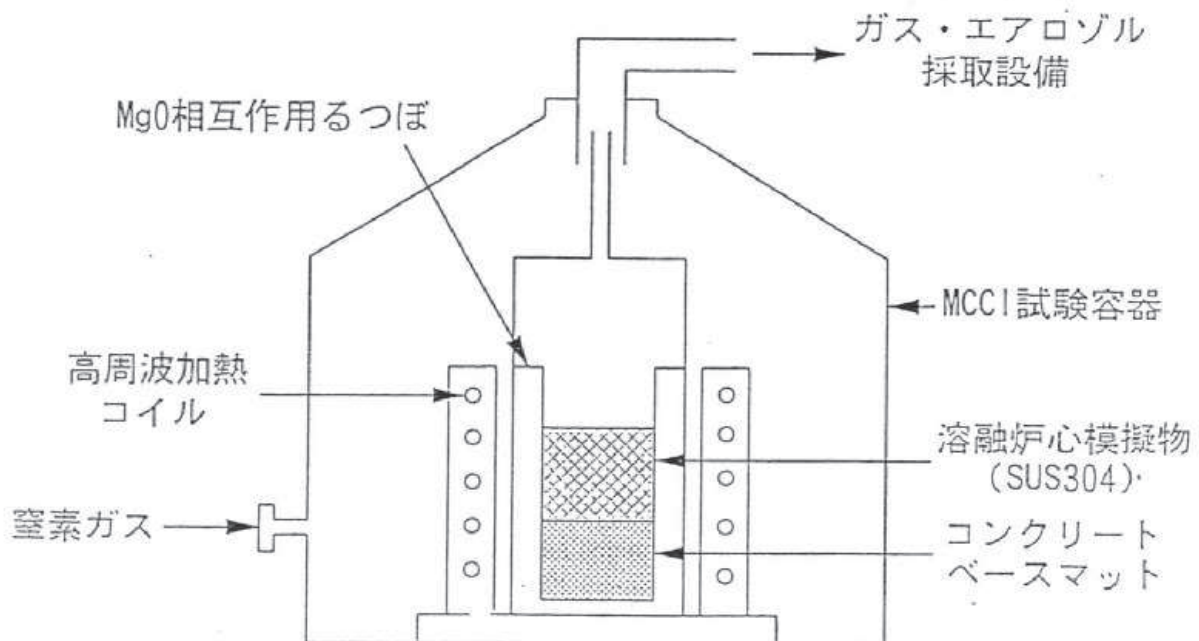


- 固化したアルミナと容器壁の間のすき間 (~1mm) を検出
- すき間への水の浸入による容器壁とアルミナの冷却機構につき検討
- TMI事故で下部ヘッド破損が生じなかった原因と推定
- TMIを超える量の溶融炉心が落下した場合は下部ヘッド破損の可能性

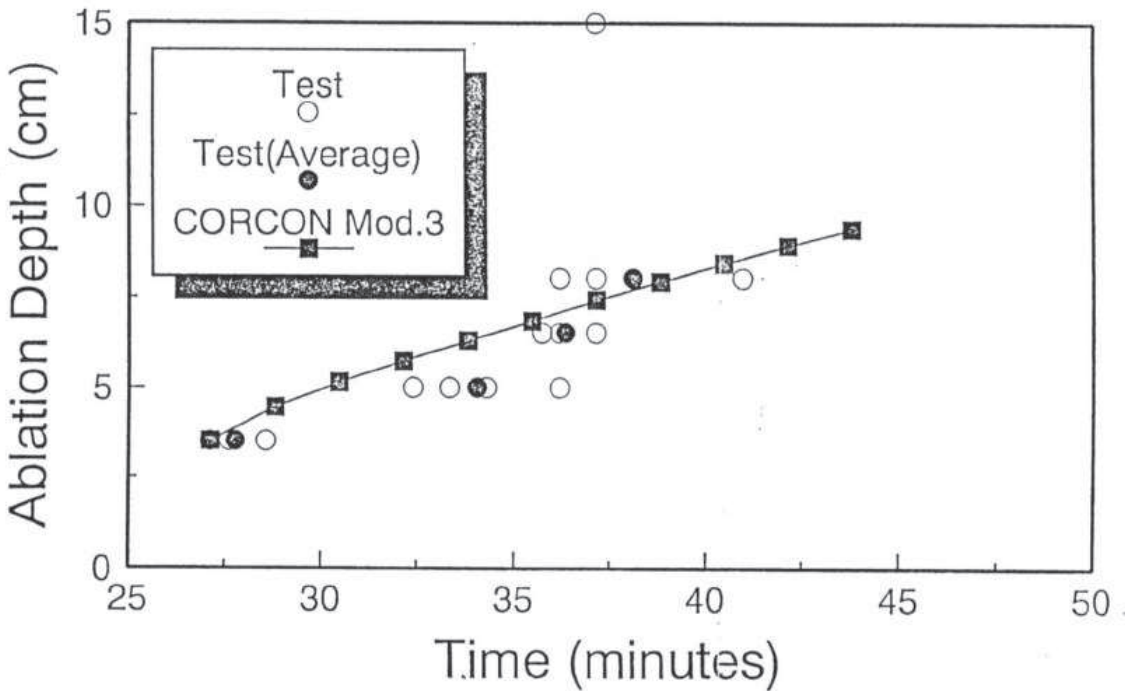
34

## 溶融炉心・コンクリート反応(MCCI)

### ALPHA計画MCCI実験装置の概要

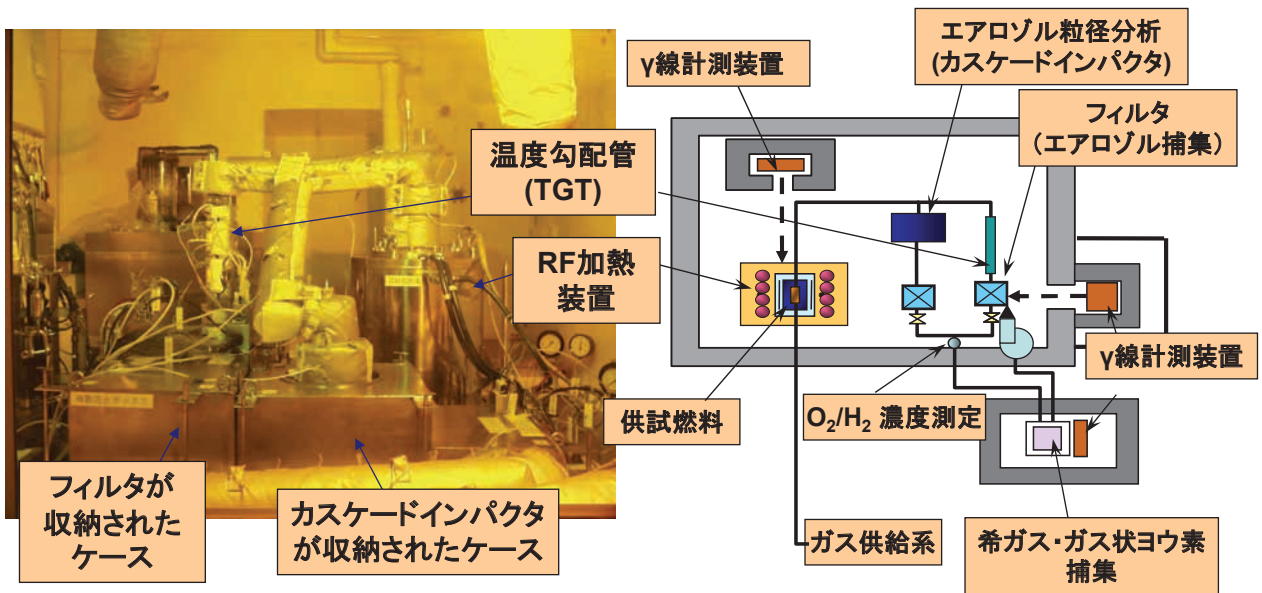


### ALPHA計画MCCIスコوپング実験のコンクリート侵食



36

### 照射済み燃料からのFP放出実験 (VEGA)



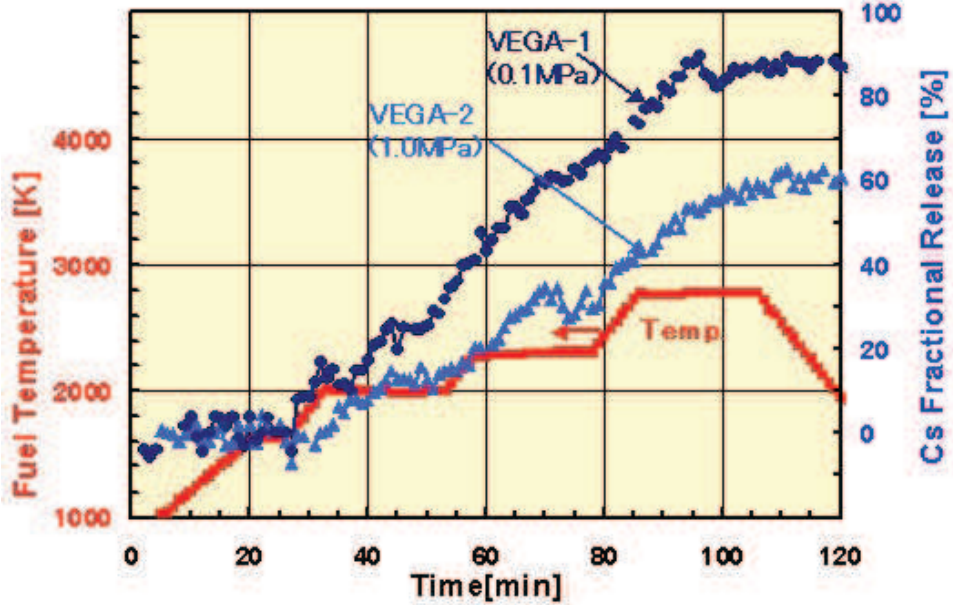
- 特徴
- 最高温度; 3150K
  - 最高圧力; 1.0MPa
  - 高燃焼度UO<sub>2</sub>燃料及びMOX燃料からの低揮発性FP及びアクチニド放出
  - 温度、圧力、雰囲気の影響を調べる

放出メカニズムの  
 放出モデルの改良

ソースターム評価にお  
 ける不確かさを低減

37

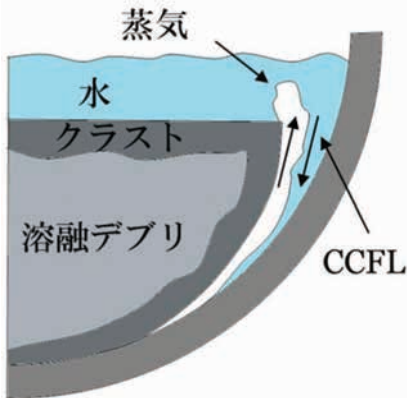
## VEGA実験結果の例(圧力の影響)



実験により、高圧条件でセシウムの放出が減少することが示された。圧力の影響を示す貴重なデータ。

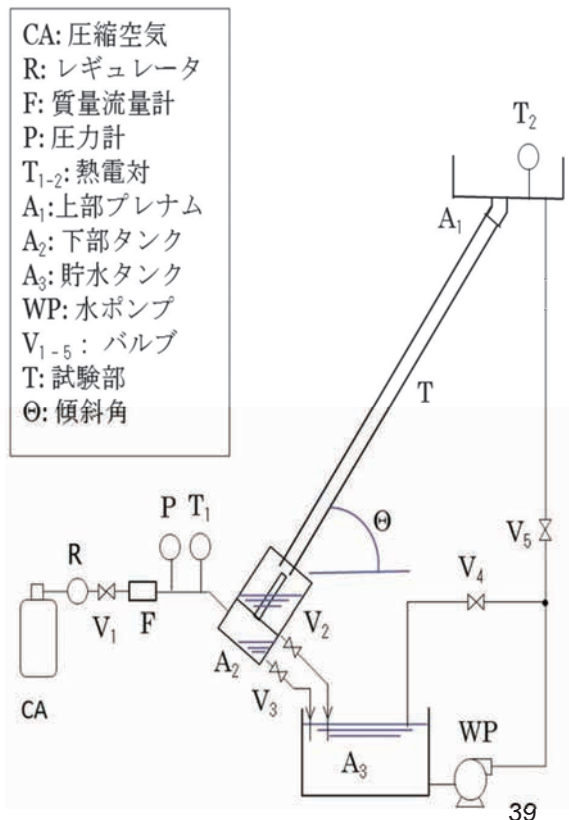
38

## 溶融デブリと圧力容器壁間の気液対向流制限(CCFL)



### スリーマイル島事故:

下部プレナムに炉心燃料が移動したが原子炉圧力容器は健全を保持  
 ← 溶融燃料と圧力容器内壁の間のギャップにおける冷却促進のため健全性が保たれたというモデル  
 ギャップ部は数ミリと予想され、ここでの気液対向流現象の把握が重要



39

# 溶融炉心コンクリート反応(MCCI)進行時の 上部クラストへの注水による除熱特性

## 溶融炉心コンクリート反応

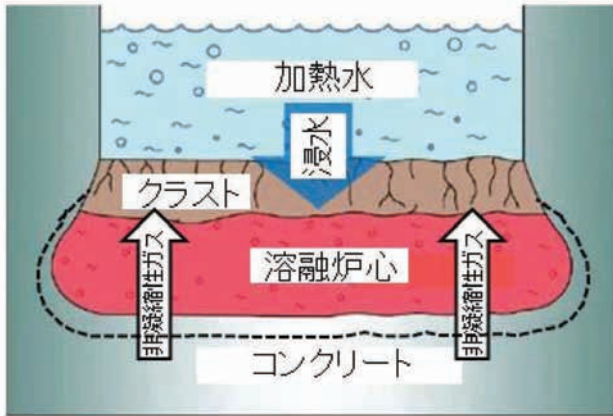
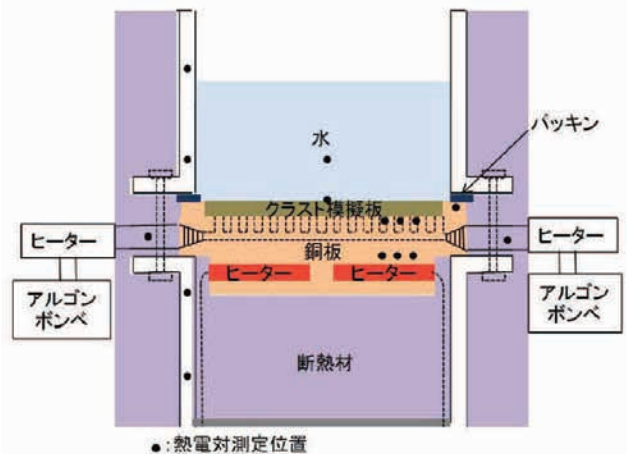


図 1.1 MCCI 中に起こりうる諸現象[1][2]

## 実験装置



ヒータで溶融炉心を模擬。非凝縮性ガス (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) の模擬にアルゴンガス  
アルゴンガス流量、クラスト模擬板の空隙率、空孔径などが実験パラメータ

40

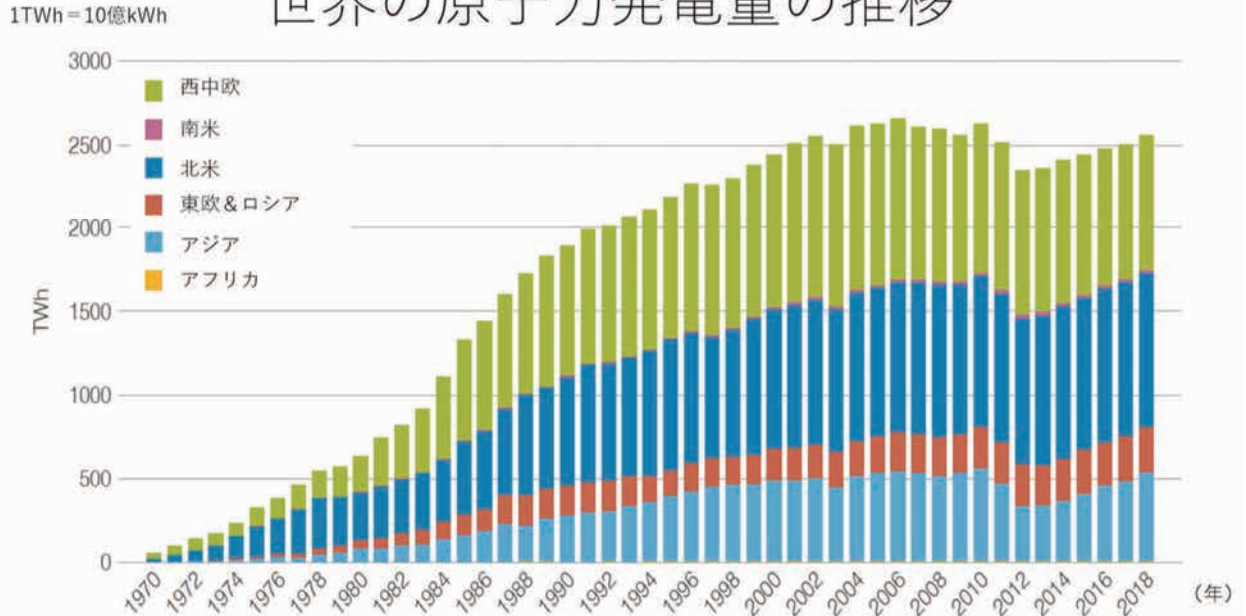
## 4. これからの原子力

### (世界の状況)

- 原子力発電実施国(31ヶ国)のうち、福島原子力発電所事故後、5ヶ国(独、スイス、ベルギー、台湾、韓国)が原子力からの撤退を決定
- 残りの26ヶ国は原子力を維持(仏、スウェーデン、日など)、ないし拡大(露、中、印、英、米)
- 原子力発電未実施国が新たに原子力発電所を建設中が4ヶ国(アラブ首長国連邦、トルコ、バングラデシュ、ベラルーシ)、導入を計画中が4ヶ国(エジプト、ウズベキスタン、リトアニア、カザフスタン)、導入を検討中が5ヶ国+(ベトナム、インドネシア、タイ、ヨルダン、チリなど)
- 米国、ロシア、中国、カナダなどで小型モジュール原子炉(SMR)の開発が進展

41

## 世界の原子力発電量の推移



2018年の原子力発電量は2兆5,630億kWh。6年連続で発電量は増加

出典: WNA "World Nuclear Performance Report 2019"

© JAPAN ATOMIC INDUSTRIAL FORUM, INC.

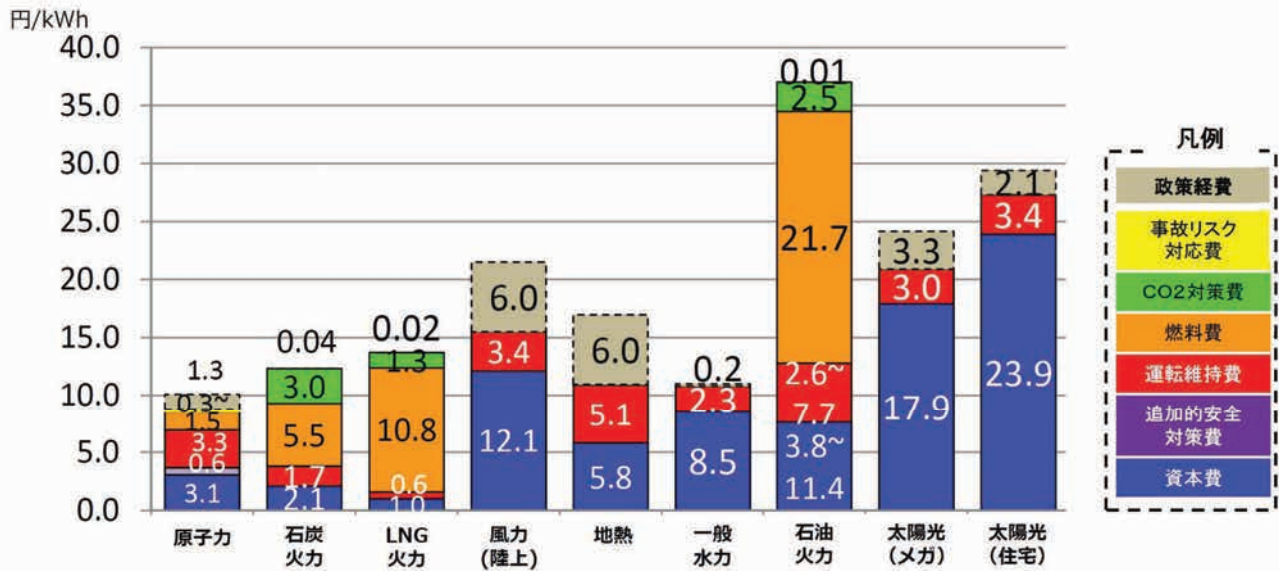
42

## 安全性の比較(電源別)



Risks and Benefits of Nuclear Energy, OECD/NEA (2007)

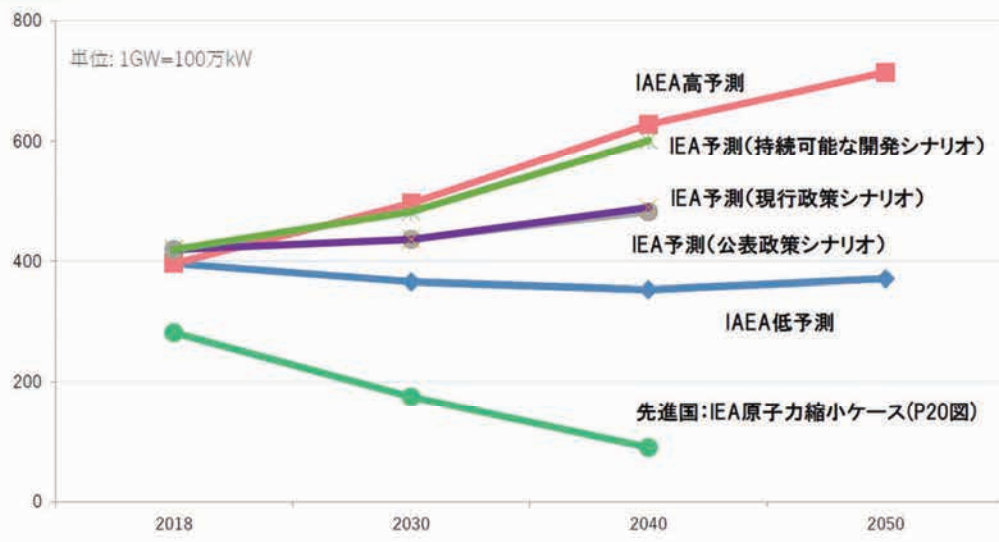
# 発電コストの比較(電源別)



2015年、「総合資源エネルギー調査会 発電コスト検証ワーキンググループ」



## 世界の原子力発電規模予測



- ・公表政策シナリオ(旧新政策シナリオ)：最新のエネルギー政策や関連計画が実施されると想定
- ・現行政策シナリオ：現在実施中の確定した施策のみが実施されると想定
- ・持続可能な開発シナリオ：パリ協定の達成に必要な施策が実施されると想定

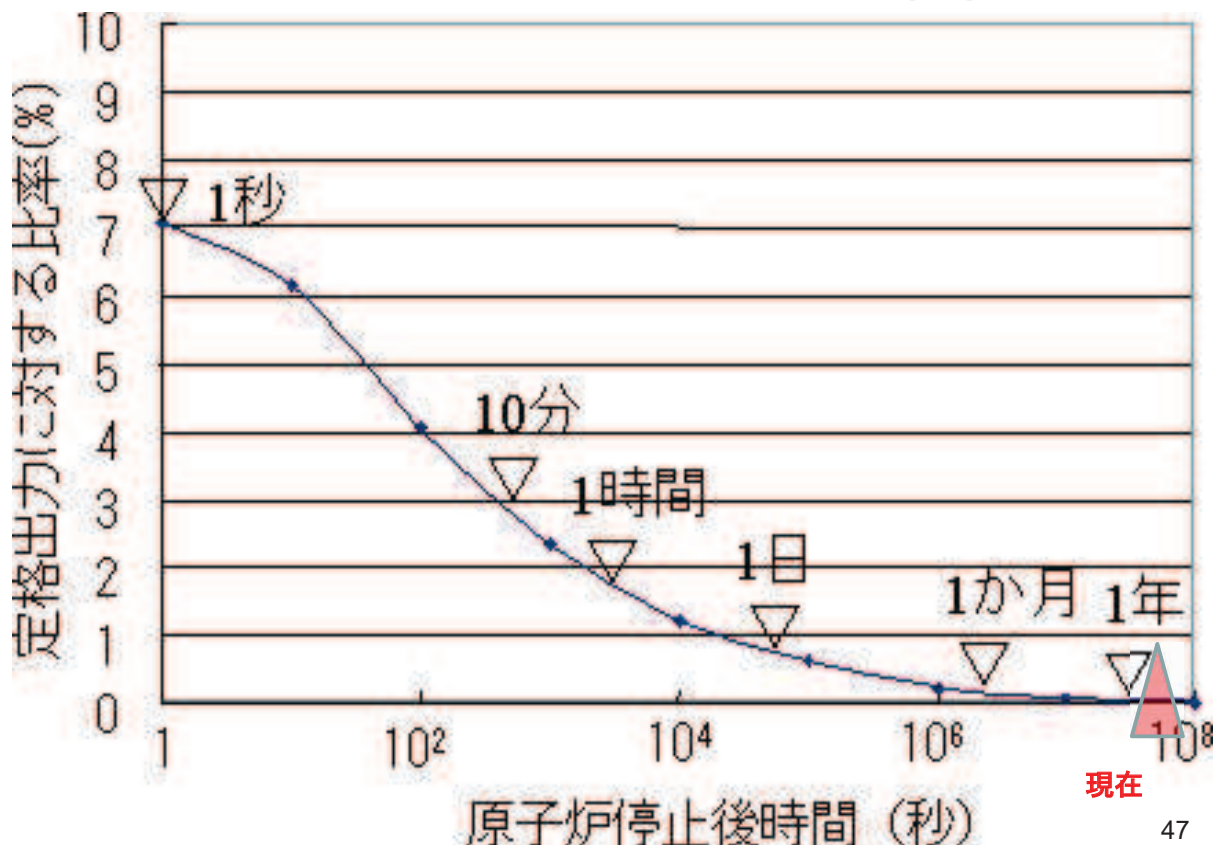


## 5. おわりに

- 日本原子力研究開発機構及び京都大学において、技術系職員の支援によりシビアアクシデントに関する研究を実施
- 研究成果はそれなりに挙げたものの、福島原子力発電所事故の発生防止には直接は役立たなかったのは遺憾
- エネルギーセキュリティと地球温暖化防止に寄与し、安全性が高く、コストが安価な原子力は、今後も活用するとともに、さらに安全性の高い原子炉の開発に注力することが肝要

46

### 原子炉停止後の崩壊熱の発生割合(%)

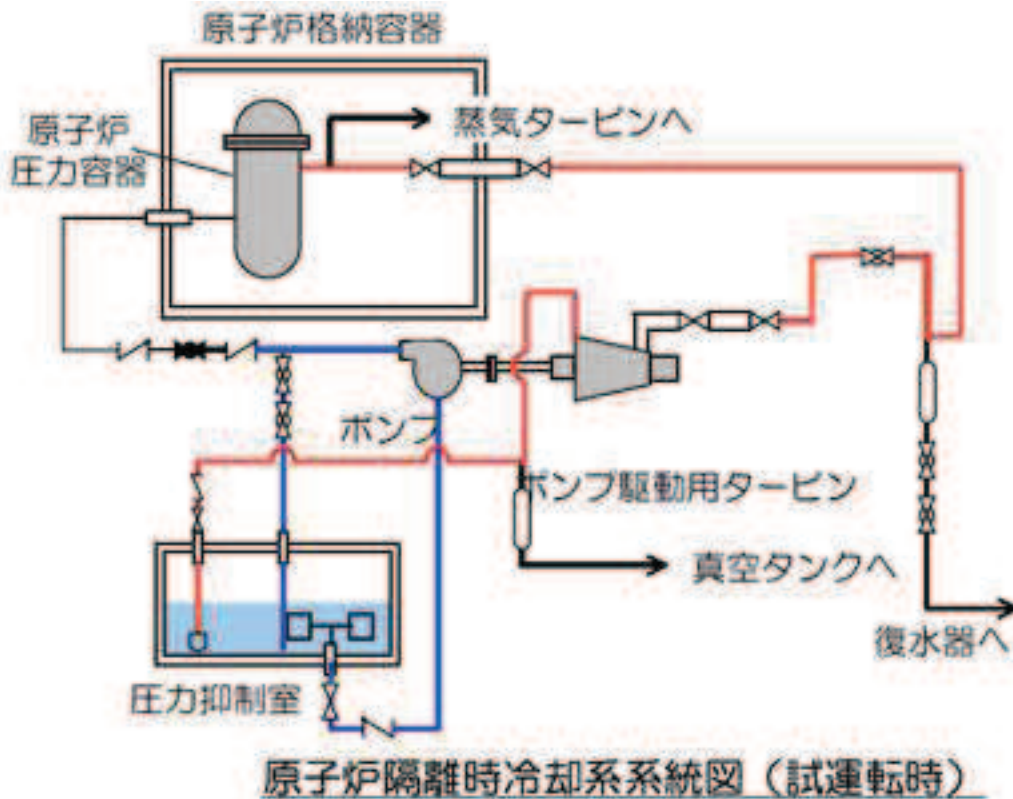


現在

47



## 福島第一2～6号機 原子炉隔離時冷却系(RCIC)



48

### 重要な教訓 1

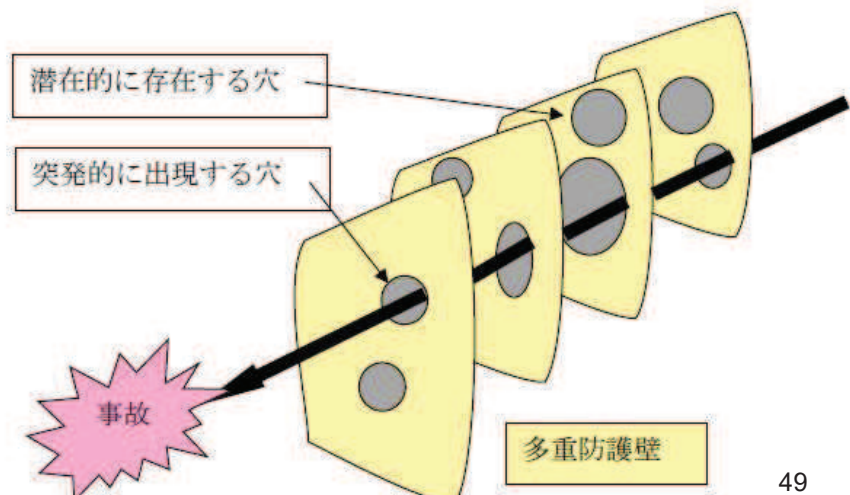
#### リスク認識の転換(政府事故調)

「あり得ることは起こる。あり得ないと思うことも起こる」

「広域にわたり甚大な被害をもたらす事故・災害の場合には、発生確率にかかわらず、しかるべき安全対策・防災対策を立てておくべき」

(参考) スイスチーズモデル

マンチェスター大学のJ. リーズンの理論(1997)。事故は多重防護壁の穴を全て貫通した時に発生。穴は潜在的にも存在、突発的にも発生。事故を防ぐには、穴の有無を常に監視し、穴を発見したら直ぐに塞ぐことが必要



49

## 重要な教訓 2

### 専門家が声を上げる

- **現場技術者の指摘**：「溢水が起きたら非常用ディーゼルはひとたまりもない」に対し、変更には2つのハードル（地元、国）」（東電関係者）
- 「電気室浸水の危険性に言及した部下に対して「それはタブー」と反応した上司がいたが、誰かが言い出し始めなければ何事も始まらない。本当に安全を達成しようとするなら、組織を守ろうとするなら、**第一声を発する人をあいつは変わり者だと皆で押さえ込むのではなく、大事にしなくてはいけない**」（北村俊郎）
- 津波想定高さについて、貞観地震(869年)の痕跡等に基づく研究があったが、防災に生かされず。
- **東北電力女川原子力発電所は、貞観地震に基づき、敷地高さを14.8 mに土盛り。福島原子力発電所は敷地高さ20 mを削って10 mに**
- 1993～94年にシビアアクシデント対策方針について我が国で検討。内部事象（故障、誤操作等）に基づくシビアアクシデントのみが対象。**外部事象（地震、津波等）に基づくシビアアクシデントは対象外**

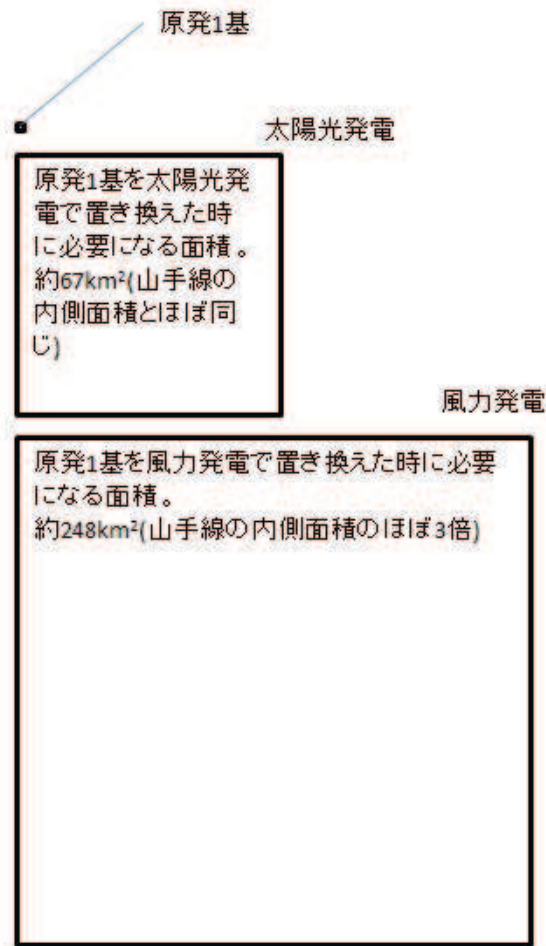
50

## 安全性の比較(電源別)

- 化石燃料(石油、天然ガス、石炭)発電による死亡は、ほとんどが大気汚染(ガン、喘息等、世界で毎年100万人以上が死亡、日本だけでも3万～5万人/年が死亡[WHO])
- 水力発電による死亡は、ほとんどがダム決壊による洪水
- ソーラー発電による死亡は、ほとんどが工場における事故と及び高所からの転落事故
- 風力発電による死亡は、ほとんどが工場における事故
- 原子力発電による死亡は、ほとんどが原子炉事故(チェルノブイリ事故の影響で最大4,000人と評価(IAEA, 実際は甲状腺ガンによる公衆の死亡は15名)、100名/年を仮定
- **我が国で原子力発電を化石燃料で代替すると、約3,000人が余分に死亡すると評価\***

\* 藤沢数希:「反原発」の不都合な真実、新潮新書、p. 37, (2012).

51



100万kW級の原子炉と同じ電力を得るために必要な再生エネルギー源の広さ

52

### (参考)

2001年の米国の9.11テロを受け、飛行機でのテロを恐れたため、それまで飛行機で国内移動していた人が車で移動した結果、2002年1年間だけで約1,600人が車の事故により余計に亡くなったと評価\*

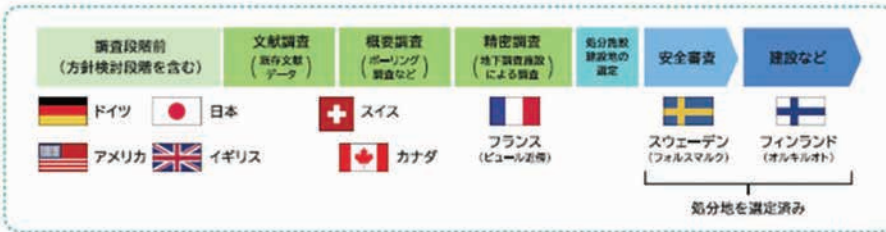


\* Gigerenzer, G., Out of the frying pan into the fire: Behavioral reactions to terrorist attacks, Risk Analysis, 26(2), pp. 347-351, (2006).

53



### ■海外における高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の進捗状況



国名	廃棄物形態	処分候補地	操業予定	進捗状況
フィンランド	使用済燃料	オルキオ	2022年頃	・1983年より選定開始、2001年にオルキオを処分地に決定 ・2015年11月、政府が処分場建設を許可、2016年12月建設開始、2022年操業開始目標
スウェーデン	使用済燃料	フォルスマルク	2030年頃	・1992年より選定開始、2009年にフォルスマルクを処分地に選定 ・2011年3月、処分場の立地・建設許可申請提出 ・2030年頃試験操業開始予定
フランス	ガラス固化体	ビュール近傍	2030年頃	・1980年頃より選定開始、2010年にビュール近傍を処分地とする方向で調査開始 ・2018年、建設許可申請の提出を予定 ・2030年頃からパイロット操業開始予定
スイス	ガラス固化体 使用済燃料	未定	2060年頃	・2008年、3つの候補地域を提案し、処分地の選定開始、実施主体が2地域を提案 ・2031年頃に処分地を決定し、2060年頃、操業開始予定
カナダ	使用済燃料	未定	未定	・2010年より処分地選定プロセス開始、2012年9月未までに22の地域が関心表明 ・初期調査を実施し、良好な結果を得られた7の地域で現地調査を実施中
イギリス	ガラス固化体 使用済燃料	未定	2075年頃	・2008年、処分場選定プロセスに関心を示す自治体の募集を開始し、1つの州と2つの市が関心を表明したが、後に撤回 ・2014年、新たな処分地の選定プロセスを公表
アメリカ	ガラス固化体 使用済燃料	未定	未定	・1982年より処分地の選定開始、2002年にユッカマウンテンを処分地として選定したが、2009年、政権交代により計画を中止し、処分地の選定プロセスを見直し中
ドイツ	ガラス固化体 使用済燃料	未定	未定	・1970年代からゴアレーベンで探査活動を実施していたが、2000年より調査活動を凍結し、2012年に活動停止を決定 ・処分地の選定プロセスを検討中

(2017年6月末現在)