主要な原子力事故

名古屋大学　工学研究科　山本章夫

概要

- 国際原子力・放射線事象評価尺度(INES)
- 福島第一原子力発電所事故
- Three Mile Island 2号機
- チョルノービリ(チェルノブイリ)4号機
- その他の事故・トラブル

国際原子力･放射線事象評価尺度(INES)

国際原子力・放射線事象評価尺度（INES）

	レベル	基準			参考事例（INESの公式評価でないものも含まれている）
		基準1:人と環境	基準2:施設における放射線バリアと管理	基準3:深層防護	
事故	7（深刻な事故）	・広範囲の健康および環境への影響を伴う放射性物質の大規模な放出			・旧ソ連チェルノブイリ発電所事故（1986年） 暫定評価 ・東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所事故（2011年）
事故	6（大事故）	・放射性物質の相当量の放出			
事故	5（広範囲な影響を伴う事故）	・放射性物質の限定的な放出 ・放射線による数名の死亡	・炉心の重大な損傷 ・公衆が著しい被ばくを受ける可能性の高い施設内の放射性物質の大量放出		・アメリカスリーマイルアイランド発電所事故（1979年）
事故	4（局所的な影響を伴う事故）	・軽微な放射線物質の放出 ・放射線による少なくとも1名の死亡	・炉心の全放射能量の0.1%を超える放出につながる燃料の溶融または燃料の損傷 ・公衆が著しい大規模被ばくを受ける可能性の高い相当量の放射性物質の放出		・ジェー・シー・オー臨界事故（1999年）
異常な事象	3（重大な異常事象）	・法令による年間限度の10倍を超える作業者の被ばく ・放射線による非致命的な確定的健康影響	・運転区域内での1Sv※（シーベルト）/時を超える被ばく線量率 ・公衆が著しい被ばくを受ける可能性は低いが設計で予想していない区域での重大な汚染	・安全設備が残されていない原子力発電所における事故寸前の状態 ・高放射能密封線源の紛失または盗難	
異常な事象	2（異常事象）	・10mSv（ミリシーベルト）を超える公衆の被ばく ・法令による年間限度を超える作業者の被ばく	・50mSv（ミリシーベルト）/時を超える運転区区域での放射線レベル ・設計で予想していない施設内の域内の相当量の汚染	・実際の影響を伴わない安全設備の重大な欠陥	・美浜発電所2号機 蒸気発生器伝熱管損傷事故（1991年） ・大洗研究開発センター燃料研究棟作業員被ばく事故（2017年）
異常な事象	1（逸脱）			・法令による限度を超えた公衆の過大被ばく ・低放射能の線源の紛失または盗難	・「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故（1995年） ・敦賀発電所2号機1次冷却材漏れ（1999年） ・浜岡原子力発電所1号機余熱除去系配管破断事故（2001年） ・美浜発電所3号機二次系配管破損事故（2004年）
尺度未満	0（尺度未満）	安全上重要ではない事象		0+ 安全に影響を与える事象	
尺度未満				0− 安全に影響を与えない事象	
評価対象外		安全に関係しない事象			

※シーベルト（Sv）:放射線が人体に与える影響を表す単位（1ミリシーベルトは1シーベルトの1000分の1）

5-7-1

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（平成30年度版）」より作成

【1】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-7-1

INES

- INES（International Nuclear Event Scale）指標
- 原子力発電所における故障、トラブル、事故などに関する国際的に共通の評価尺度。
- 1992年8月に日本でも採用

福島第一原子力発電所事故

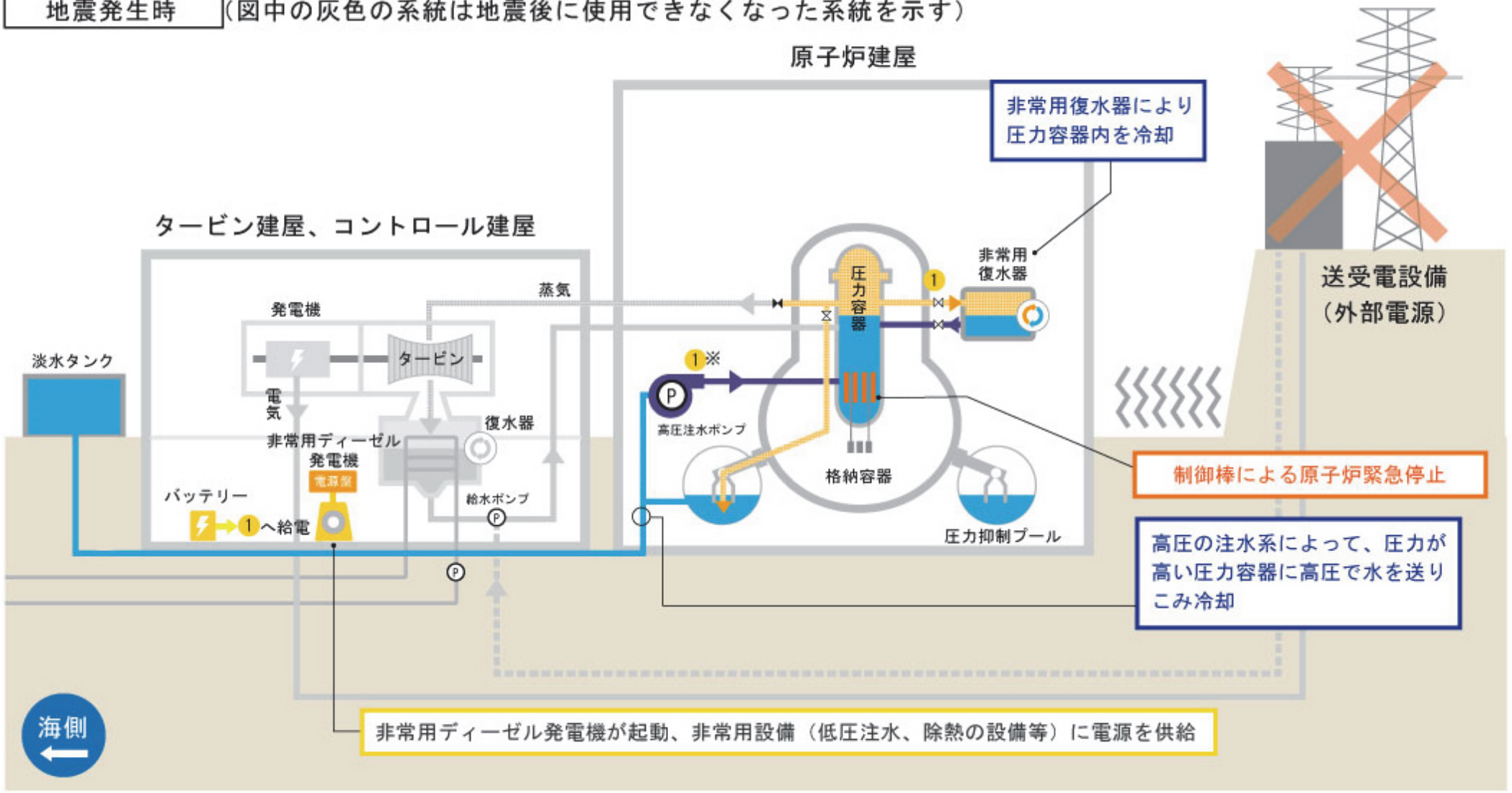
福島第一原子力発電所の概要

- 沸騰水型軽水炉(BWR)

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
電気出力(万kW)	46	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
運転開始(年)	1971	1974	1976	1978	1978	1979
地震発生時の状態	運転中	運転中	運転中	停止中	停止中	停止中

1号機の状況（地震発生後～津波到達前）

地震発生時 （図中の灰色の系統は地震後に使用できなくなった系統を示す）

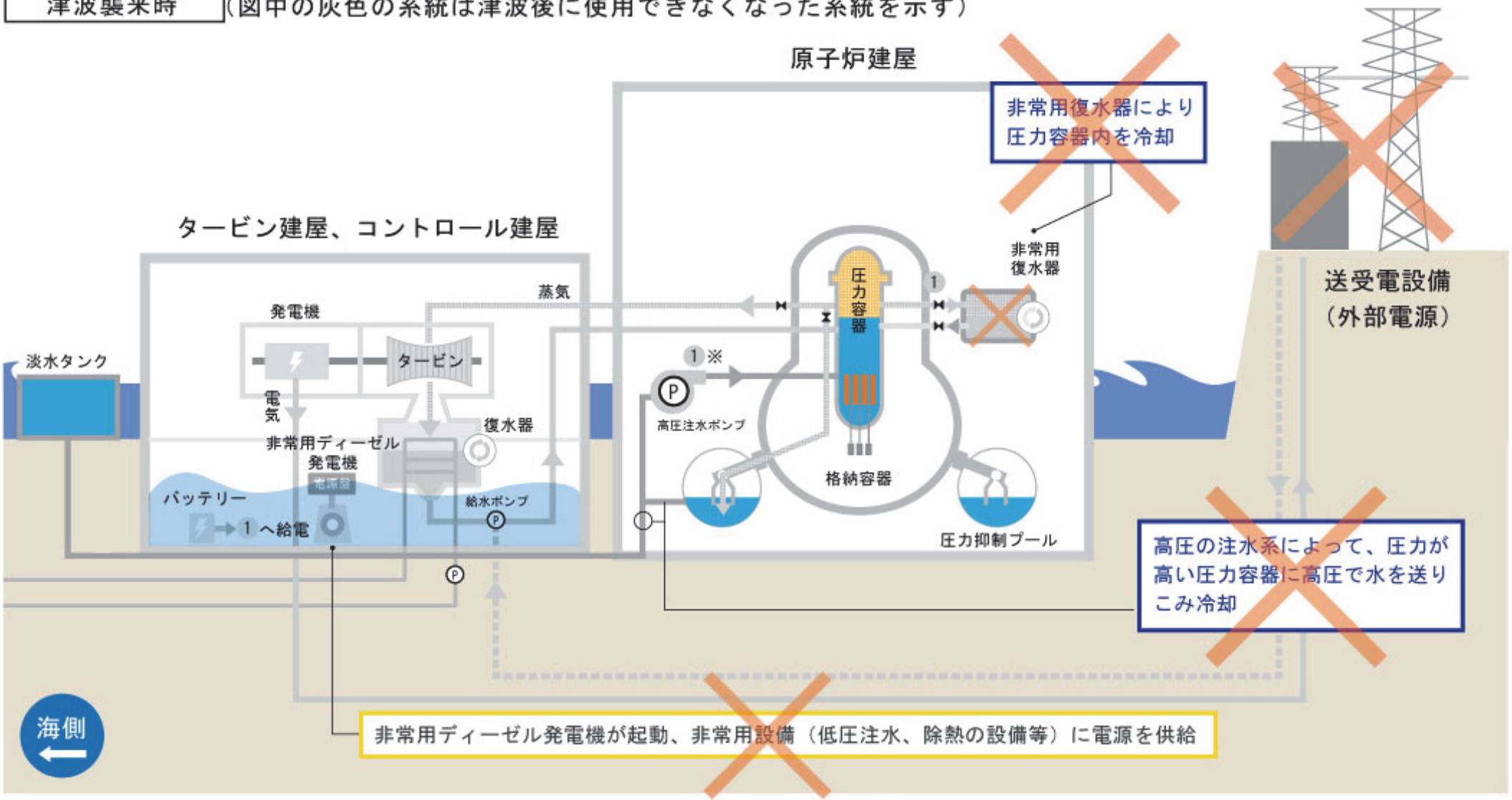


※系統内の弁の開閉に使用

【2】出典：東京電力ホールディングス

1号機の状況（津波到達後）

津波襲来時 （図中の灰色の系統は津波後に使用できなくなった系統を示す）



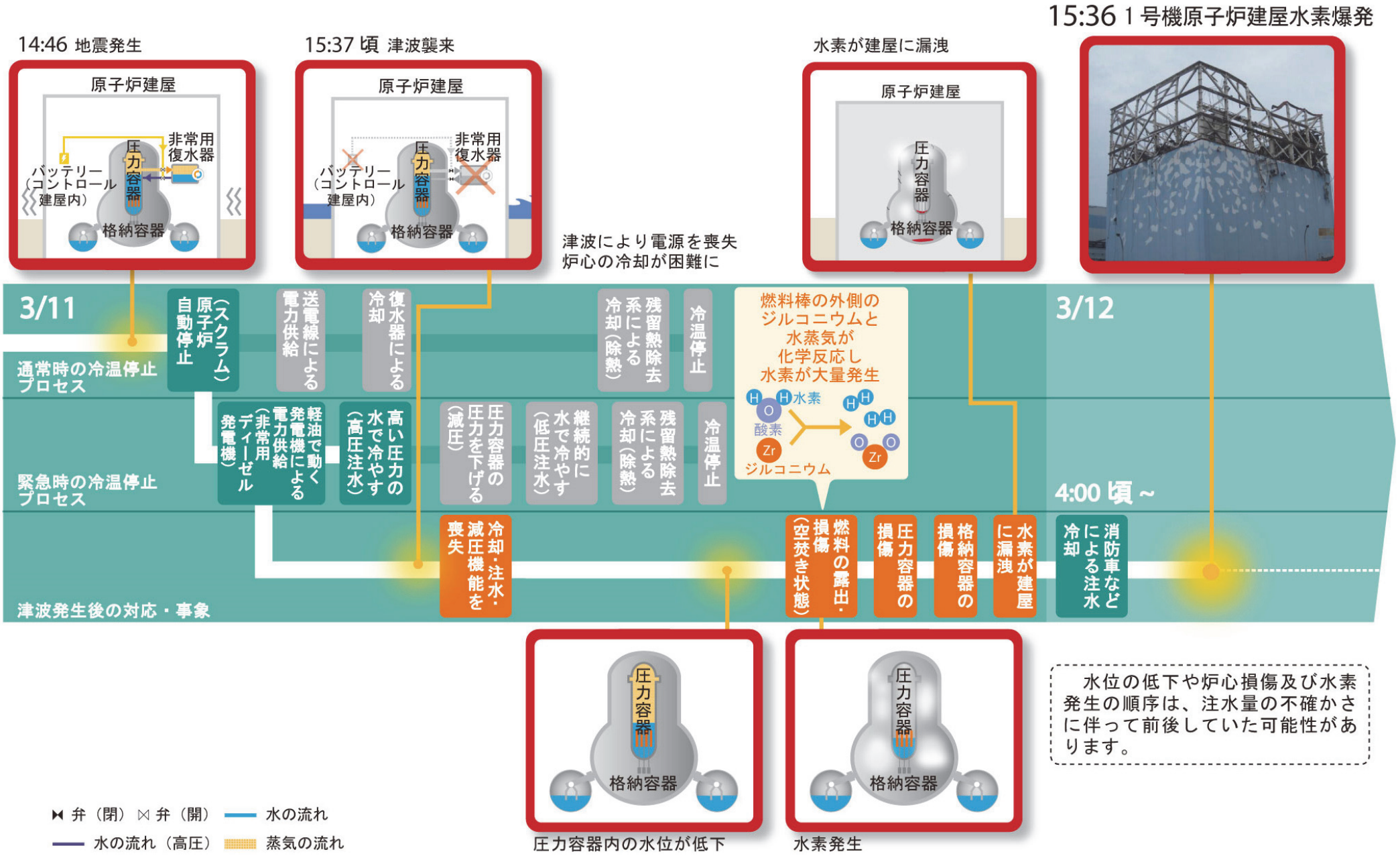
※系統内の弁の開閉に使用

【2】出典：東京電力ホールディングス

ジルコニウム－水反応

- ウラン燃料を覆っている薄い金属製の管(被覆管)の材料であるジルコニウム合金は、高温(900℃程度以上)になると、周りの水蒸気から酸素を奪い、急速に酸化反応を起こす。
  - $Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2$
  - 発熱反応
  - 高温になるとさらに反応が加速

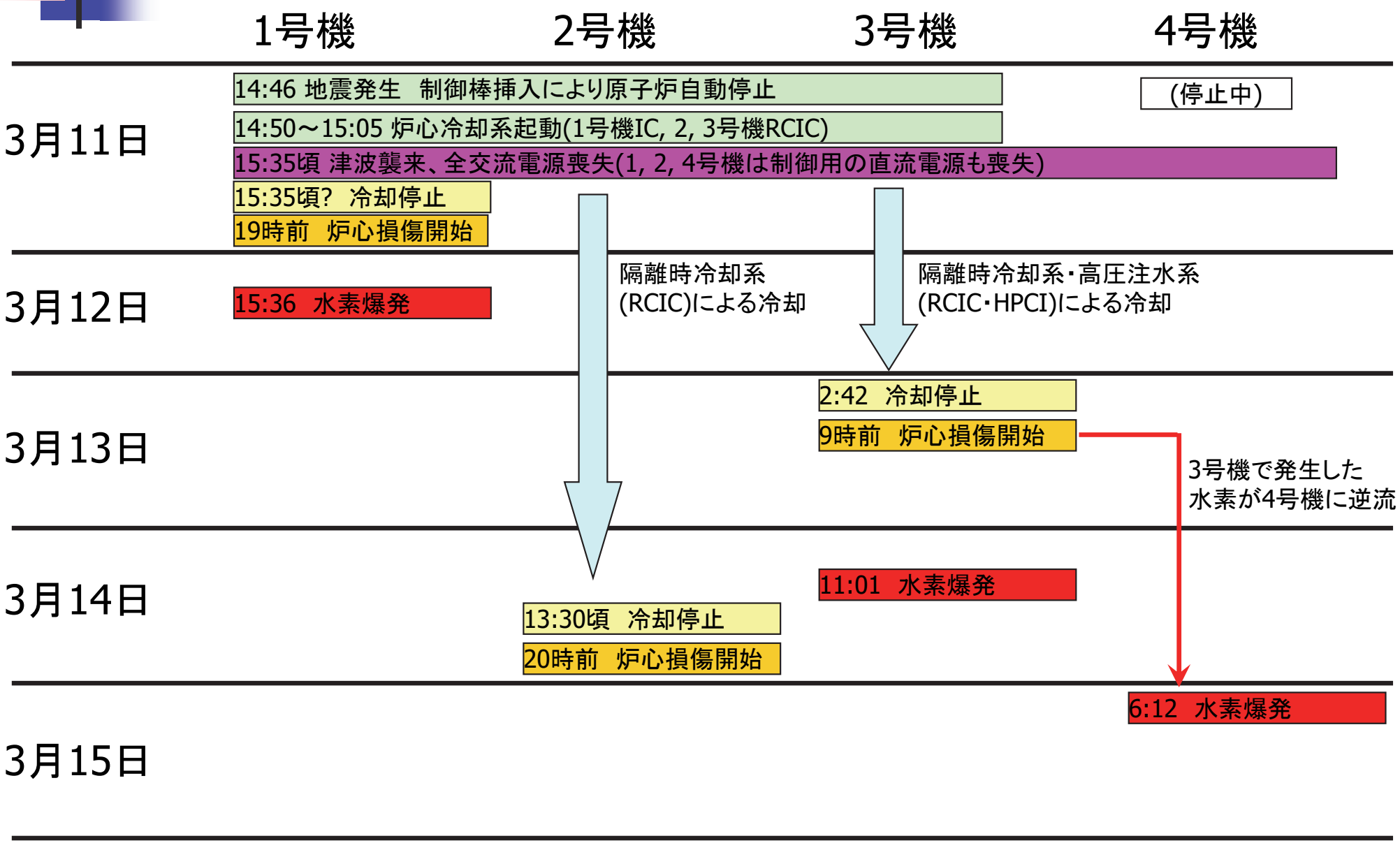
1号機の事故進展



水位の低下や炉心損傷及び水素発生の順序は、注水量の不確かさに伴って前後していた可能性があります。

【3】出典：東京電力ホールディングス

事故進展のまとめ(福島第一原発)



大LOCA注水失敗での過酷事故進展速度の計算

- 定格熱出力
  - 3000 MW
- 崩壊熱
  - 停止直後、定格出力の5 %
- 原子炉容器内水量
  - 300 t、7.1 MPaでの蒸発潜熱1.5 MJ/kg
- 燃料重量
  - 150 t、比熱0.4 kJ/kg/K
- 燃料露出までの時間及び燃料溶融点(2800°C)までの時間を計算
  - ジルコニウム-水反応の発熱は考慮せず

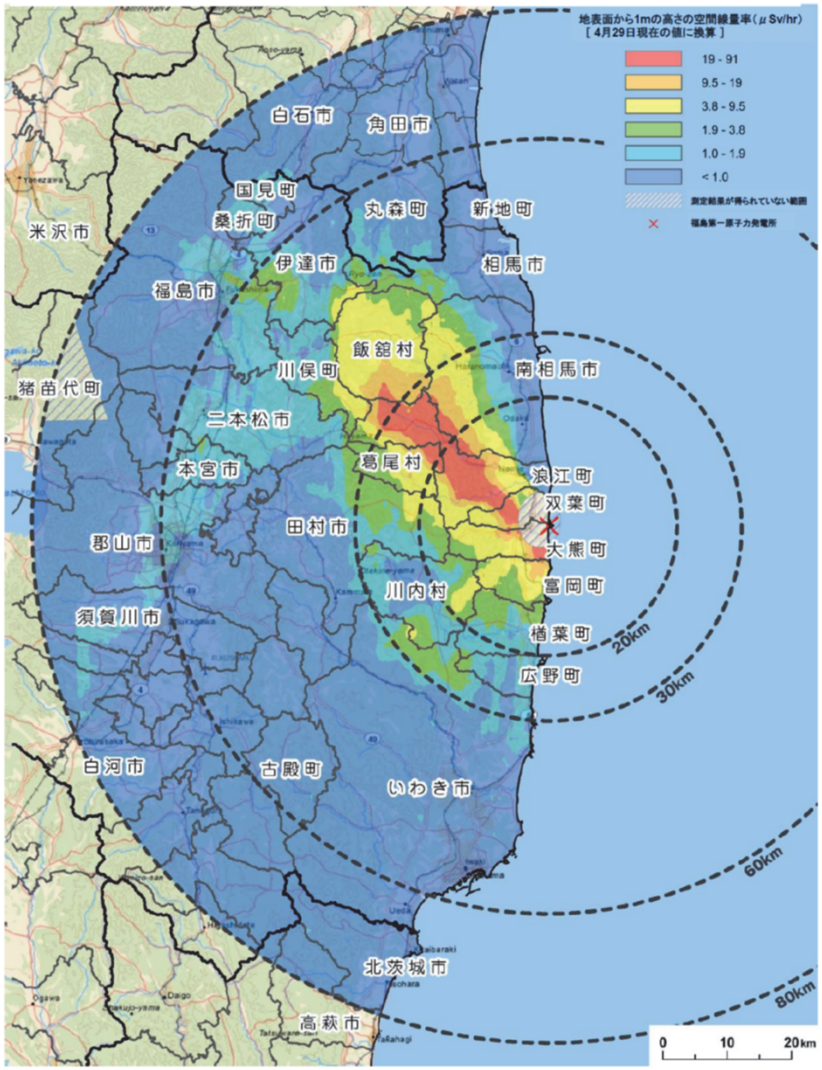
放射性物質の放出

- 核分裂で生じた放射性物質
  - クリプトン(Kr-85)、キセノン(Xe-133)
    - ガス→外部に出やすく遠くまで広がる
  - ヨウ素(I-131, 133)、セシウム(Cs-134, 137)
    - 揮発性が高い→気体として外部に
    - 水に溶けやすい→水蒸気、汚染水として外部に
  - ストロンチウム(Sr-90)
    - 揮発しにくい→外部に放出されにくい
- もともと原子燃料に含まれる放射性物質
  - ウラン、プルトニウム
    - 揮発しにくい→外部に放出されにくい

放射性物質の放出と拡散：線量/Cs蓄積量

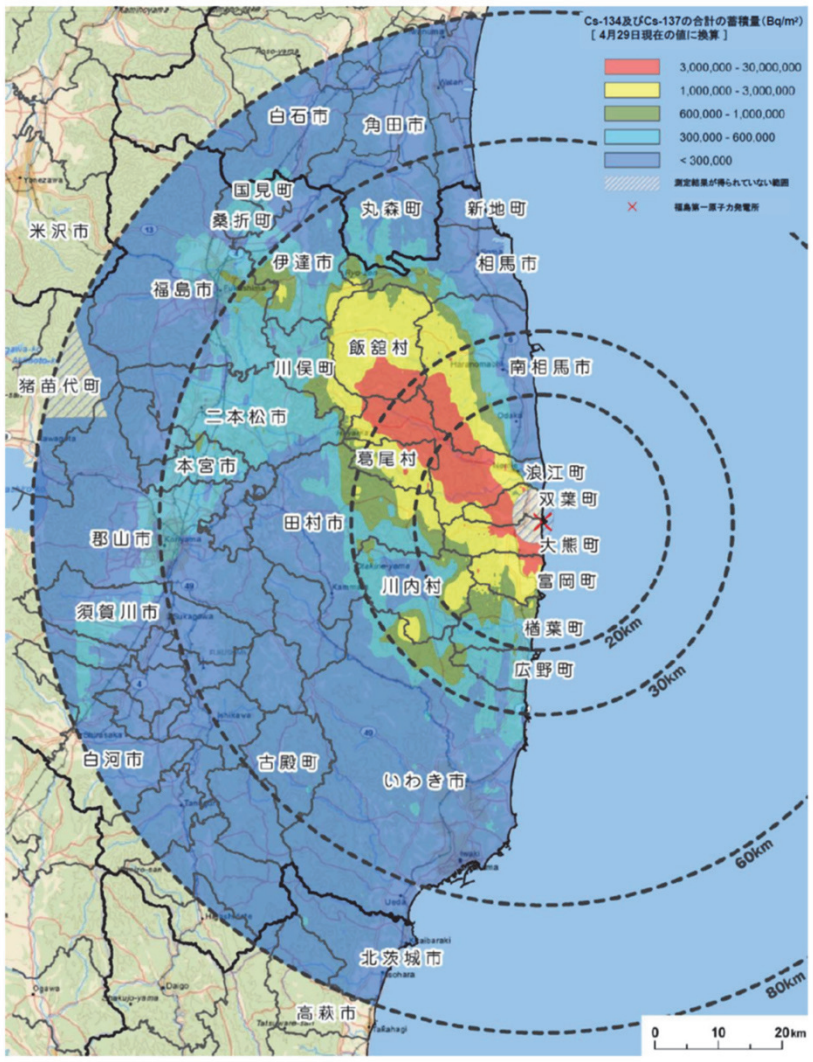
別紙1

文部科学省及び米国DOEによる航空機モニタリングの結果
（福島第一原子力発電所から80km圏内の線量測定マップ）



別紙2

文部科学省及び米国DOEによる航空機モニタリングの結果
（福島第一原子力発電所から80km圏内のセシウム134，137の地表面への蓄積量の合計）



CC BY

【4】出典：原子力規制委員会ホームページ

放射性物質の放出と拡散：放射性プルームの軌跡

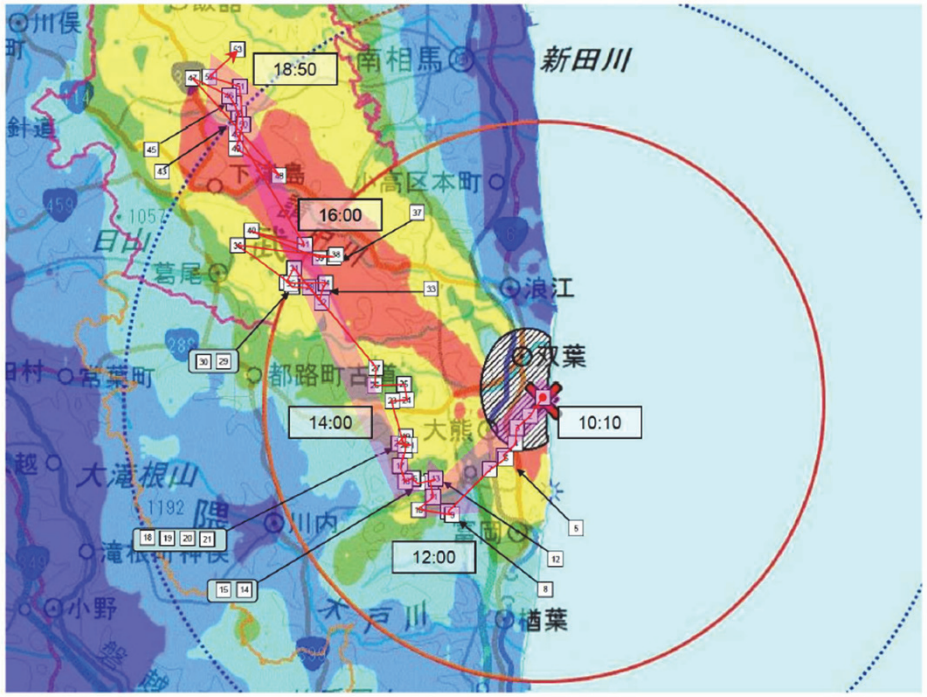


図 33　3 月 15 日　10 時過ぎの 2 号機建屋放出時に放出されたプルームの軌跡

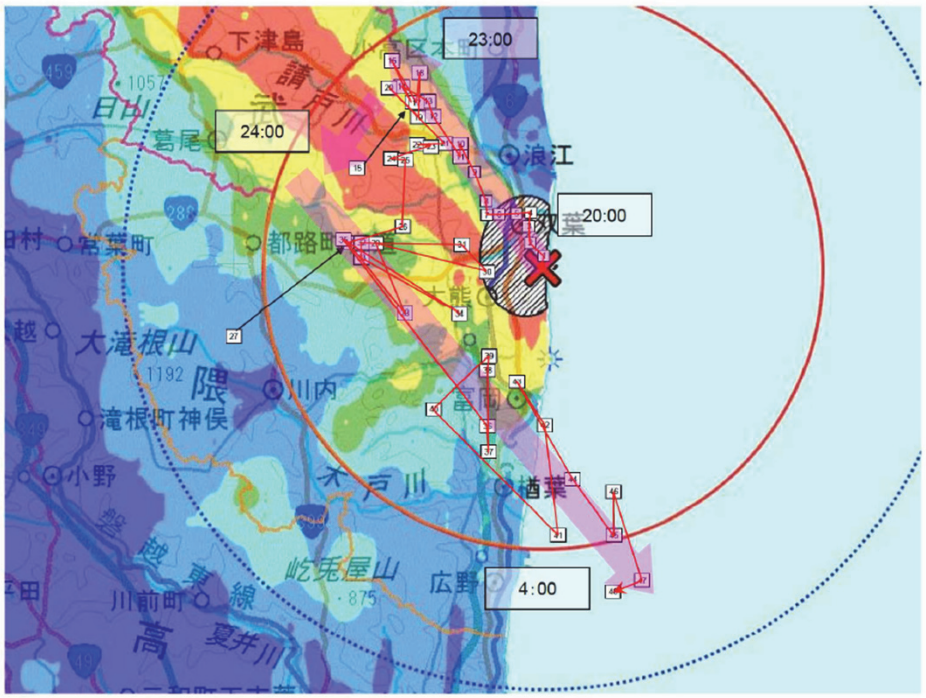
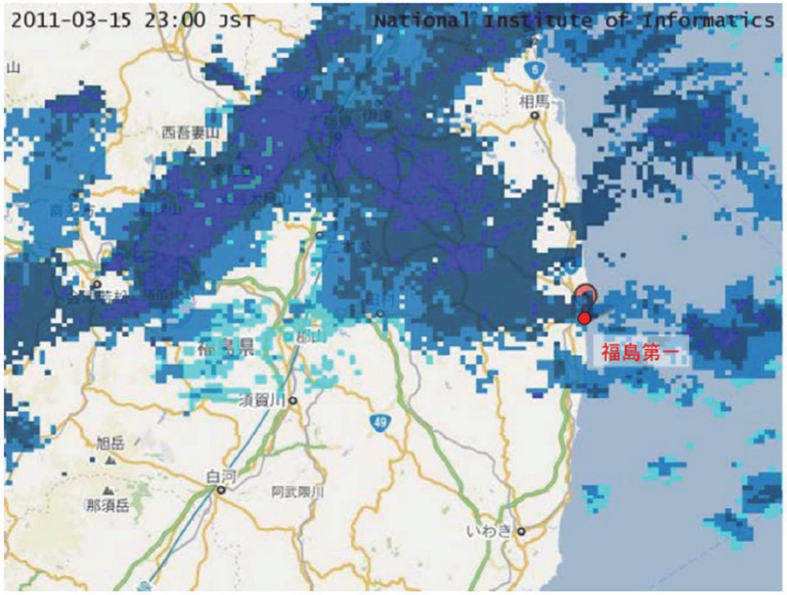


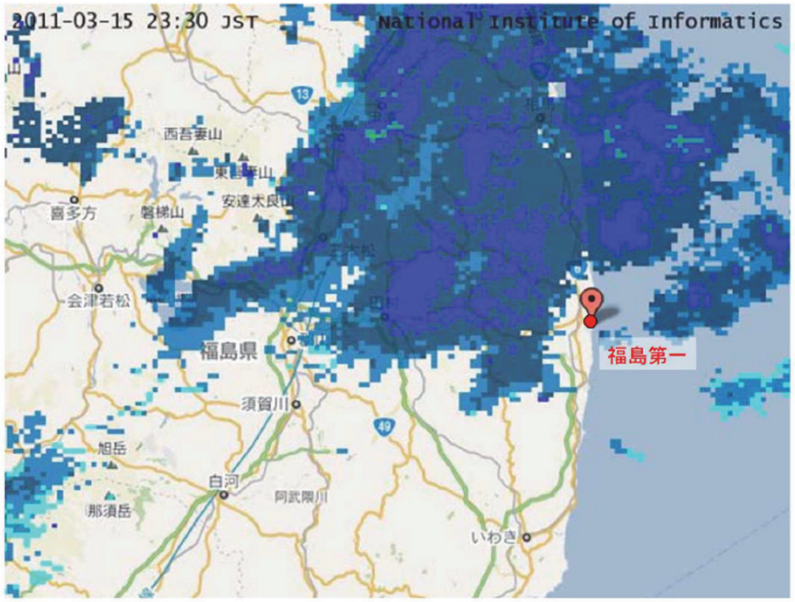
図 34　3 月 15 日　20 時過ぎの 2 号機建屋放出時に放出されたプルームの軌跡

【5】出典：福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について, p. 47, 図33, 東京電力ホールディングス

放射性物質の放出と拡散：降水量



3 月 15 日 23 時の福島県内の雨雲の状況
（出典：国立情報学研究所 HP　http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radar-20110311/）



3 月 15 日 23 時 30 分の福島県内の雨雲の状況
（出典：国立情報学研究所 HP　http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radar-20110311/）

【5】出典：福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について, p. 48, 図35, 東京電力ホールディングス

放射性物質放出量

原子力災害 チェルノブイリと福島第一の放射性核種の推定放出量の比較

核種	半減期[a]	沸点[b] ℃	融点[c] ℃	環境への放出量 PBq*		福島第一/チェルノブイリ
				チェルノブイリ[d]	福島第一[e]	
キセノン（Xe）133	5日	-108	-112	6500	11000	1.69
ヨウ素（I）131	**8日**	**184**	**114**	**～1760**	**160**	**0.09**
セシウム（Cs）134	**2年**	**678**	**28**	**～47**	**18**	**0.38**
セシウム（Cs）137	**30年**	**678**	**28**	**～85**	**15**	**0.18**
ストロンチウム（Sr）90	29年	1380	769	～10	0.14	0.01
プルトニウム（Pu）238	88年	3235	640	1.5×10^{-2}	1.9×10^{-5}	0.0012
プルトニウム（Pu）239	24100年	3235	640	1.3×10^{-2}	3.2×10^{-6}	0.00024
プルトニウム（Pu）240	6540年	3235	640	1.8×10^{-2}	3.2×10^{-6}	0.00018

事故発生時に炉心に蓄積されていた放射性核種の環境へ放出された割合

核種	チェルノブイリ[f]	福島第一[g]
キセノン（Xe）133	ほぼ100%	約60%
ヨウ素（I）131	約50%	約2-8%
セシウム（Cs）137	約30%	約1-3%

＊：PBqは$\times10^{15}$Bq。

出典：a；ICRP Publication 72（1996年），bとc (NpとCmを除く)；理化学辞典第5版（1998年），d；UNSCEAR 2008 Report, Scientific Annexes C,D and E，e；原子力安全に関するＩＡＥＡ閣僚会議に対する日本国政府の報告書（H23年6月），f；UNSCEAR 2000 Report, ANNEX J，g；UNSCEAR 2013 Report, ANNEX A

CC BY

【6】出典：環境省ホームページ

3つの爆発形態

- 水素爆発
  - 水素の燃焼(爆燃、爆轟)により発生
- 水蒸気爆発
  - 水が非常に高温の物質と触れることにより爆発的に水蒸気となることで発生
- 核爆発(動力炉では、原理的に発生しがたい)

Three Mile Island 2号機

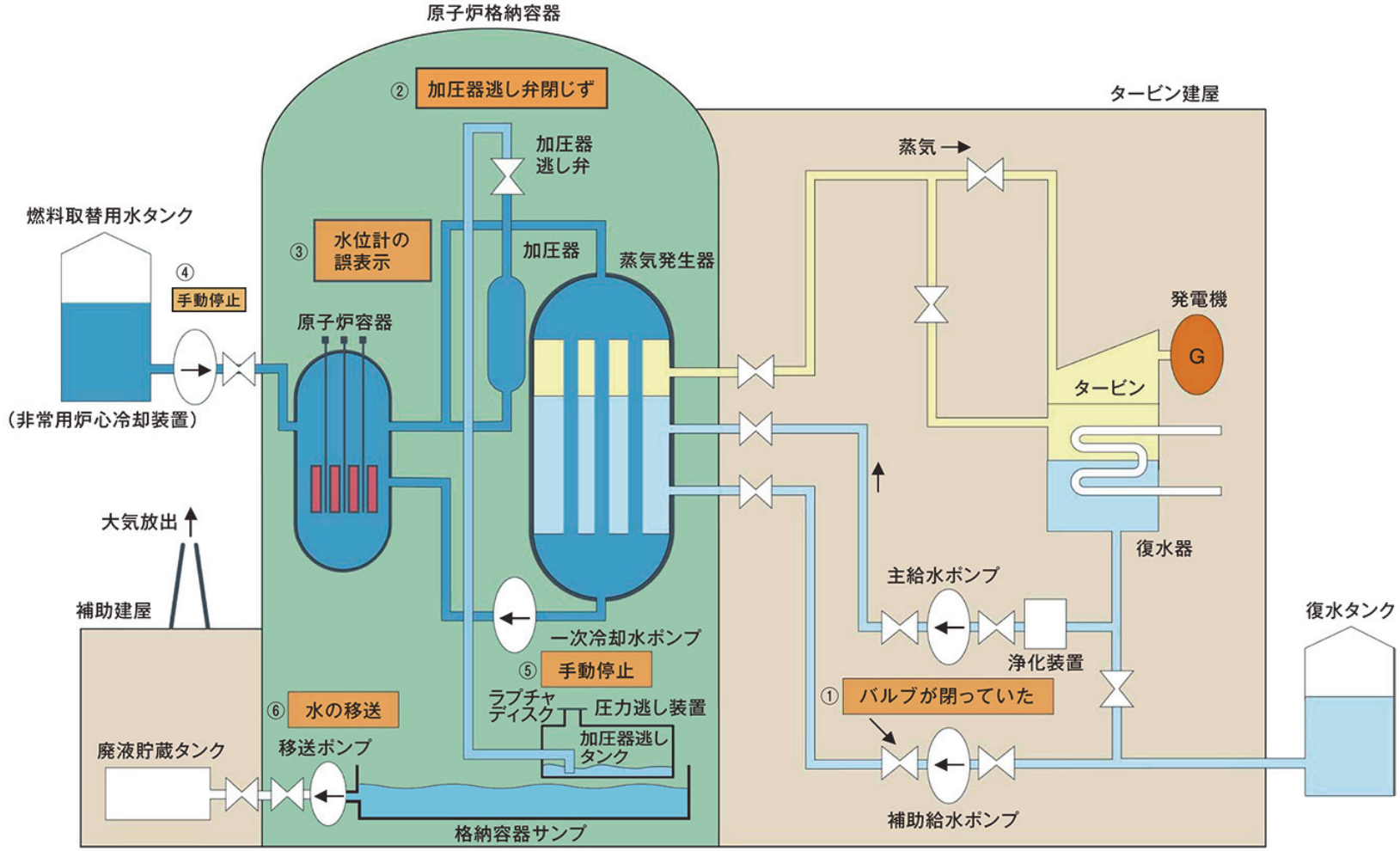
スリーマイルアイランド原子力発電所事故の概要

○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、自動起動した非常用炉心冷却装置（ECCS）を運転員が誤判断し、手動で停止した等、機器の故障や誤操作の結果、炉内構造物が一部溶解した。

○環境への影響

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。



5-5-1

原子力・エネルギー図面集

【7】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-5-1

TMI2号機の事故経過(フェーズ1および2)

- [hour:minute]
- [0:00] 給水ポンプ停止とタービントリップ
- [0:00+] PORV(Pressurizer Open Relief Valve, 加圧器逃がし弁)が15.55MPaで開、原子炉スクラム
- [0.00++] PORV閉止失敗(15.20MPa)、LOCAの開始
- [0:01-] 運転員が一次系補給水(makeup)ポンプをマニュアルで起動
- [0:01] 加圧器水位が最も低い(lowest)レベルまで低下、そして上昇に転ずる
- [0:02] 高圧注水系が自動起動、圧力容器圧力は11MPa以下に低下
- [0:03] 加圧器水位高警報
- [0:04] 運転員は高圧注水系隔離弁を絞り(給水量減少)、さらに一つの補給水ポンプを停止
- [0:12] スケールアウトしていた加圧器水位が復帰、急速に低下

TMI2号機の事故経過(フェーズ1および2)

- [0:15] 原子炉冷却水排出(ドレン)タンクのラプチャーディスクが破損
- [1:51] ループA, Bの高温側出口の温度が上昇(スケールアウト)、低温側入り口温度は低下
- [2:19] 加圧器逃がし弁を閉止(冷却材流出が停止)
- [2:20] 冷却水は炉心の中央部まで低下(推定)
- [2:50] 炉心溶融の開始、燃料が下部に移動(推定)
- [2:54] 一次冷却材ポンプが起動、17分間にわたって運転
- [3:44] 溶融物が圧力容器下部に落下(推定)
- [4:22] 一次冷却材補給水ポンプを起動、原子炉圧力容器の再冠水開始

事故前のプラント状況

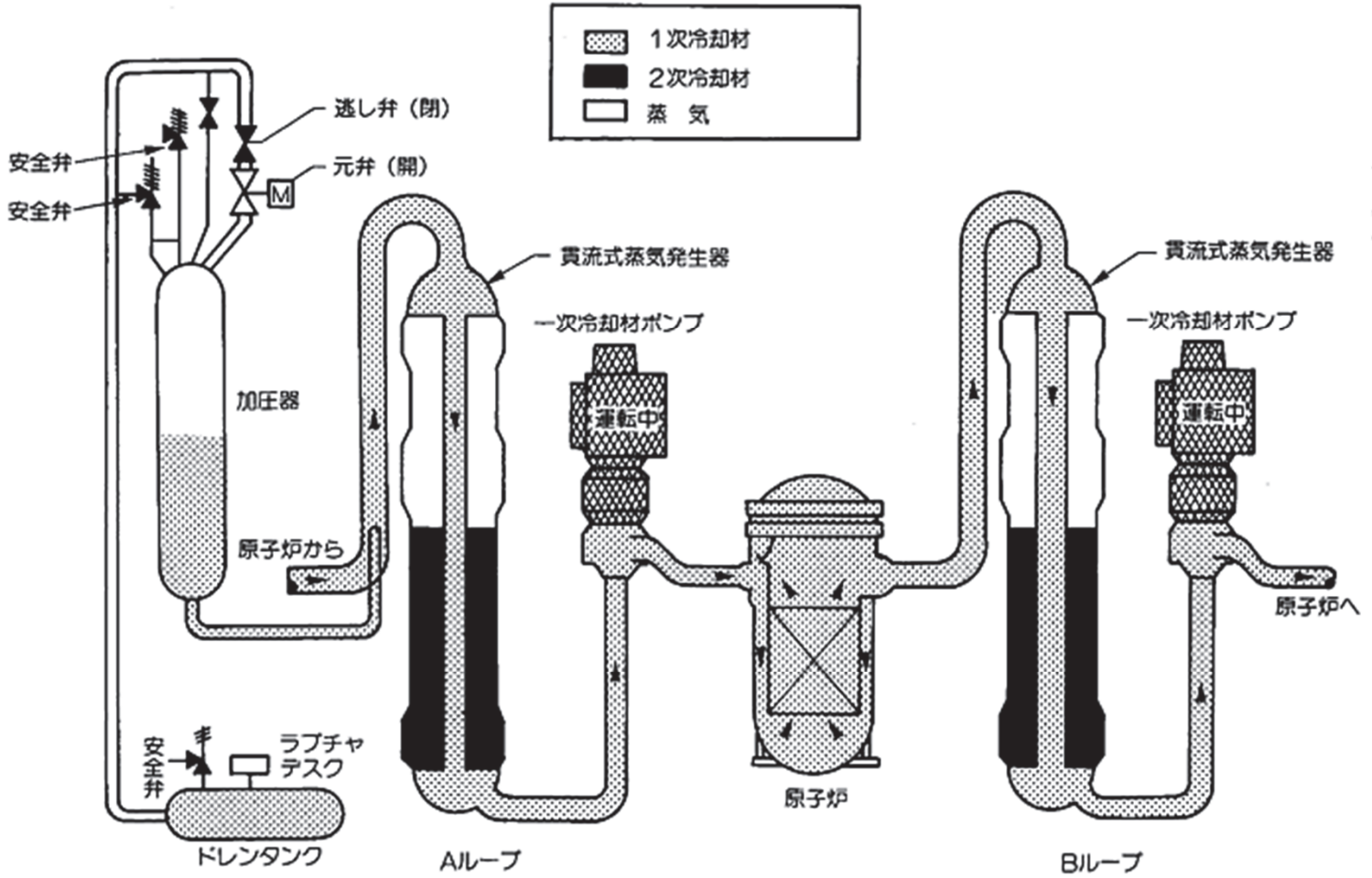


図２　事故前のプラント状況（約97%出力で運転中）

【8】出典：米国原子力発電所事故調査特別委員会第3次報告書（昭和56年5月），原子力委員会

事故発生後20分のプラント状況

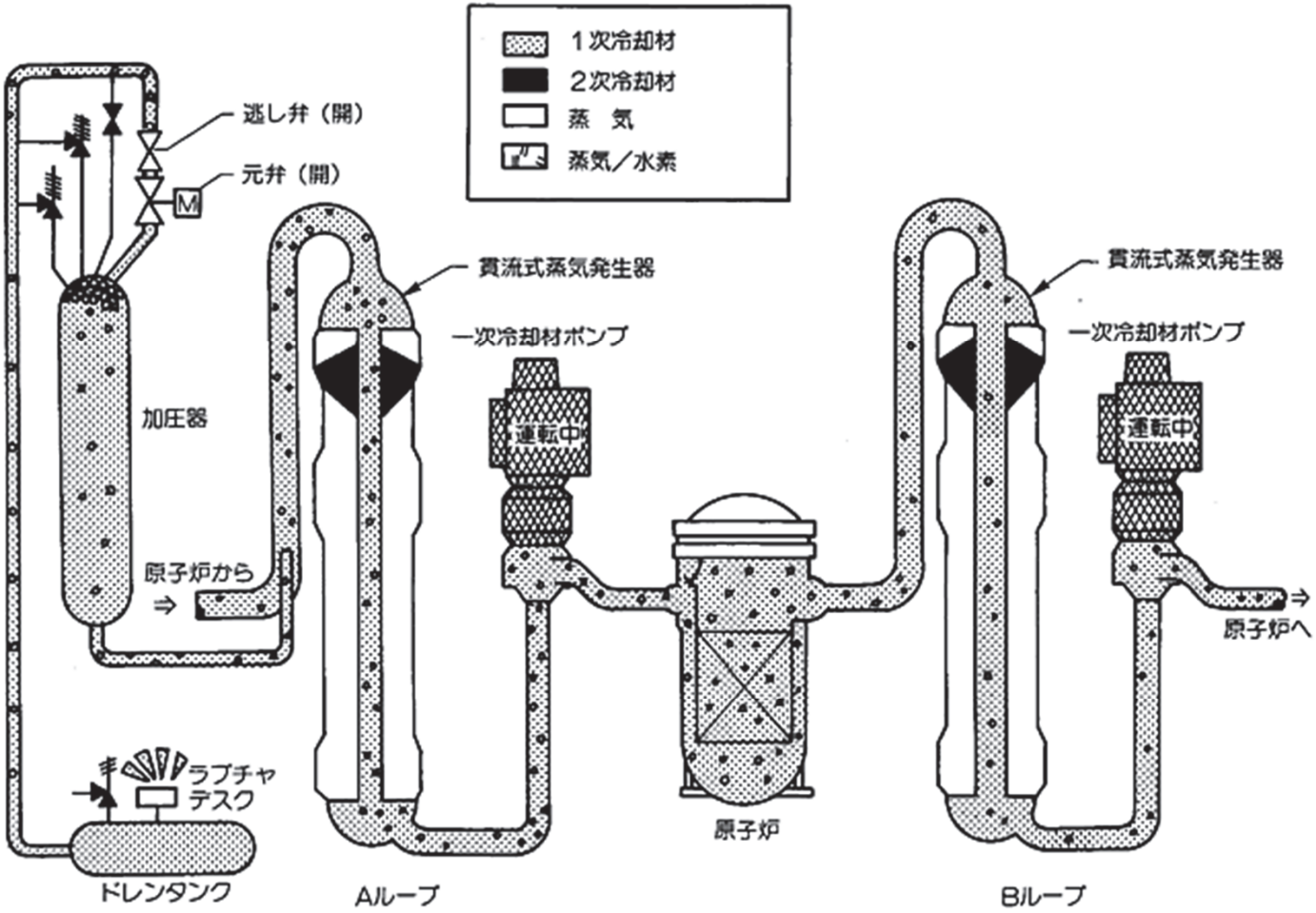


図４　事故発生後約20分後のプラント状況

【8】出典：米国原子力発電所事故調査特別委員会第3次報告書（昭和56年5月），原子力委員会

事故発生後約2時間のプラント状況

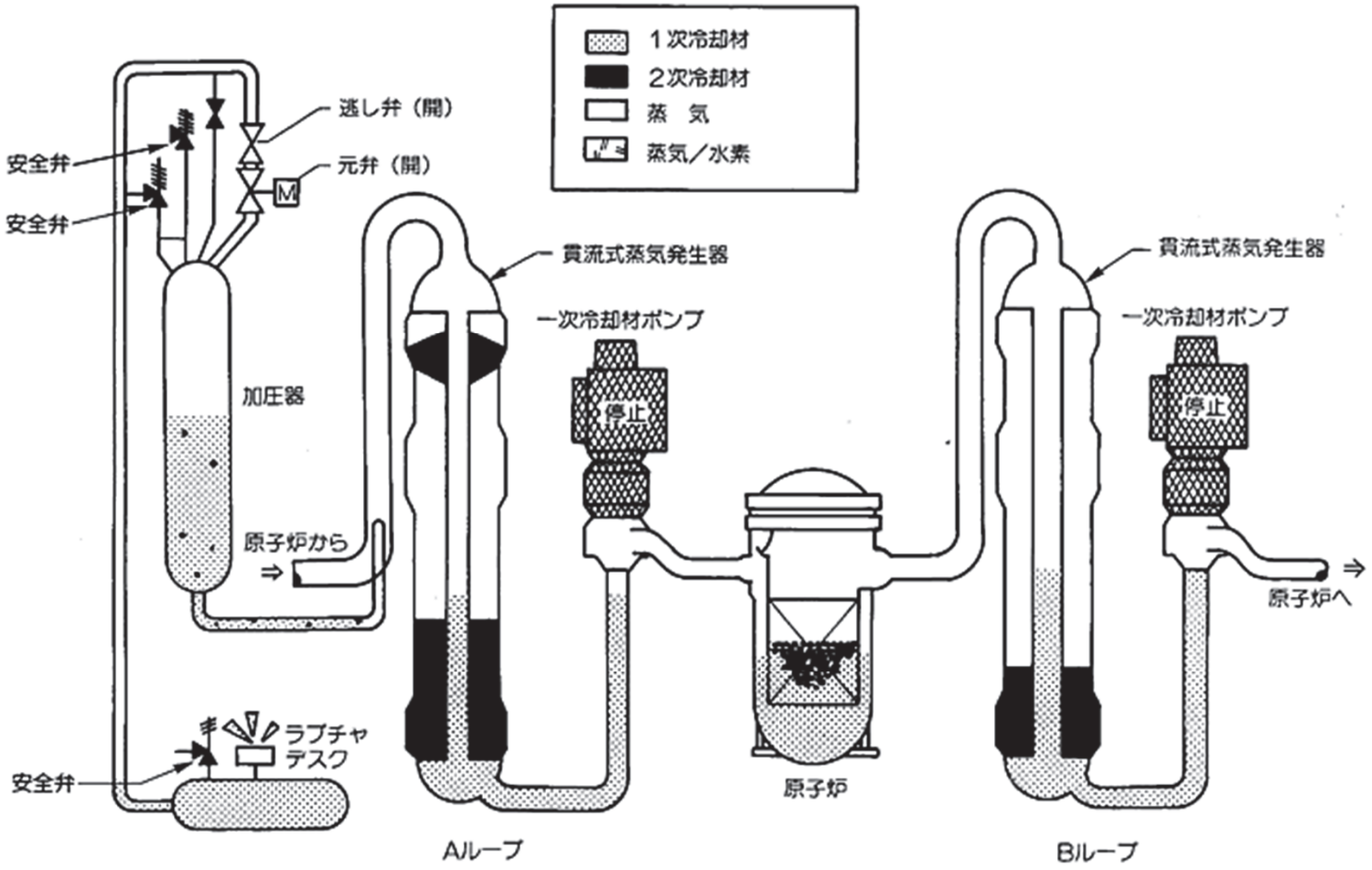


図5　事故発生後約2時間後のプラント状況（一次冷却材ポンプ停止）

【8】出典：米国原子力発電所事故調査特別委員会第3次報告書（昭和56年5月），原子力委員会

事故発生後約10時間30分のプラント状況

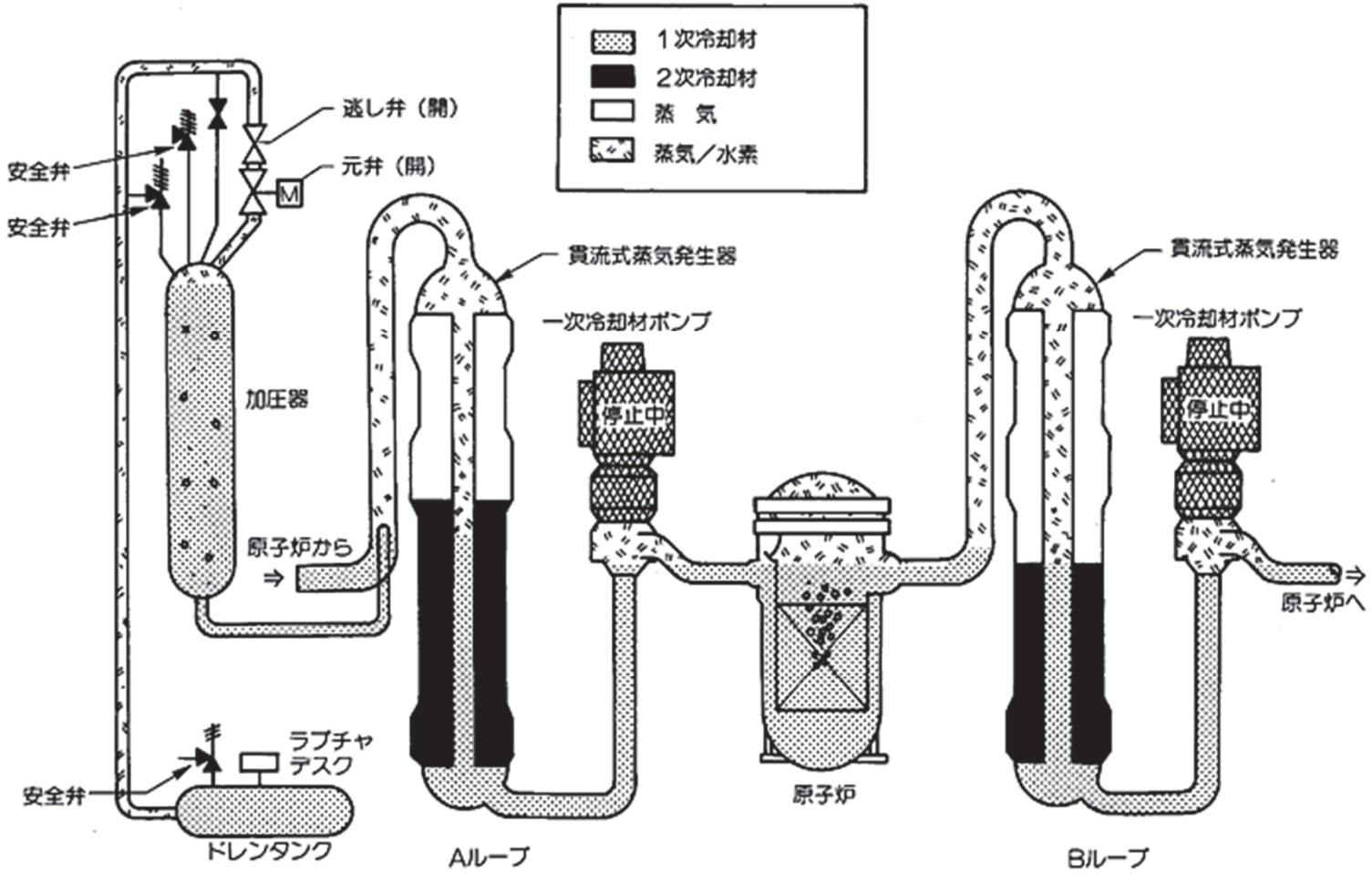
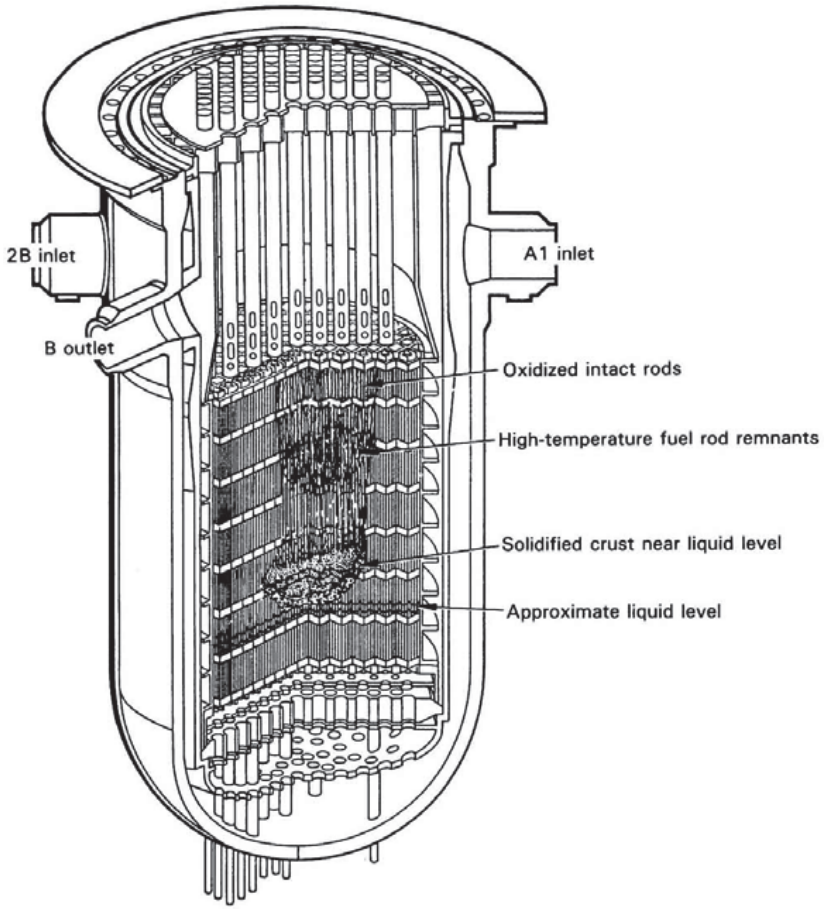


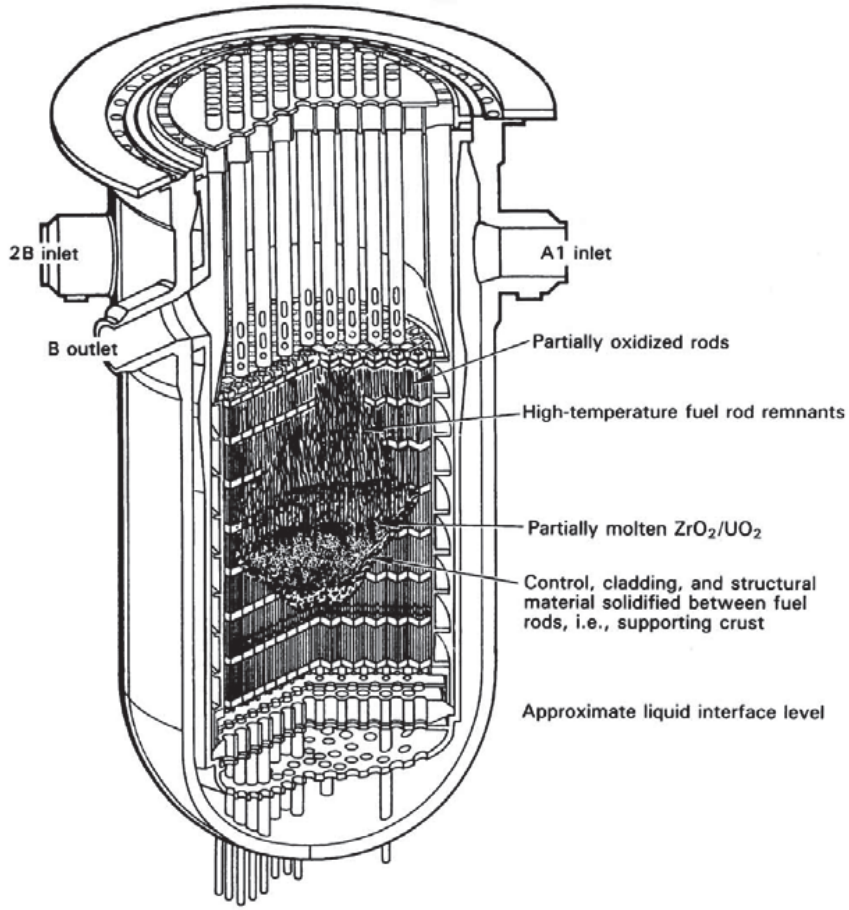
図６　事故発生後約10時間30分後のプラント状況

【8】出典：米国原子力発電所事故調査特別委員会第3次報告書（昭和56年5月），原子力委員会

TMI2号機の炉心損傷の進展



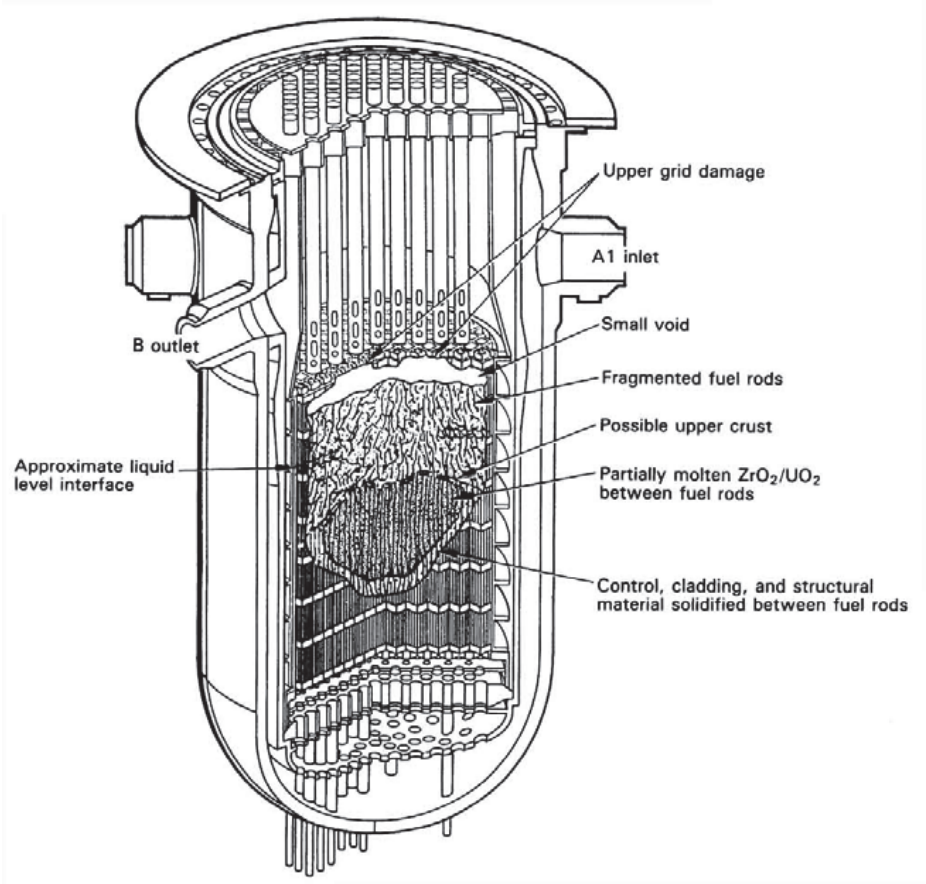
Core Condition –approx. [2:30]



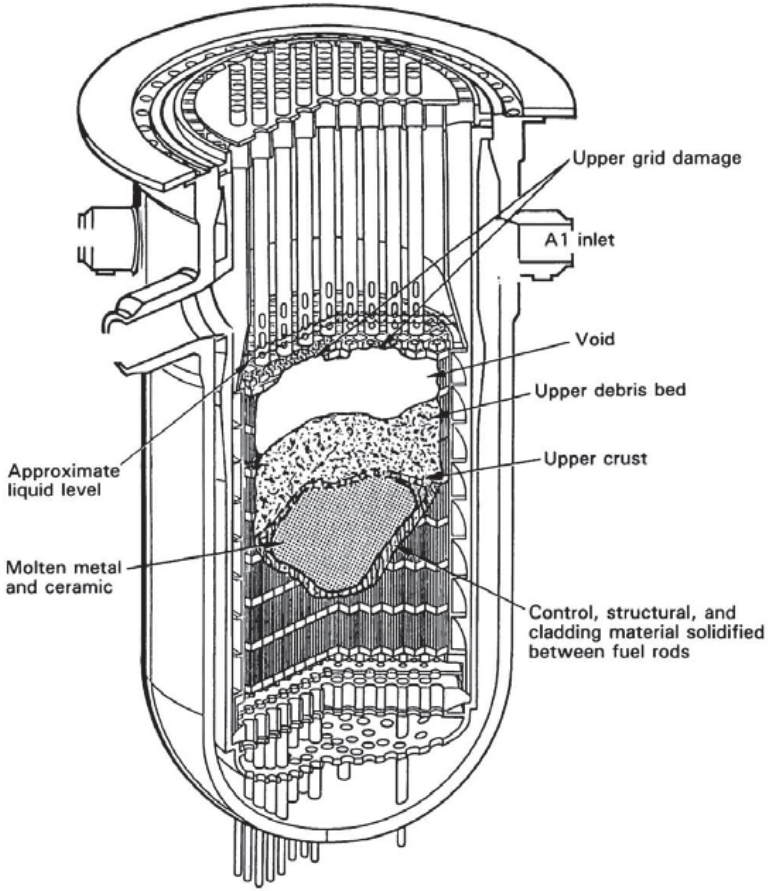
Core Condition approx. [2:53]

【9】出典：James M. Broughton et al. (1989), A Scenario of the Three Mile Island Unit 2Accident, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 42, Fig. 8 and p. 43, Fig. 9, Taylor & Francis

TMI2号機の炉心損傷の進展



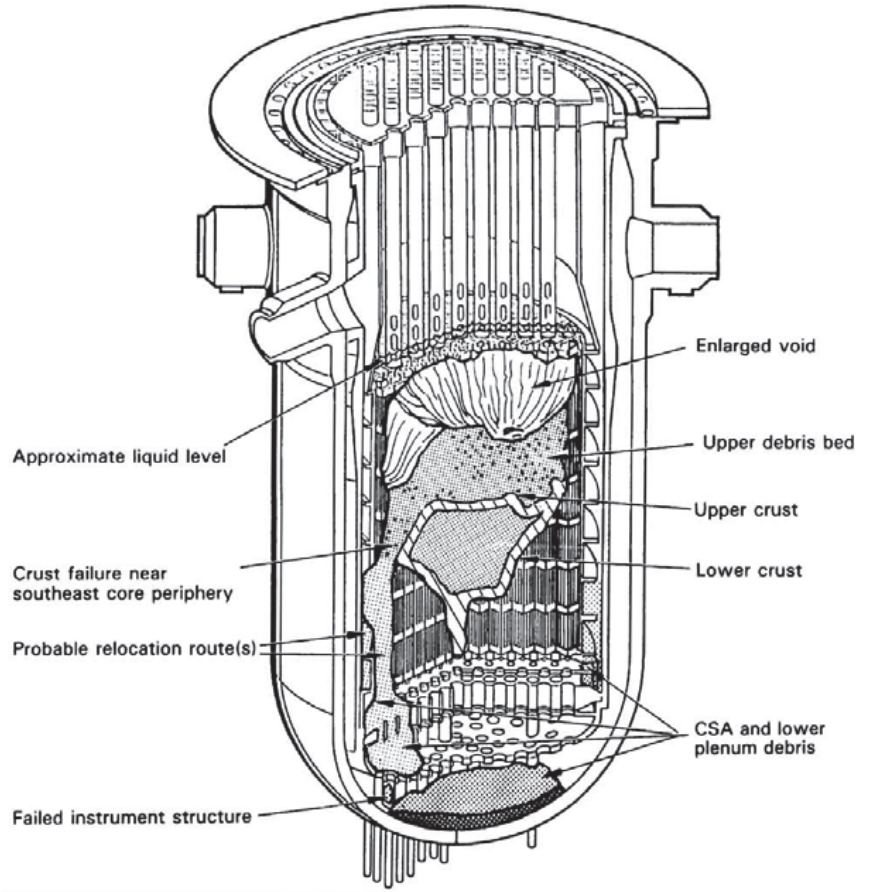
Core Condition –approx. [3:00]



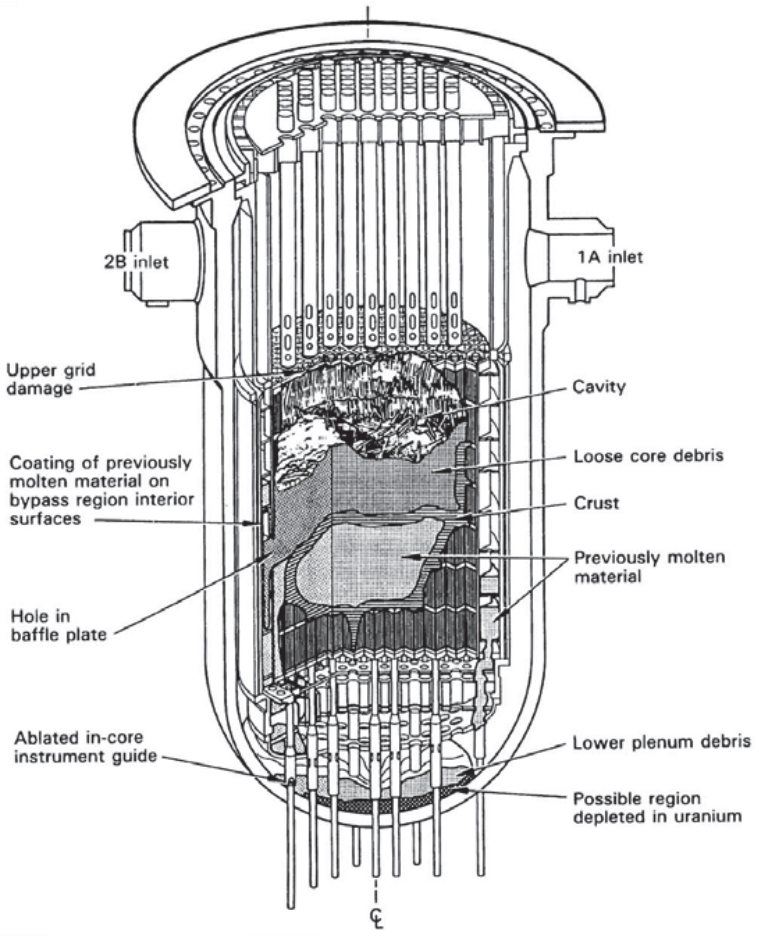
Core Condition approx. [3:43]

【9】出典：James M. Broughton et al. (1989), A Scenario of the Three Mile Island Unit 2Accident, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 44, Fig. 10 and p. 47, Fig. 12, Taylor & Francis

TMI2号機の炉心損傷の進展



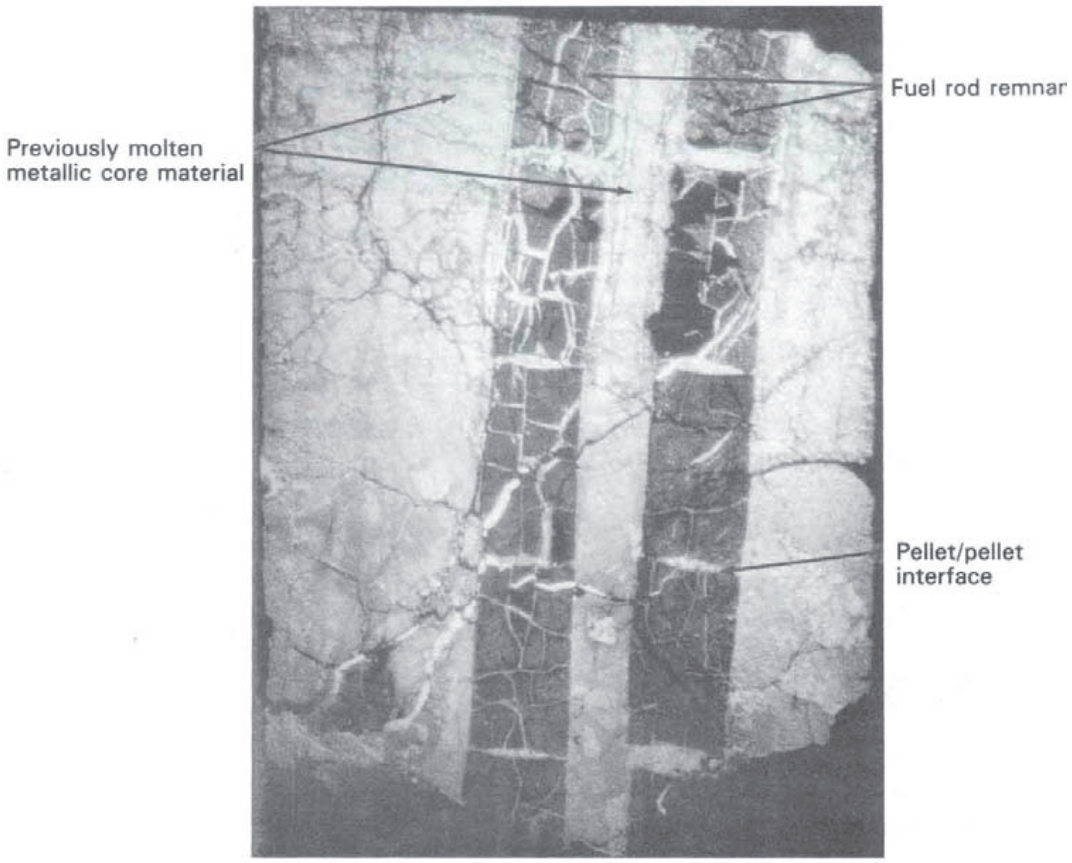
Hypothesized core configuration during melt relocation



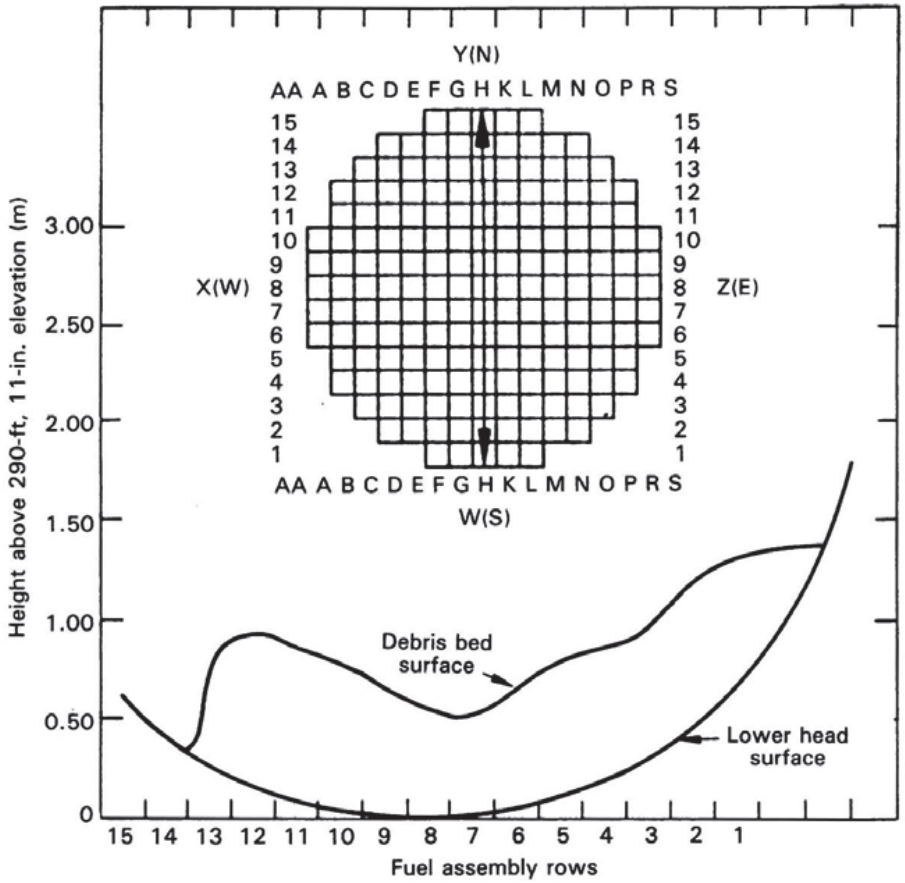
Core end state configuration

【9】出典：James M. Broughton et al. (1989), A Scenario of the Three Mile Island Unit 2Accident, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 49, Fig. 14 and p. 35, Fig. 1, Taylor & Francis

TMI2号機の事故後の調査



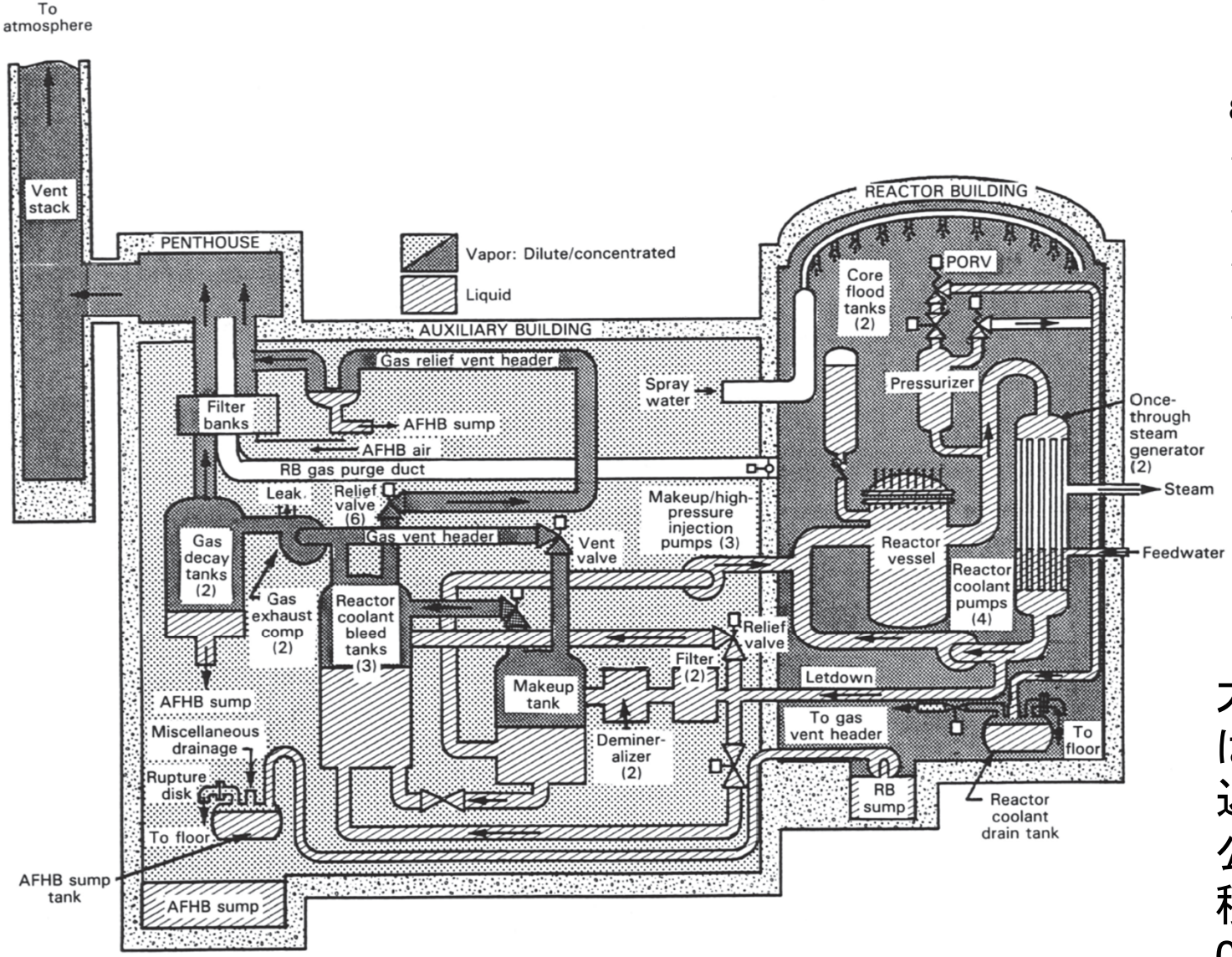
Sample of material from lower crust near the RV centerline



Frozen debris bed on lower head

【9】出典：James M. Broughton et al. (1989), A Scenario of the Three Mile Island Unit 2Accident, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 37, Fig. 3 and p. 38, Fig. 4, Taylor & Francis

TMI2号機のFP放出



Fractional release to environment

$_{88}$Kr	0.009
$_{133}$Xe	0.010
$_{133m}$Xe	0.047
$_{135}$Xe	0.006
$_{131}$I	2.3E-7

大部分の放射性物質は格納容器内に閉じ込められていた。
公衆被ばくは最大に見積もっても1mSv平均で0.015 mSv程度。

【10】出典：Sidney Langer et al. (1989), Fission Product Release Pathways in Three Mile Island Unit 2, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 197, Fig. 1, Taylor & Francis

深層防護との関係

- 第一層：異常発生防止
  - 運転員の技術レベル
  - プラントの管理体制が不十分
  - 補助給水ポンプの出口弁が閉じられていたままで運転されていた
  - 同型のプラントで加圧器逃がし弁の開固着が発生したにもかかわらず共有されていなかった
- 第二層：事故発生・拡大防止
  - 加圧器逃がし弁の状態表示が不適切で、運転員が開固着に気づかなかった。
  - 中央制御室の警報などが見にくく、プラントの状態を的確に把握できなかった
- 第三層：事故の影響緩和
  - 運転員が誤判断でECCS手動停止
  - 格納容器の設計に問題があり、放射性物質の閉じ込めが完全でなかった

教訓の反映

- 運転員の教育・訓練の強化
- 運転手順の見直し
- 発電所緊急時対策所の設置
- 誤操作防止を配慮した制御盤の設置
- 計測機器の充実・強化
- 防災対策の充実・強化

など

教訓の反映

我が国の安全確保対策に反映させるべき事項（52項目）

昭和54年9月 原子力安全委員会 米国原子力発電所事故調査特別委員会

1	基準・審査関係	(1) 基準関係	①安全設計審査指針及び関連技術基準	(イ) 安全上重要な系統及び機器の分類
2				(ロ) 原子炉計測制御系及びプロセス計測制御系の信頼性
3				(ハ) 事故時に必要とされる系統及び機器
4				(ニ) 緊急時中央司令所
5				(ホ) 可燃性ガス濃度制御系
6				(ヘ) 制御室
7			②安全評価審査指針	(イ) ヒューマン・クレジット及び単一故障
8				(ロ) 運転時の異常な過渡変化及び事故の解析条件
9			③ECCS安全評価指針（小破断LOCA事象についても留意する必要がある）	
10		(2) 審査関係	①安全上重要な系統及び機器の自動作動	
11			②技術的能力及び運転管理体制（運転等の段階でさらに十分に確認する必要がある）	
12			③制御室への接近可能性及び居住性（制御室の遮蔽、換気）	
13			④事故時に必要とする機器等（水素濃度制御装置、長期冷却系などの遮蔽）	
14	設計関係	(1) 小破断LOCA事象時の安全性		
15		(2) 1次冷却材の状態の監視方式（サブクール状態の常時監視など）		
16		(3) ガス対策 （1次系内のガスの除去法など）		
17		(4) 制御系のレイアウト等 （人間工学的観点からも検討する必要がある）		
18		(5) 事故時における放射線及び放射性物質の測定		
19		(6) 弁の信頼性 （材質、機能の信頼性）		
20		(7) 運転員の誤動作防止対策		
21	運転管理関係	(1) 格納容器の隔離に対する運用（隔離方式の見直し）		
22		(2) ECCS作動時における1次冷却材ポンプの作動条件		
23		(3) ECCSの停止操作及び切換操作		
24		(4) 補修時における点検頻度等		
25		(5) 手動弁の管理方式（例えば、鍵管理、表示方式の検討）		
26		(6) 運転員の長期養成計画		
27		(7) 運転員の誤操作防止対策		
28		(8) プラントの運転管理体制（原子炉主任技術者の位置づけは、技術的援助体制など）		
29		(9) 報告すべき異常事象		
30		(10) 緊急時の放射線測定器及び防護用機材の点検、整備（高線量率測定器など）		
31	防災関係	(1) 防災対策に関する専門的事項の調査審議について	①防災計画立案地域の範囲	
32			②防災活動上必要な対策指標（指標線量、指標温度）	
33			③緊急時の環境モニタリング指針の作成	
34			④環境放射能予測システムの開発	
35		(2) 防災業務計画の円滑な遂行について	①緊急時組織	
36			②モニタリング設備	
37			③一般公衆の被曝線量の評価	
38			④緊急時連絡（電話回線、それ以外の連絡方法）	
39			⑤輸送手段の確保	
40			⑥教育・訓練	
41	安全研究関係	(1) 関連する事象の解析と対応技術の確立	①小破断LOCA時の二相流の実験及び解析	
42			②自然環境炉心冷却に関する研究	
43			③流量停滞時における炉心冷却機能に関する研究	
44			④LOCA条件下の格納容器内機器の信頼性の研究	
45			⑤圧力容器ノズル部のサーマルショックに対する信頼性の研究	
46		(2) 人為的な誤操作による事故の発生を防ぐための研究	①プラントの状態の把握に必要な研究	
47		(3) 軽水炉施設の信頼度解析研究等	①プラント構成機器の信頼性の研究	
48			②信頼度解析研究	
49			③定量的リスク評価研究	
50		(4) 事故時対策に関する研究	①事故時対策用データバンクシステムに関する研究	
51			②事故時放射性物質放出量解析システムに関する研究	
52			③環境放射能予測システムに関する研究	

図2　我が国の安全確保対策に反映させるべき事項（52項目）

【11】出典：原子力図面集, 1992年改訂, 原子力文化振興財団

チョルノービリ（チェルノブイリ）4号機

チェルノブイリ4号機(事故後)

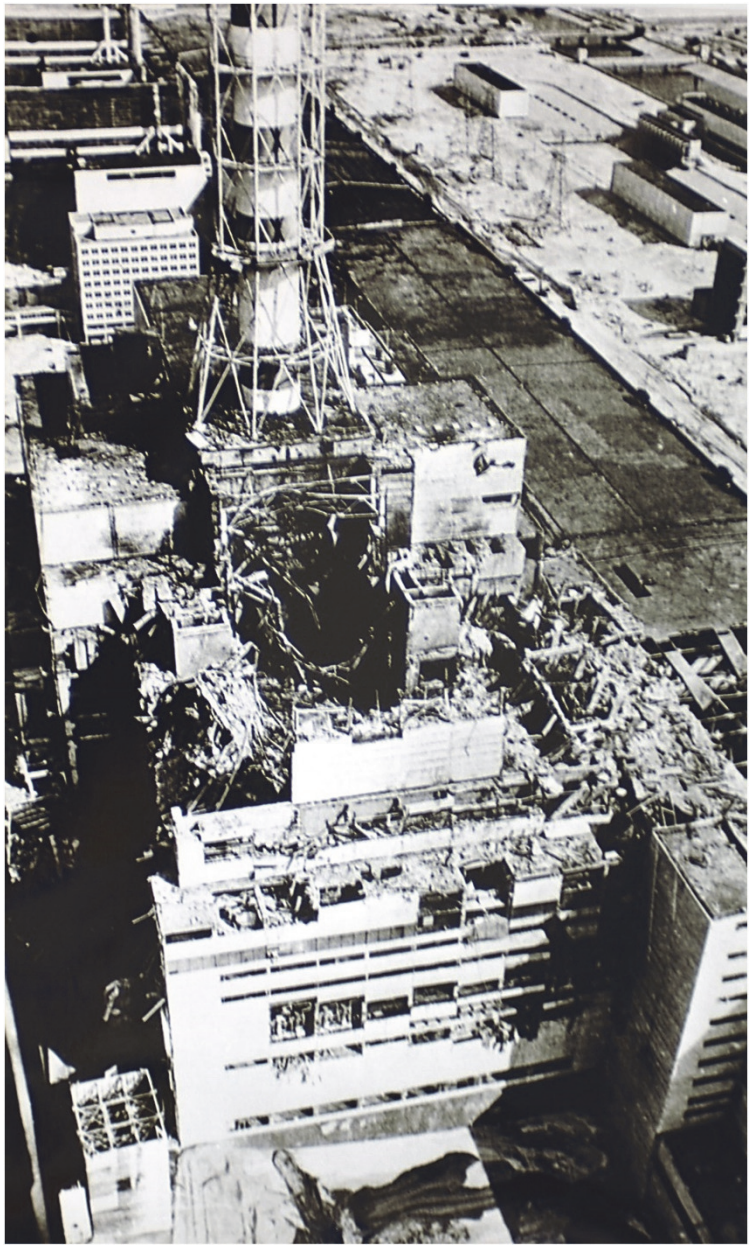


タービン発電機建屋側から撮影、手前に見える鉄塔は屋外開閉所の一部

図11　事故直後のチェルノブイリ原子力発電所3，4号炉の俯瞰写真（タービン発電機建屋側から撮影、手前に見える鉄塔は屋外開閉所の一部）

【12】出典：原子力百科事典ATOMICA, 日本原子力研究開発機構

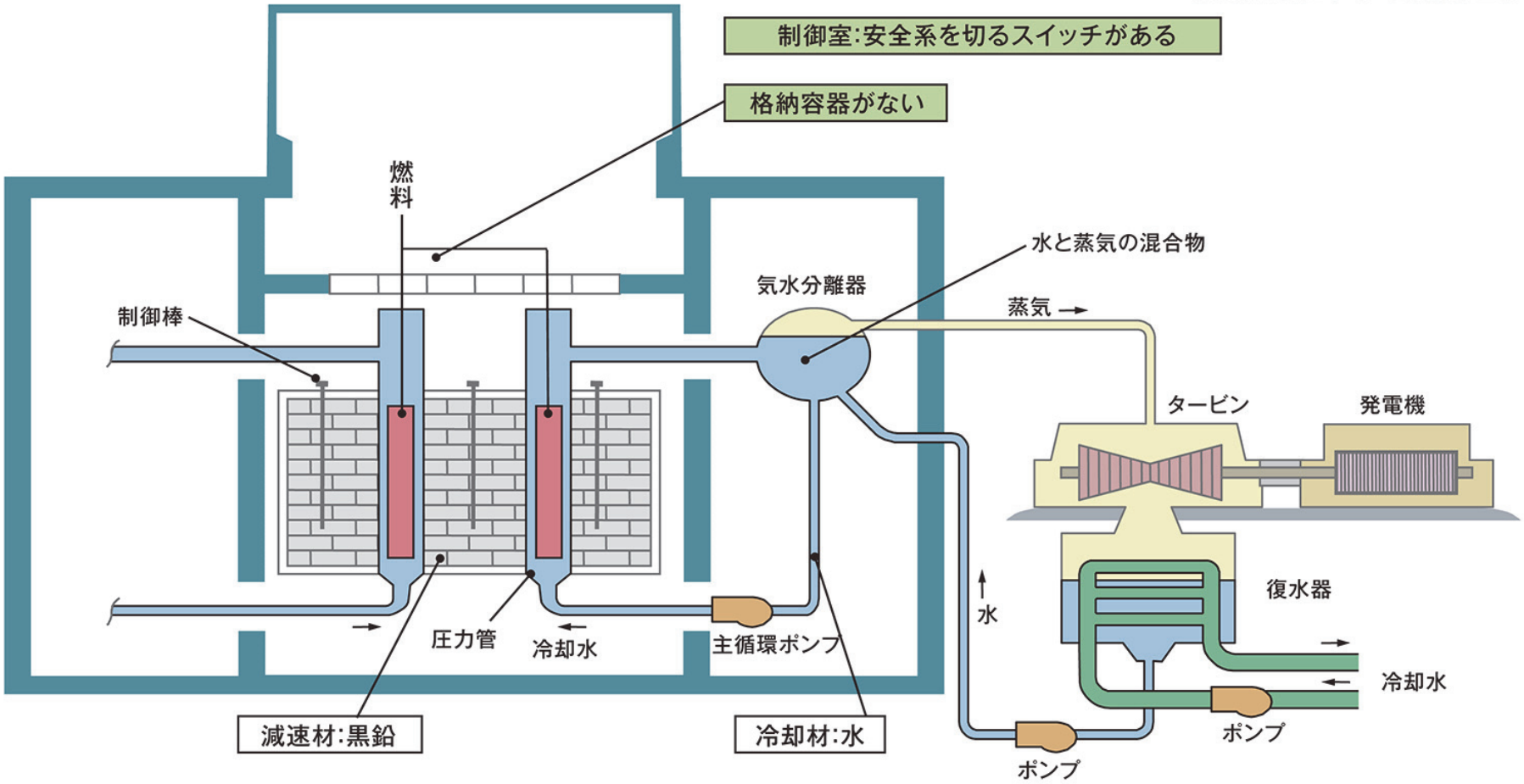
チェルノブイリ4号機(事故後)



【13】出典：IAEA Imagebank

チェルノブイリ原子力発電所の構造

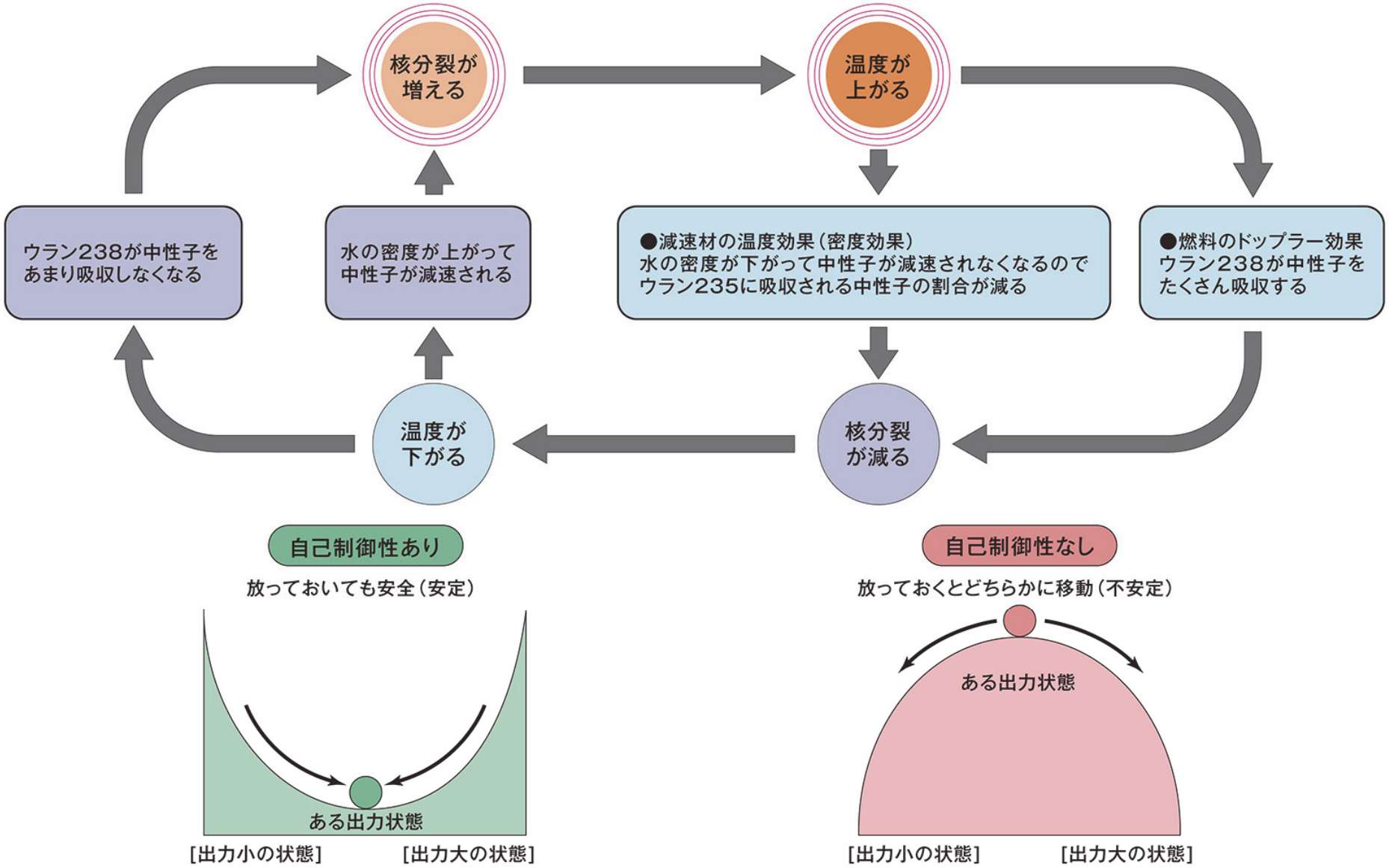
（黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉RBMK）



	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	容易に外せる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

【14】出典:原子力・エネルギー図面集, 図5-4-1

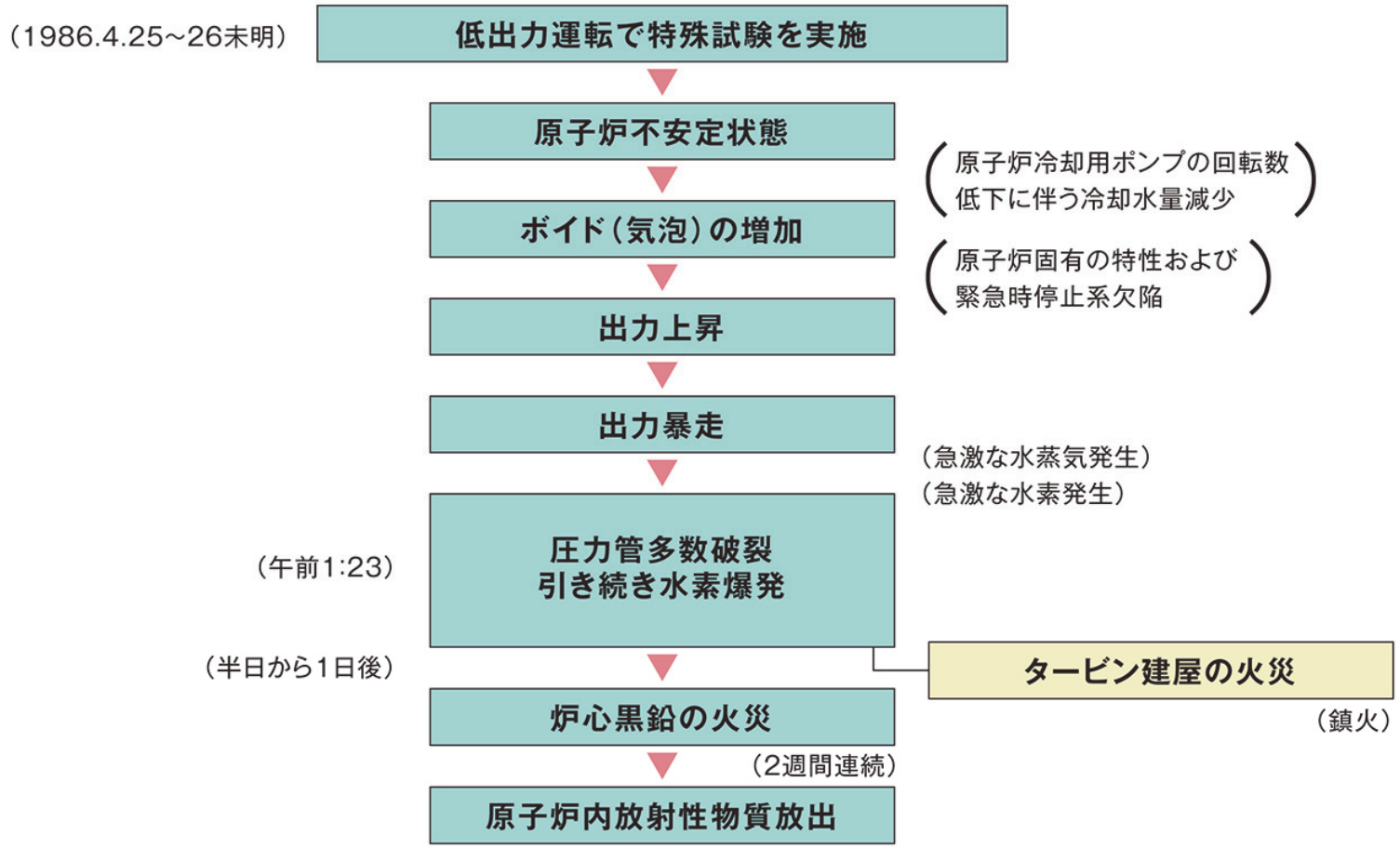
原子炉の固有の安全性（自己制御性）



5-2-1

【15】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-2-1

チェルノブイリ原子力発電所事故の経過



【16】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-4-2

チェルノブイリ原子力発電所事故の原因

セイフティーカルチャーの欠如

設計上の問題点

●格納容器がない

●安全装置が簡単に切れる設計

●低出力時に、冷却水中のボイド（気泡）が増えると出力が上昇するという特性（正のボイド係数）等

運転員の規則違反

●制御棒の規定以上の引き抜き

●非常用炉心冷却装置（ECCS）を切って運転を実施

●計画を下回る低出力での特殊試験　等

低出力領域
（全出力の20％以下）
では不安定なため連続
運転は禁止されていた

運転管理上の問題

●原子炉の専門家でないものが指揮

●正規の手続や発電所全体の合意なしに特殊試験を実施

●安全対策の検討が不十分　等

【17】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-4-3

深層防護との関係(安全文化の欠如)

- 第一層：異常発生防止
  - 低出力時に、冷却水中のボイド（気泡）が増えると出力が上昇するという特性（正のボイド係数）
  - 規定以上の制御棒の引き抜き
  - 計画を下回る低出力での特性試験（低出力領域（全出力の20%以下）では連続運転は禁止）
  - 原子炉の専門家でないものが実験を指揮
  - 正規の手続きや発電所全体の合意なしに特殊試験を実施
  - 安全対策の検討が不十分
- 第二層：事故発生・拡大防止
  - 安全装置が簡単に切れる設計
  - ポジティブスクラム(制御棒挿入時に、一時的に正の反応度が添加させる性質)
- 第三層：事故の影響緩和
  - 格納容器がない
  - 非常用炉心冷却装置(ECCS)を切って運転を実施

甲状腺がんの発生率

小児甲状腺がんの発生件数と100万人あたりの発生率

	1981-85年		1986-90年		1991-94年	
地域	発生件数	発生率（100万人あたり）	発生件数	発生率（100万人あたり）	発生件数	発生率（100万人あたり）
ベルラーシ	3	0.3	47	4	286	30.6
ゴメリ	1	0.5	21	10.5	143	96.4
ウクライナ	25	0.5	60	1.1	149	3.4
北部5地域	1	0.1	21	2	97	11.5
ロシア（ブリヤンスク・カルーガ地域）	0	0	3	1.2	20	10

Chernobyl - Ten Years On: Radiological and Health Impact (1995), OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY のデータをもとに作成

その他の事故・トラブル

SL-1：反応度投入事故
デービスベッセ：原子炉容器上蓋腐食
美浜2号機：SG伝熱管破損
美浜3号機：2次系主給水管破断
浜岡1号機：残留熱除去系の水素爆発
もんじゅ：2次系ナトリウム漏えい
JCO：臨界事故

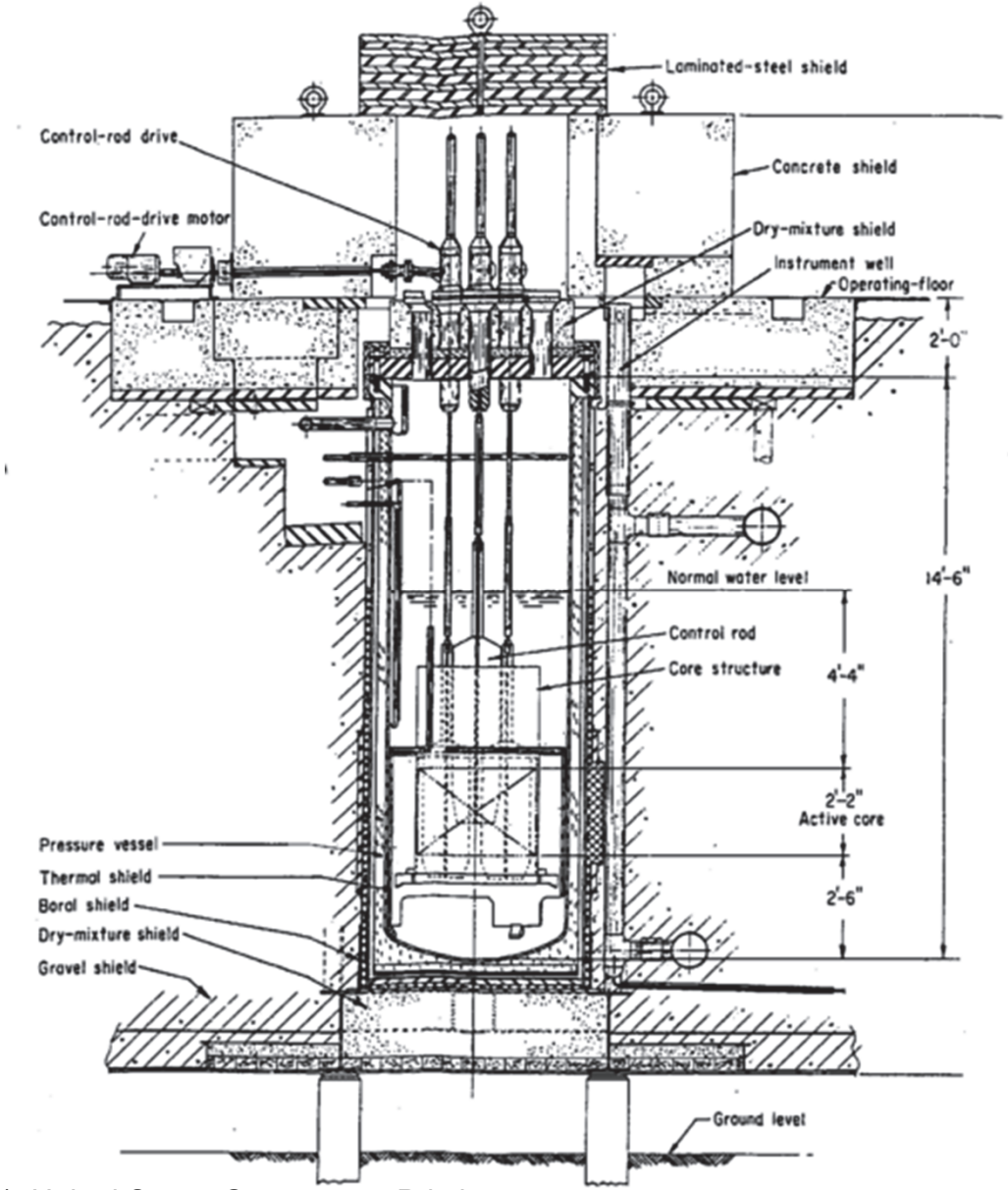
SL-1事故（概要）

項目	概要
1. 発生年月日	1961年1月3日　米国アイダホ州　NRTS
2. プラント名 出力、炉型	SL-1(Stationary Low-Power Reactor Number One) BWR、軍事用試験炉
3. 事故の内容、原因	運転員が制御棒を誤って引き抜いたことにより 反応度が添加され、原子炉が暴走
4. 被害状況	作業員3名死亡

SL-1事故（事故進展）

- 5本の制御棒のうち、1本を規定以上引き抜き
- 反応度印加
- エネルギー発生
- 燃料棒の溶融
- 溶融した燃料が水中に分散
- 蒸気爆発
- 蒸気爆発によって炉心上部にあった水が吹き上げられる
- 水撃効果
- 原子炉圧力容器の破壊
- FP及び燃料物質の炉外放出

SL-1原子炉断面図



PD【18】出典：Stacy, Susan M. (2000), United States Government Printing

SL-1(事故後)



PD【18】出典：Stacy, Susan M. (2000), United States Government Printing

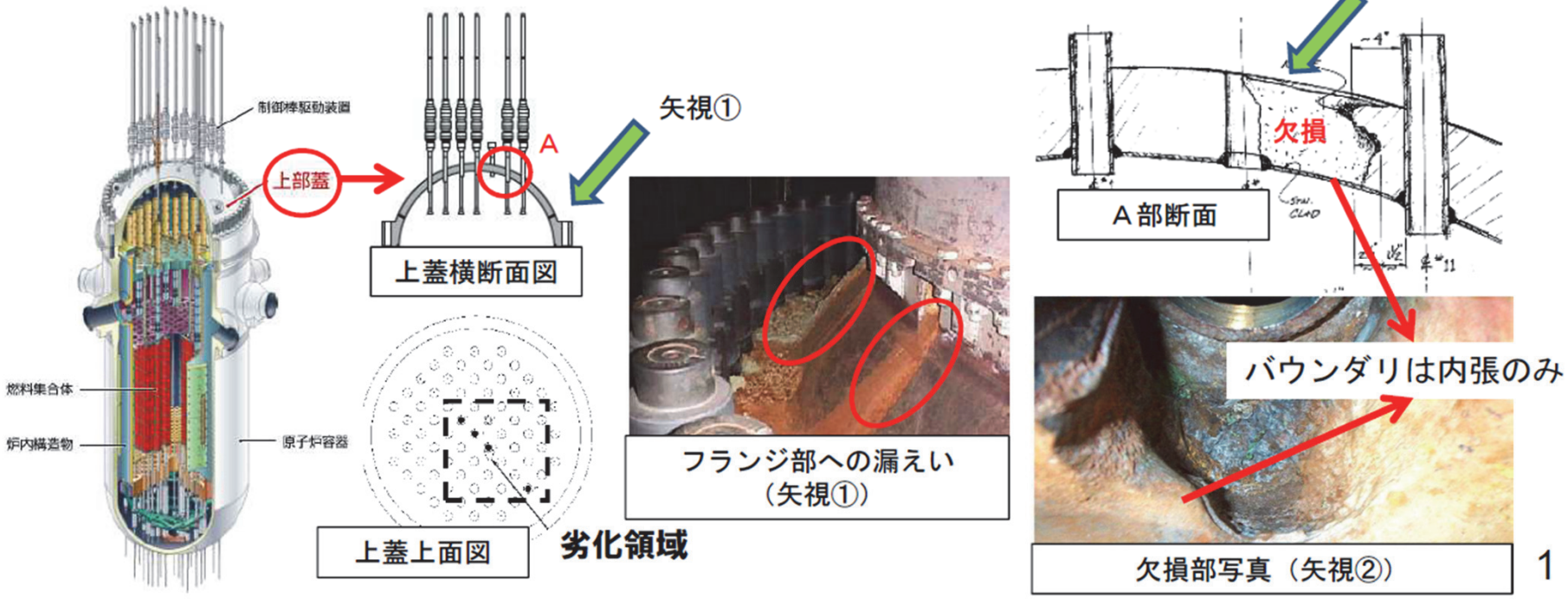
SL-1事故の教訓

- One rod stuck margin基準
  - もっとも反応度価値が大きい制御棒を1本完全に引き抜いた状態でも原子炉を未臨界に出来る必要がある

デービスベッセ圧力容器上蓋減肉

- 2002年、原子炉容器上蓋貫通部の検査時に、制御棒駆動機構（ CRDM ）ノズル溶接部でクラック（１次冷却材応力腐食割れ（PWSCC）が原因）からのホウ酸の漏洩を発見。
- 補修時に、当該ノズルの下り勾配側で原子炉容器上蓋母材が深さ６インチほど欠損していることが判明。
- さらに、原子炉容器上蓋内張であるステンレス鋼クラッド（内張）が、４インチにわたって反っていることが判明。欠損箇所について、内張のみが残っていた。

１次冷却材圧力バウンダリの劣化



1

CC BY
【19】出典：原子力規制委員会ホームページ

安全文化への対応

デービスベッセ問題に対する根本原因分析（事業者）

・1998年及び2000 年に原子炉容器上蓋の目視検査を実施し、CRDMフランジからのホウ酸漏洩は発見していたが、ノズルからの漏えいまでは確認していなかった。
⇒ 漏えいについて他の箇所も確認すべきであった。

一次冷却材圧力バウンダリ劣化を示す以下の状況を長年放置。
・ホウ酸の漏洩箇所が特定できない。
・ホウ酸による腐食に係る既知の情報を放置。
・格納容器エアクーラの汚れ。
・放射性物質フィルターの汚れ。

教訓タスクフォース
会計検査院
議員

NRCに対し、安全文化の監視を強化する勧告が出された。

NRCは、安全文化対応計画を作成

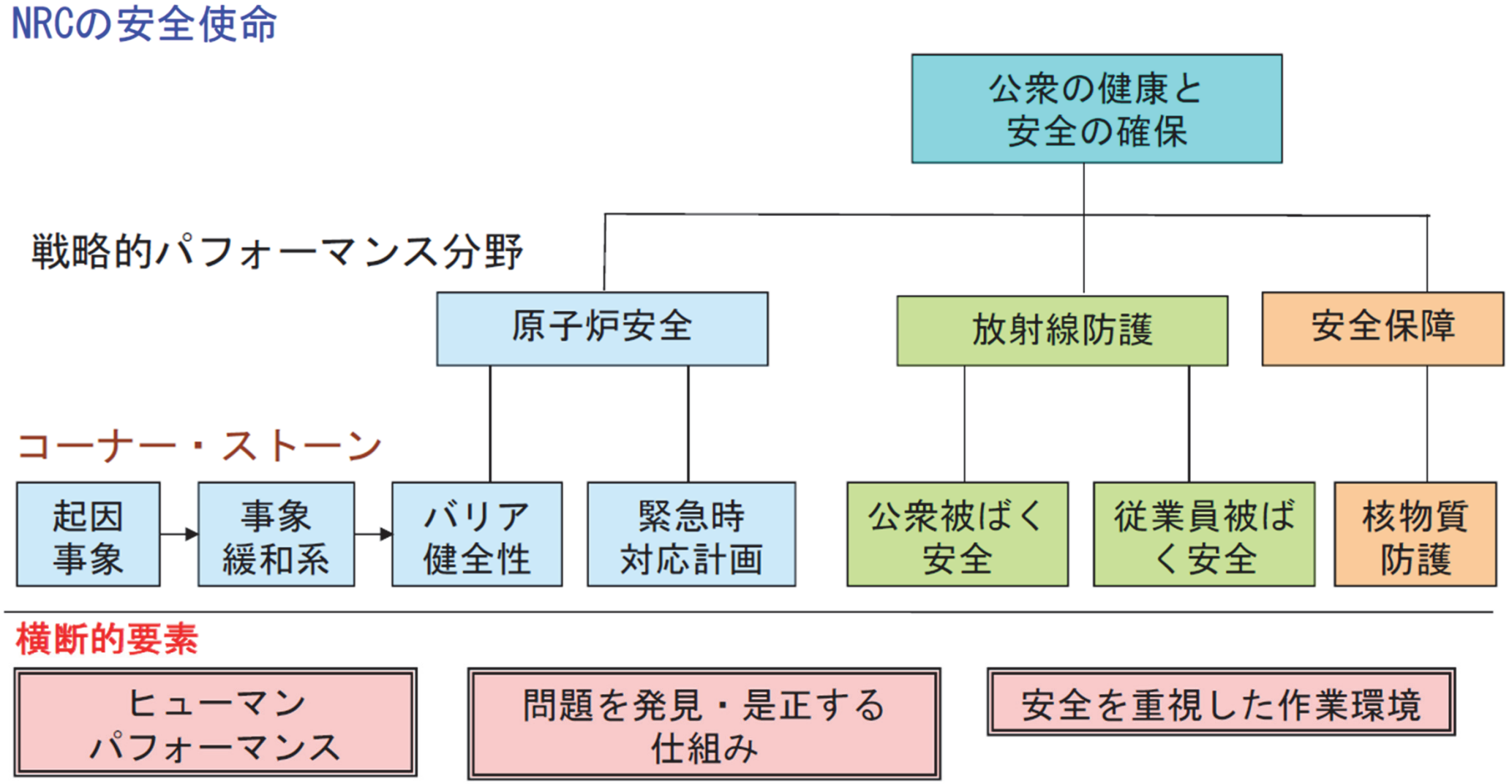
・ 安全文化を十分に扱えるようROPにおける横断的要素（cross-cutting issue）(※)について評価する方法を明確化。
⇒ 検査マニュアル・チャプター及び検査手順を改訂。
・ ROPの規制対応マトリックスでパフォーマンスが低下しているプラントに対する安全文化に関する特別な検査の必要性を判断するプロセスを開発。
・ 特別な安全文化に対する評価を実施するためのプロセスを開発。

○ NRCは、事業者の安全文化醸成の取組を安全規制の対象としてROPに取り込み、2006年7月1日から運用を開始。

※ 横断的要素は、「ヒューマン・パフォーマンス」、「問題を発見・是正する仕組み」、「安全を重視した作業環境」の３要素。

CC BY
【19】出典：原子力規制委員会ホームページ

ROPにおける横断的要素



ROPにおける７つのコーナーストーンと横断的要素

CC BY
【19】出典：原子力規制委員会ホームページ

美浜発電所2号機事故の概要

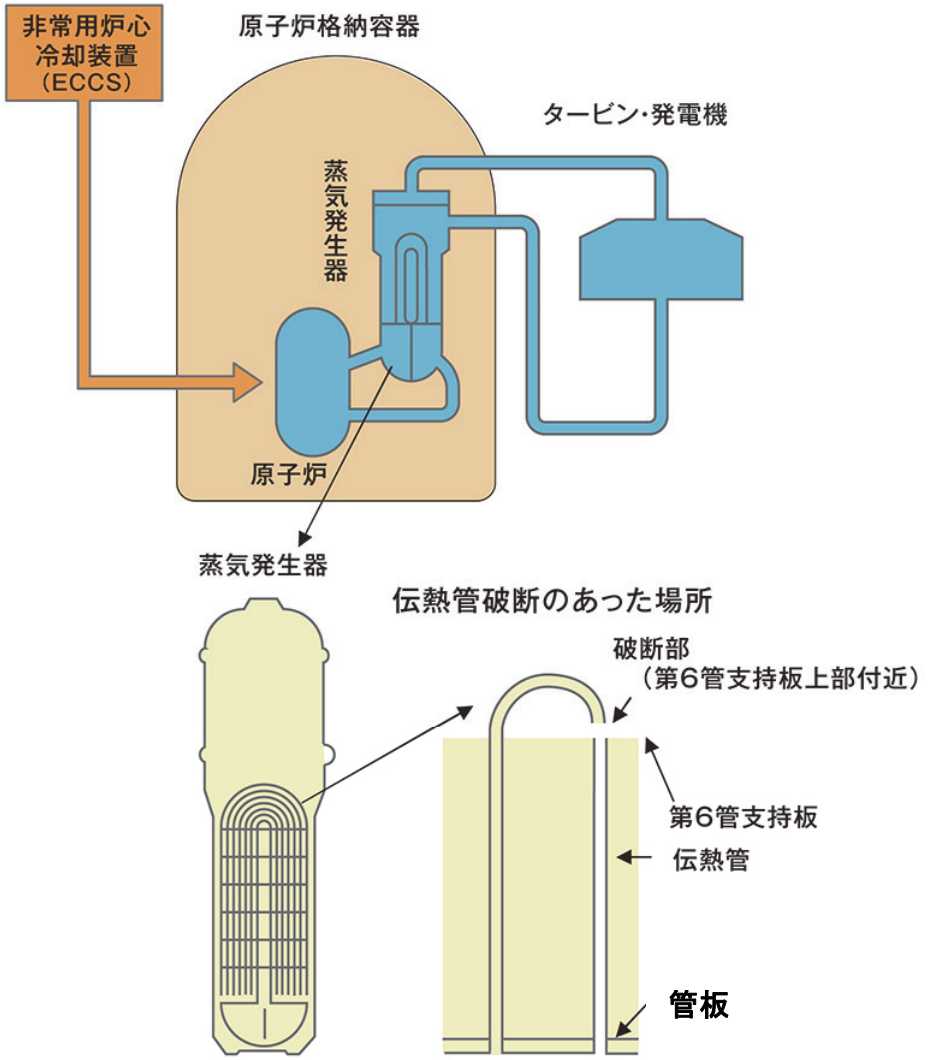
○事故の主な経緯

1991年2月9日、関西電力（株）美浜発電所2号機で、蒸気発生器の伝熱管の1本が破断し、このため原子炉が自動停止し、非常用炉心冷却装置（ECCS）が働くという事象が発生した。

調査の結果、原因は、伝熱管の振動を抑制するための揺れ止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されておらず、大幅に挿入不足であったため、伝熱管に異常な振動が発生した。その結果、高サイクル疲労（力が繰り返し（10万回以上）加わることで材料が力に耐えられなくなる現象）により破断に至ったものと判明した。

○環境への影響

わが国において初めて一次冷却水の流出により非常用炉心冷却装置（ECCS）が実作動したが、事象発生に伴う放射性物質の放出はごくわずかであり、周辺環境への影響は認められなかった。



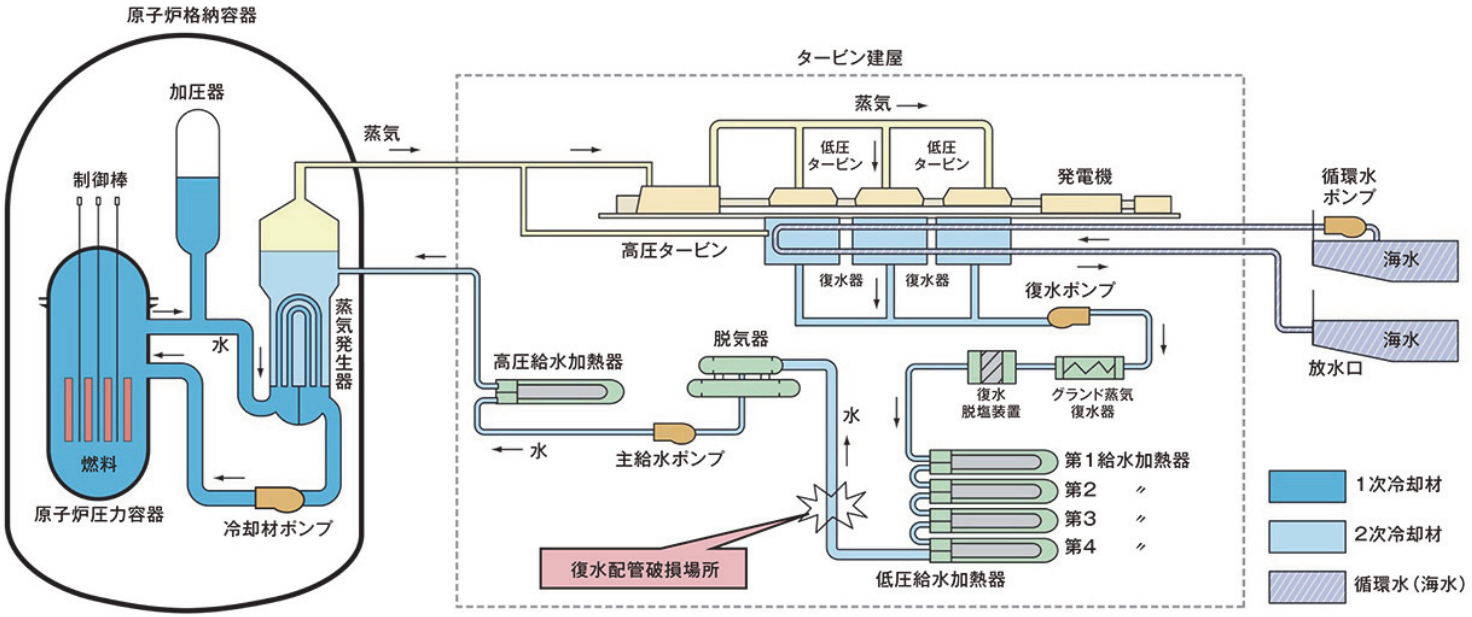
【20】出典：原子力・エネルギー図面集, 図5-6-1

美浜発電所3号機二次系配管破損事故の概要

○事故の概要

2004年8月9日、関西電力（株）美浜発電所3号機二次系配管破損事故が発生。事故当時、3号機タービン建屋内では、8月14日から実施予定の第21回定期検査の準備等のため、協力会社の作業者が作業を行っていた。その状況下で、タービン建屋内2階天井付近の復水配管に破損が生じ、約140度、約9気圧の高温水が蒸気となって噴出した。

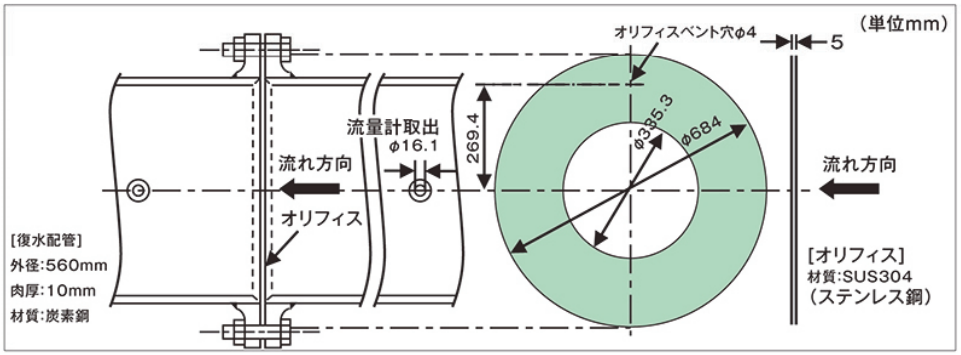
直ちに建屋内に点検に入った運転員がタービン建屋2階のエレベータ前で倒れている被災者を発見。被災した協力会社の作業者11名が病院へ搬送されたが、5名が亡くなり6名が重傷を負った。なお、2次主冷却系の事故であり、周辺公衆および従事者への放射性物質による影響はなかった。

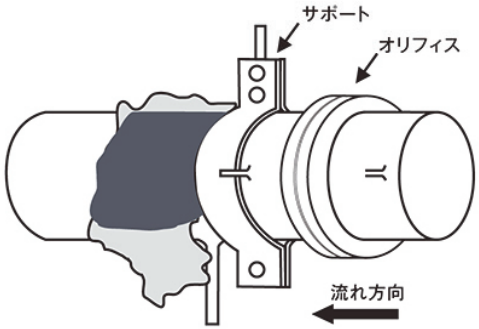


○事故の原因

復水配管の流量計（オリフィス）の下流部で大きな破口が確認された。オリフィス下流部位は偏流が発生しやすいことや破損部位の内面観察結果などから、いわゆるエロージョン･コロージョン（腐食･浸食）により配管肉厚が徐々に減少した結果、配管の強度が不足し、運転時の荷重により破損したものと推定されている。

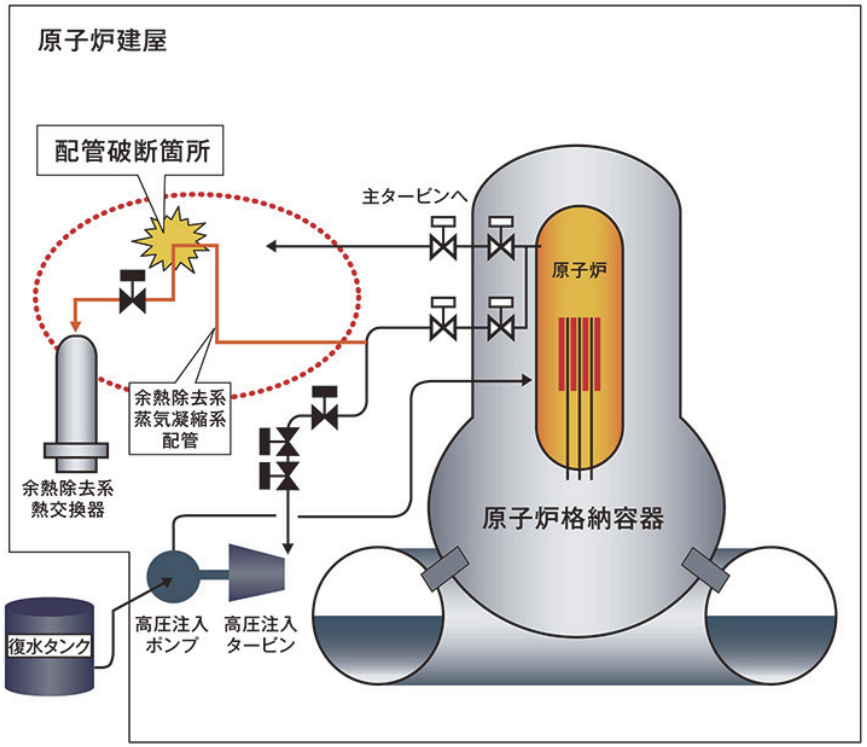
2次系の配管については、1990年に「原子力2次系配管肉厚の管理指針（PWR）」を策定し、その後配管の減肉が予想される部位等について、計画的に肉厚を測定してきたが、破損した配管の部位（A系統）は、当初から測定対象から漏れ、事故発生時点まで肉厚測定の実績はなかった。

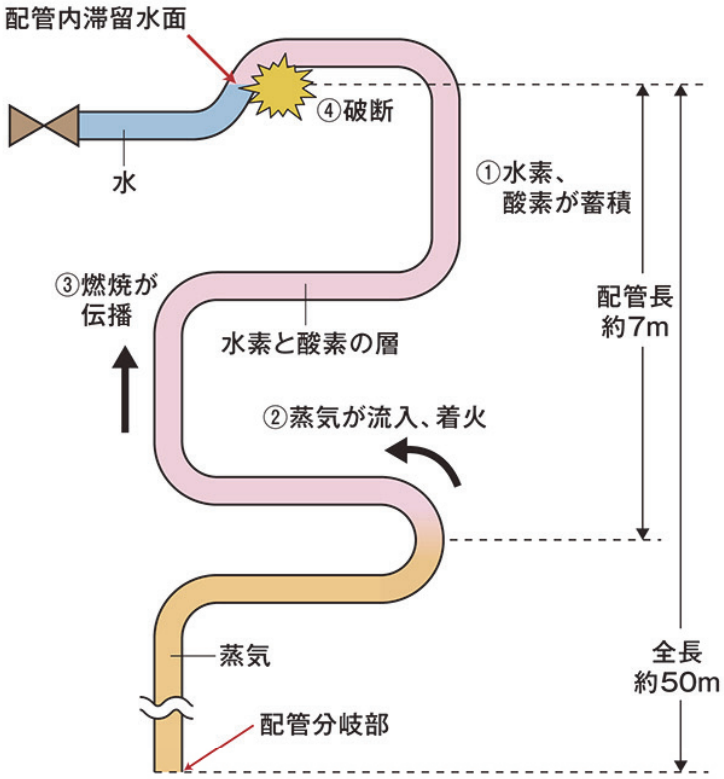




【21】出典：原子力･エネルギー図面集, 図5-6-2

浜岡原子力発電所１号機配管破断事故の概要





余熱除去系蒸気凝縮系配管

○事故の概要

2001年11月7日17時2分、中部電力（株）浜岡原子力発電所１号機で、高圧注入系の手動試験を実施したところ、余熱除去系蒸気凝縮系配管が破断

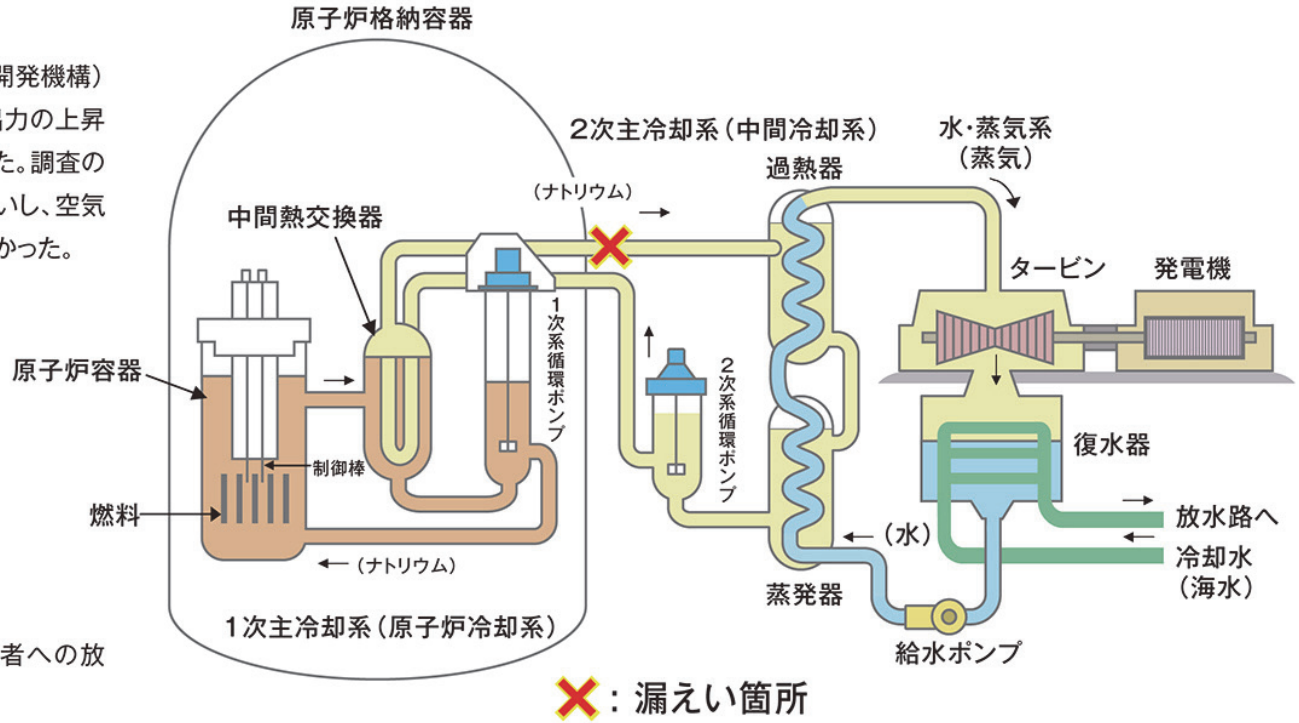
○事故の原因

①配管上部で、蒸気が凝縮。濃度の高い水素と酸素が、水面から約7mの位置まで蓄積
②高圧注入系手動起動試験による圧力変動で、高温の蒸気が水素と酸素の層に流入し、着火。貴金属が触媒として作用した可能性がある
③着火後、燃焼が水素と酸素の層の中を伝播（燃焼状態:爆燃→爆轟）
④配管内の圧力が急激に上昇、水面近くのエルボ部が破断（約3,000気圧）。また、他の配管部が変形

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故の概要

○事故の主な経緯

1995年12月8日、旧動燃（現在の日本原子力研究開発機構）の高速増殖原型炉「もんじゅ」で試運転中に、原子炉出力の上昇操作をしていたところ、ナトリウム漏えい事故が発生した。調査の結果、配管に設置してあったナトリウム温度計から漏えいし、空気中の酸素と反応してナトリウム火災を起こしたことが分かった。



○事故の影響

2次主冷却系の事故であり、周辺公衆および従事者への放射性物質による影響はなかった。

また、原子炉は安全に停止し、炉心への影響もなかった。

しかし、現実にナトリウム漏えいが生じ、ナトリウム火災の影響を拡大させ、また、旧動燃の情報公開等に問題があったことも明らかとなり、地元の住民をはじめ多くの国民に不安感および不信感を与える結果となった。

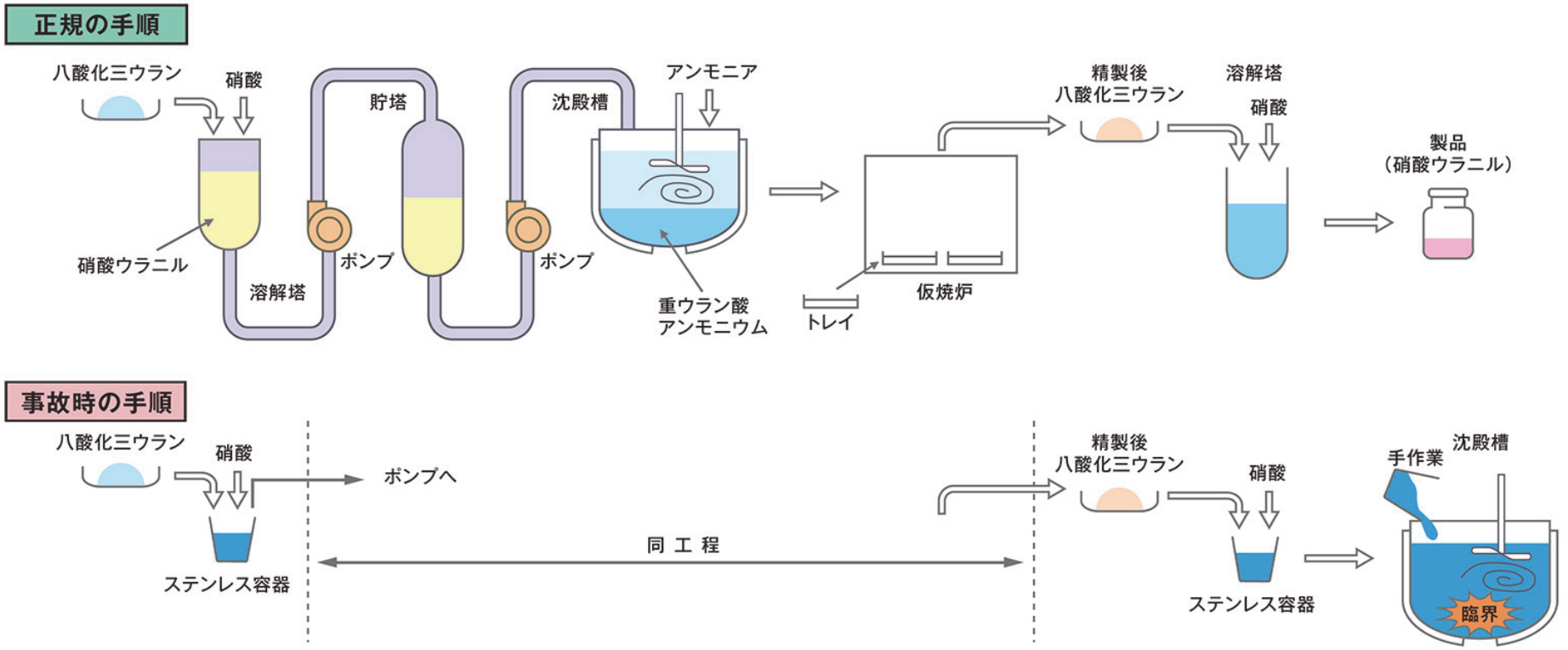
(株)ジェー・シー・オー ウラン加工工場臨界事故の概要

○事故の概要

1999年9月30日、(株)ジェー・シー・オー　ウラン加工工場における濃縮ウラン溶液を均一化する作業において、作業者が使用目的の異なる沈殿槽に臨界量以上のウラン溶液を注入したことにより、臨界事故が発生。これは、違法な社内マニュアルに従った行為であった。臨界状態は約20時間継続し、作業者2名が亡くなる結果となった。

○住民等への影響

臨界状態の間、周辺に放射線が放出され続けるとともに、微量の放射性ガス物質も大気中に放出され、従業員、防災業務関係者、周辺住民など319人(うち周辺住民130人)が一般人の年間実効線量限度である1ミリシーベルトを超える放射線を受けたと推定されている。



出典：原子力安全委員会「ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告」より作成

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-7-1, https://www.ene100.jp/zumen/5-7-1
【2】	‡	東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_3-j.html
【3】	‡	東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_4-j.html
【4】		原子力規制委員会ホームページ, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf
【5】	‡	福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について, 東京電力ホールディングス, https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf
【6】		環境省ホームページ, https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-02-02-05.html
【7】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-5-1, https://www.ene100.jp/zumen/5-5-1
【8】	‡	米国原子力発電所事故調査特別委員会第3次報告書（昭和56年5月）, 原子力委員会, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-04-02.html
【9】	‡	James M. Broughton et al. (1989), A Scenario of the Three Mile Island Unit 2Accident, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), Taylor & Francis, https://doi.org/10.13182/NT89-A27637
【10】	‡	Sidney Langer et al. (1989), Fission Product Release Pathways in Three Mile Island Unit 2, Nuclear Technology, Vol. 87 (1), p. 197, Fig. 1, Taylor & Francis, 10.13182/NT89-A27647

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	‡	原子力図面集, 1992年改訂, 原子力文化振興財団, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-04-06.html
【12】	‡	原子力百科事典ATOMICA, チェルノブイリ原子力発電所事故の概要 (02-07-04-11), 図11, 日本原子力研究開発機構, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-04-11.html
【13】	CC BY SA	IAEA Imagebank, https://www.flickr.com/photos/iaea_imagebank/5613115146/
【14】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-4-1, https://www.ene100.jp/zumen/5-4-1
【15】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-2-1, https://www.ene100.jp/zumen/5-2-1
【16】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-4-2, https://www.ene100.jp/zumen/5-4-2
【17】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-4-3, https://www.ene100.jp/zumen/5-4-3
【18】	PD	Stacy, Susan M. (2000), Proving the Principle: A History of the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory 1949-1999, United States Government Printing
【19】	CC BY	原子力規制委員会ホームページ, https://www.nsr.go.jp/data/000155945.pdf
【20】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-6-1, https://www.ene100.jp/zumen/5-6-1

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【21】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-6-2, https://www.ene100.jp/zumen/5-6-2
【22】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-6-3, https://www.ene100.jp/zumen/5-6-3
【23】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-6-4, https://www.ene100.jp/zumen/5-6-4
【24】	‡	原子力・エネルギー図面集, 5-6-6, https://www.ene100.jp/zumen/5-6-6