

水蒸気爆発の脅威に対する規制及び対策の 欠落

控訴準備書面（１６）

2025. 4. 25
控訴人ら訴訟代理人
弁護士青木秀樹

1

本日述べること

- 1 水蒸気爆発対策は無策でいいのか。
- 2 原審の不公正な判断形式、判断方法。原審は理由不備。
- 3 水蒸気爆発のメカニズムと爆発発生。
- 4 原発で水蒸気爆発は起こると考えることは科学者の常識。
- 5 水蒸気爆発に対する福島原発事故以前と以後で規制はどのように変化したか。
- 6 新規制基準における水蒸気爆発に対する規制はどうなったか。
- 7 原審が水蒸気爆発に係る各種実験を水蒸気爆発がめったに起きない証拠とした誤り。
- 8 水蒸気爆発のこれまでの知見と異なる結果をもたらした実験。
- 9 トリガーは様々。
- 10 水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策。
- 11 水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準。
- 12 まとめ。

2

水蒸気爆発対策は無策でいいのか。

3

水素爆発は起きた。水蒸気爆発は起きないのか。

福島第一原発事故において、起きないと言われていた水素爆発が起きた。

水蒸気爆発 ⇒ 格納容器破損 ⇒ 格納容器外に放射性物質放出 は起きないのか？

水蒸気は細粒化した核燃料を取り込んでいる。放射能被害は水素爆発よりも大きくなることもありうる。

水蒸気爆発は、溶融燃料と水の接触により起こる。福島第一原発では压力容器下部に水槽が無かった。東海第二原発では、压力容器の真下にサンプレーションプールという水槽が備えられている。東海第二原発は格納容器内の水蒸気爆発の可能性が高い。

水蒸気爆発に対する規制が求められる。現在の水蒸気爆発に対する安全規制は無いに等しい。

4

**原審の不公正な判断形式、判断方法。
原審は理由不備。**

5

原審の水蒸気爆発に係る認定事実

原審は、水蒸気爆発に係る認定事実

「実機における大規模な水蒸気爆発に至る可能性は十分に小さいとする本件 F C I 報告書が存在する」、「原子力規制委員会は、S E R E N A 計画において、T R O I 試験の装置を用いて、溶融物の温度を現実的な条件として実験を行い、外部トリガーを伴わない水蒸気爆発が生じていないことが確認されているとしている」（原判決 5 7 0 ～ 5 7 7 頁）。

これは、F C I 報告書の引き写し、原子力規制委員会の書面の引き写しである。

原審は何ら検討をしていない。

6

原審の水蒸気爆発に係る認定事実の不公正な判断形式、判断方法

1 原審の不公正な判断形式

原審は、争点とならない事実として認定事実という項目を設けて、原審判断の前提とする事実とし、それを前提として別項目において水蒸気爆発に係る争点を整理し、整理した争点を判断するという形式をとっている。しかし、原審が述べる水蒸気爆発に関する認定事実は、まさに水蒸気爆発の争点である。原審は争点となる事実を認定事実として原審の為すべき判断を回避している。

2 原審の不公正な判断方法

原審の認定事実の根拠とされているものは、第一審被告と同じ利害関係を有する他の電力会社の報告書（F C I 報告書 丙C 18）のコピーと、原子力規制委員会の見解のコピーである。争点として判断がなされなくてはならない事実であるにも拘らず、一方の見解をコピーしてその根拠とする不公正な判断方法を用いている。

7

原審判断は理由不備

（原審の判断）

検討を要する事項について何ら検討することなく認定事実 = 争点判断の前提事実

争点判断は認定事実に沿って判断

しかも、認定事実は、一方の見解のコピー & ペーストである。

典型的な理由不備の判決である。

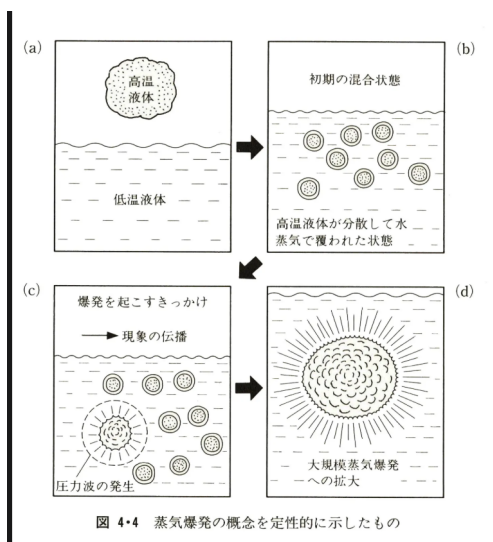
水蒸気爆発の脅威及びこれに対する規制並びに対策について、本審において新たに判断する必要がある。

8

水蒸気爆発のメカニズムと爆発発生 の事実

9

水蒸気爆発のメカニズム

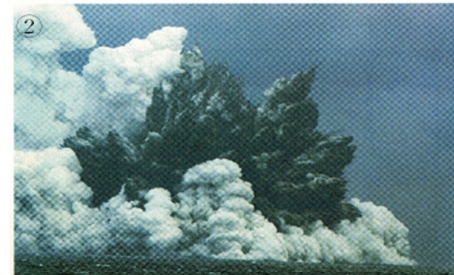
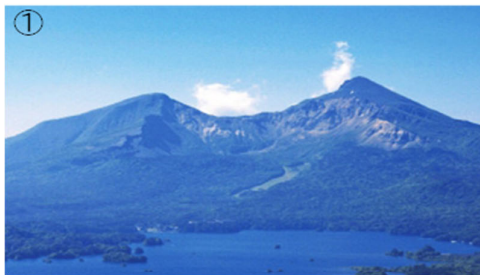


- (a) 熔融金属や熔融炉心などのような高温液体が落下する
 - (b) 高温液体の一部分は、水中では液滴となってバラバラに細くなる。液滴は水蒸気膜に覆われた状態（膜沸騰という）で分散する。この状態を粗混合（あるいは予混合）状態という。
 - (c) なんらかの原因で膜沸騰蒸気膜が1か所で壊れると、高温液体と水の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気泡が発生する。この段階をトリガリングという。
 - (d) 発生した水蒸気泡は急成長し圧力波を発生する。この圧力は瞬時に水中を伝播して、周囲の蒸気膜を破壊し、斉時的に水蒸気泡生成を行うことで周囲の構造物を破壊する大規模な爆発となる。
- 水が熱せられて水蒸気になった場合に体積が約1 6 7 0倍になるので、水蒸気爆発が起きた場合、1 6 7 0気圧のオーダーの爆発が起きることになる。

10

現実に発生している水蒸気爆発（自然界）

自然界での水蒸気爆発の事例



- ① 1888 年に水蒸気爆発噴火した会津磐梯山
- ② 1986 年、南硫黄島北東、福德岡ノ場での海底噴火の瞬間
- ③ 1989 年、伊豆沖での海底噴火

1 1

現実に発生している水蒸気爆発（自然界）

マグマが地下水や海水と急激に接触すると、マグマ水蒸気爆発と呼ばれる激しい爆発が起こる。

② 1986年 南硫黄島北東、福德岡ノ場の海底噴火、③ 1989年 伊豆沖の海底噴火 いずれもマグマ水蒸気爆発の写真である。

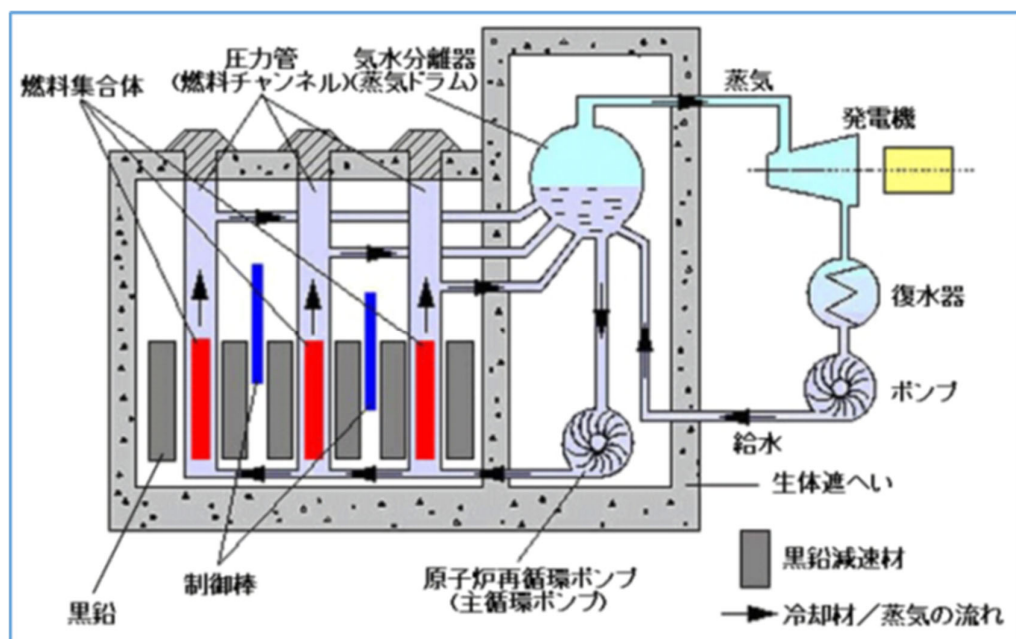
1 2

現実に発生している水蒸気爆発（産業界）

2008.1.21	長岡市鋳物工場「興和」	2018.7.6	朝日アルミ産業岡山工場
2012.10.20	マツダ	2018.7.20	浦添市クリーンセンター
2013.4.9	N伸銅	2021.4.26	太平洋セメント埼玉工場
2014.1.14	小名浜製錬	2022.9.6	いわき大王製紙工場
2015.4.18	J F E スチール西日本製鉄所		
2015.9.1	北九州のメッキ工場		
2017.4.25	旭川市の檜山鉄工所		
2017.5.1	掛川市大渕M工場		

1 3

現実に発生している水蒸気爆発（原発）



1 4

現実に発生している水蒸気爆発（原発）

1986年4月26日、旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所4号機（黒鉛減速軽水沸騰冷却型-RBMK型）事故。

「出力暴走の結果として、2回の爆発音が約2～3秒の間隔をおいて聞かれた。1度目の爆発は出力の急激な上昇によって、燃料が溶融飛散して圧力管に当たるとともに冷却材の水に接触して水蒸気爆発を起こしたもの」（原子力百科事典ATOMICA、原子力ハンドブック）。

溶融した黒鉛と冷却材の水とが接触して水蒸気爆発を起こしたという見方もある（失敗知識データベースー失敗百選）。

15

原発で水蒸気爆発は起こると考えることは
科学者の常識。

16

原発で水蒸気爆発は起こると考えることは科学者の常識

格納容器の破壊の要因としてまず挙げられるのは、格納容器内部の圧力・温度の極めて急激な爆発的上昇である。この原因の主なものは、**水蒸気爆発**や水素爆発である（元原子力安全委員会委員長 佐藤一男 甲C35）

炉容器外においては溶融炉心が比較的低压で高サブクール度の大量の冷却水と接触する可能性があり、**強い水蒸気爆発の発生可能性**を除外できない。（甲C39 日本原子力研究開発機構（JAEA））

※サブクール度：飽和温度と実際の液温との差をサブクール度という。例えば大気圧下75℃の水のサブクール度は、（飽和温度）100℃－75℃＝25℃である。サブクール度が低い（水温が高い）と水蒸気爆発は発生可能性が低い。サブクール度が高い（水温が低い）と水蒸気爆発の可能性は高い。

17

原発で水蒸気爆発が起きると考えてIAEAは対策を要求

微細化した炉心物質と周囲の水との急速な混合により**水蒸気爆発が引き起こされることがあり**、周囲の水の急速な蒸発及び加速を生じ著しい圧力荷重及び衝撃荷重を生み出すことになる。（原子力発電所の原子炉格納系の設計安全指針NS-G-1.10 甲C36）

アクシデントマネジメントの手引きは、シビアアクシデントにより核分裂生成物の障壁に対して起こり得る脅威の全体像、すなわち、複数のハードウェアの故障、人的過誤及び／又は外部からの事象、並びに**シビアアクシデントの進展中に生じうる可能性のある物理現象（水蒸気爆発、格納容器の直接加熱と水素燃焼など）に起因するものを含めて扱うべき**である。（原子力発電所のシビアアクシデントマネジメント計画 安全指針NS-G-2.15 甲C37）

18

日本原子力研究開発機構（JAEA）の想定する格納容器破損事故シナリオ（甲C39）

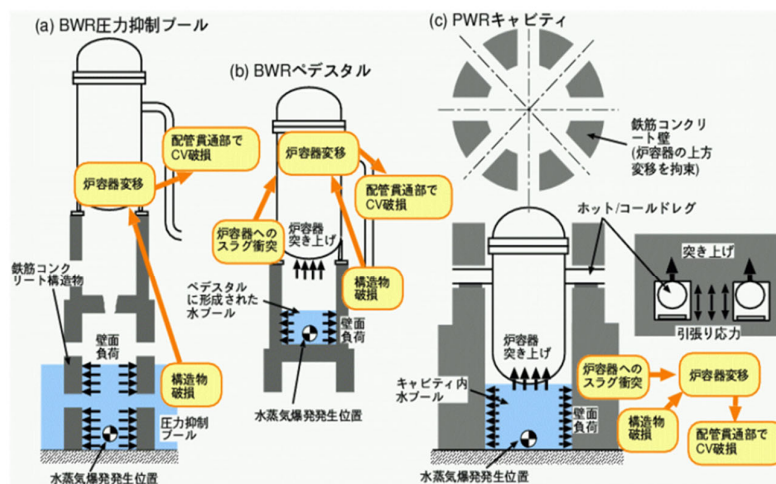


図3 BWR及びPWRモデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損シナリオ¹³⁾

19

日本原子力研究開発機構（JAEA）の想定する格納容器破損事故シナリオ（甲C39）

一つは、**圧力抑制プール内水蒸気爆発** です。

ベデスタル床を溶融貫通した炉心溶融物が、圧力抑制プールの炉容器直下ベデスタル円筒部分の中に落下し、水蒸気爆発が発生する。

ベデスタル壁構造物の破損により、炉容器の支持が失われ、炉容器が変位する。これにより主蒸気管等の配管が変位し、格納容器の配管貫通部が破損する

20

本件原発は、福島第一原発と異なり、水蒸気爆発が発生する可能性が高い構造

本件原発のタイプはBWR—5と呼ばれるもので、格納容器の形状はMARK—II型で、格納容器の下部に水がたたえられ、**圧力容器下部に水槽が存在する形状**になっている。福島第一原発1号機～5号機は、格納容器の形状はMARK—I圧力抑制型（トーラス型／フラスコ型）で、圧力容器下部には水槽は無い。

本件原発は、炉心溶融になり、メルトスルーに至れば、高温のデブリ（炉心溶融物）が格納容器内の水と接触する構造になっている。

例えば、ペDESTALにデブリ（炉心溶融物）が落下し、ペDESTALに張ってある水と接触すれば、水蒸気爆発が発生し、ペDESTALが破壊され、ペDESTALのRPV（原子炉圧力容器）支持機能が失われてRPVの傾斜・転倒事故を招き、或いは、**ペDESTALの床スラブのデブリ保持機能が失われて下部のサブレーションプールにデブリが落下し、サブレーションプール内の大量の水と接触して大規模な水蒸気爆発事故が発生することが想定される。**

23

水蒸気爆発に対する規制は福島原発事故以前
と以後でどのように変化したか

24

原発で水蒸気爆発が起きると考えてIAEAは対策を要求

微細化した炉心物質と周囲の水との急速な混合により水蒸気爆発が引き起こされることがあり、周囲の水の急速な蒸発及び加速を生じ著しい圧力荷重及び衝撃荷重を生み出すことになる。（原子力発電所の原子炉格納系の設計安全指針NS-G-1.10 甲C36）

アクシデントマネジメントの手引きは、シビアアクシデントにより核分裂生成物の障壁に対して起こり得る脅威の全体像、すなわち、複数のハードウェアの故障、人的過誤及び／又は外部からの事象、並びにシビアアクシデントの進展中に生じうる可能性のある物理現象（水蒸気爆発、格納容器の直接加熱と水素燃焼など）に起因するものを含めて扱うべきである。（原子力発電所のシビアアクシデントマネジメント計画 安全指針NS-G-2.15 甲C37）

25

福島第一原発事故以前の我が国の水蒸気爆発に対する規制

原子力施設のリスクは設計基準事象への対処の範囲（IAEA—INSAGの多重防護策の定義による第3の防護レベルまで）の規制要求で十分に低く抑えられているとし、アクシデントマネージメントの整備はこの低いリスクを一層低減するものとして位置付けられ原子炉設置者の自主的整備に委ねられ、規制対象とはされていなかった。

「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネージメントについて」（平成4年5月28日原子力安全委員会決定、平成9年10月20日一部改正）

26

福島第一原発事故後の旧規制の考え方の変更

福島第一原発事故の発生により、「リスクが十分に低く抑えられている」という認識や、原子炉設置者による自主的なリスク低減努力の有効性について、重大な問題があったことが明らかになったのであるから、シビアアクシデントによって大量の放射性物質が環境中に放出されるような事態発生の可能性を極めて低いものにするため、シビアアクシデントの発生防止、影響緩和について、合理的に実行可能な全ての努力を行うべきであり、**シビアアクシデント対策の整備を下記の方針で進めることが適切**であり、平成4年決定は廃止（甲C46 平成23年決定）

記

1 シビアアクシデント対策：第4の防護レベルの強化

発生確率は極低いものの発生した場合の影響が大きい事象についても取り扱う必要がある

27

新規制基準における水蒸気爆発に対する規制はどうなったか。

28

新規制基準における水蒸気爆発に係る規定

重大事故が発生した場合（炉心の著しい損傷が発生した場合）において「原子炉格納容器の破損及び工場等外への放射性物質の異常な水準の放出を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない」（実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 37 条 2 項）。

水蒸気爆発（原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用）は必ず想定すべき格納容器破損モードの一つ（同項解釈 2－1（α））。

「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」中の 3. 2. 3 格納容器破損モードの主要解析条件等の（3）原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用についてを規定

29

新規制基準における水蒸気爆発に係る規定の不合理的対策が無い

「実ウラン溶融酸化物を用いた実験では、衝撃を伴う水蒸気爆発は発生していない。従って、水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いことを示すこと。ただし、溶融炉心から冷却材への伝熱による水蒸気爆発に伴う急激な圧力上昇（圧カスパイク）の可能性があることから、その影響を評価する」（審査ガイド）と規定され、水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことを示すことにより審査が通るようになっている。

圧カスパイク：水蒸気爆発に至らない圧力変化

30

他の格納容器破損防止対策は具体的対策が規定されている

- (1) 格納容器過圧・過温破損
対策例：格納容器スプレイ代替注水設備、格納容器圧力逃し装置又は格納容器再循環ユニット
- (2) 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
対策例：原子炉冷却材圧力バウンダリの減圧設備
- (3) 水素燃焼
対策例：グロープラグ式イグナイター、触媒式リコンバイナ（PAR）、原子炉格納容器内の不活性化（窒素注入）
- (4) 格納容器直接加熱（シェルアタック）
対策例：原子炉格納容器下部注水設備、原子炉格納容器バウンダリの防護
- (5) 溶融炉心・コンクリート相互作用
対策例：原子炉格納容器下部注水設備、原子炉格納容器バウンダリの防護

格納容器破損防止の具体的対策の有無

- | | |
|----------------------------------|---|
| (1) 格納容器過圧・過温破損 | 有 |
| (2) 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱 | 有 |
| (3) 水素燃焼 | 有 |
| (4) 格納容器直接加熱（シェルアタック） | 有 |
| (5) 溶融炉心・コンクリート相互作用 | 有 |
| (6) 水蒸気爆発（原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用） | 無 |

水蒸気爆発対策がない規制基準は不合理な基準 (福島第一原発事故の教訓を無視)

「リスクが十分に低く抑えられている」と考えて3層の防護レベルまでを規制要求とし、**4層の防護レベルを規制要求としなかったことが間違っていた。**

発生確率は極低いものの発生した場合の影響が大きい事象についても取り扱う必要があるという方針を確認した。

水蒸気爆発はめったに起きないからその対策は考えなくてよいというのは、水蒸気爆発に関しては3層までで規制として十分とするものであり、福島第一原発事故で得られた教訓をもとに到達した安全に関する認識を覆すものである。

3 3

水蒸気爆発対策がない規制基準は不合理な基準 (深層防護の考え方に反する)

深層防護は、各層が独立して、十分な安全確保策が講じられていなければならない**(後段否定)**、また、各層は破られるものとして次層の安全確保策を考えなければならない**(前段否定)**。この深層防護の考え方からすれば、**シビアアクシデント対策は、シビアアクシデントは起きると考えてその対策を講じなければならない。**

水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことを示すことが対策であるとするのは、前段否定の考えに反する。

講ずべき対策を検討していないのは、後段否定の考え方に反する。

水蒸気爆発はめったに起きないからその対策を考えなくてもよいというのは、深層防護の考え方に反する。

3 4

無策の基準は不合理な基準

水蒸気爆発はめったに起きないから対策は不要とする基準は不合理な基準である。

①水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことさえ示せばその余の対策は不要とする新規制基準は、「深層防護の考え方」を踏まえて策定された設置許可基準規則の趣旨に反するものであり不合理である。

②「甚大な被害をもたらす事故・災害の場合には、発生確率に関わらずしかるべき安全対策・防災対策を立てておくべきである」との福島第一原発事故の反省・教訓を踏まえ、原子炉等規制法1条は「この法律は、原子力基本法にのっとり、必要な規制を行い、もつて国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的とする。」と定め、原子力基本法2条3項は「福島第一原子力発電所の事故を防止することができなかつたことを真摯に反省した上で、原子力事故の発生を常に想定し、その防止に最善かつ最大の努力をしなければならないという認識に立って、これを行うものとする。」と定めていることからすれば、水蒸気爆発に係る基準は、原子炉等規制法ないし原子力基本法の趣旨に反するものであって、不合理である。

35

水蒸気爆発対策を無視して、水蒸気爆発を誘発する規制基準もある

水蒸気爆発対策を何ら要求していないばかりでなく、MCCI（溶融炉心・コンクリート相互作用）対策のために、水蒸気爆発の発生を招く対策を奨励している不合理な基準になっている。

炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、溶融し、原子炉格納容器の下部に落下した炉心を冷却するために必要な設備を設けなければならない（設置許可基準規則第51条）。

これは、MCCIを抑制すること及び溶融炉心が広がり原子炉格納容器バウンダリに接触することを防止するために行われるものである（同解釈）。

MCCI対策のために冷却設備を設けることを要求し、具体的には、原子炉格納容器下部注水設備を整備することとされている（同解釈）。

しかし、**溶融炉心が落下して、それを水と接触させることは、水蒸気爆発を発生させるための方策である。**

36

原審が水蒸気爆発に係る各種実験を水蒸気爆発がめつたに起きない証拠とした誤り

37

原審の認定事実の誤り

原審は、水蒸気爆発の可能性は小さいと結論付けている。

ALPHA試験以降、KROTOS試験、FARO試験、COTELS試験、TRO I試験を比較検討し、違いを科学的に分析した結果として、「BWRの実機条件における溶融物温度や、実機条件においては外部トリガーとなる要因が考え難いことなどから、実機における大規模な水蒸気爆発に至る可能性は十分に小さいとする本件FCI報告書が存在する。また、・・・原子力規制委員会は、経済協力開発機構／原子力機関（OECD／NEA）の行ったSERENA計画において、TRO I試験の装置を用いて、溶融物の温度を現実的な条件とした実験を行い、外部トリガーを伴わない水蒸気爆発が生じないことが確認されたとしている」（原判決668頁）

しかし、水蒸気爆発に係る各実験の目的は異なり、実験結果は目的との関係で判断されるものである。各実験から水蒸気爆発の発生可能性が小さいという結果を導くことはできない。

38

水蒸気爆発はめったに起きないと判断できるほどの知見の形成に至っていない

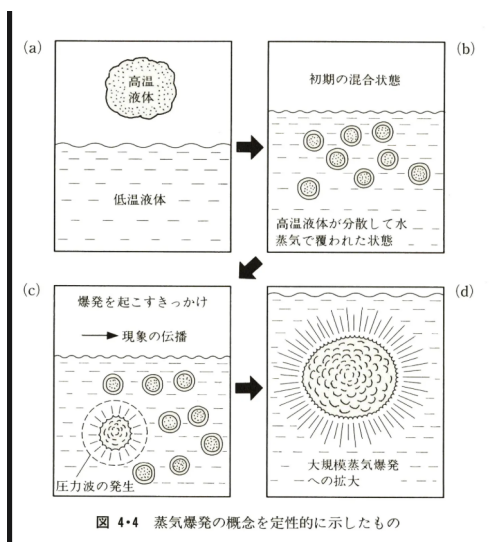
福島原発事故後も「ほとんどの国では、主に未解決の不確実性のため、炉外水蒸気爆発の考慮は未解決の問題のままです。」（甲C 1 4 4 Status Report on Ex-Vessel Steam Explosion NEA/CSNI/R(2017)15）。

圧力容器外水蒸気爆発のいくつかの重要な側面に関する知識は依然として限られており、したがってこの問題が格納容器の健全性に与える影響についてもまだ十分にはわかっていません（同上）。

それ故いくつもの水蒸気爆発に関する実験が行われ、現在でも水蒸気爆発に関する実験は継続されている。

39

水蒸気爆発のメカニズム



- (a) 溶融金属や溶融炉心などのような高温液体が落下する
 - (b) 高温液体の一部分は、水中では液滴となってバラバラに細くなる。液滴は水蒸気膜に覆われた状態（膜沸騰という）で分散する。この状態を粗混合（あるいは予混合）状態という。
 - (c) なんらかの原因で膜沸騰蒸気膜が1か所で壊れると、高温液体と水の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気泡が発生する。この段階をトリガリングという。
 - (d) 発生した水蒸気泡は急成長し圧力波を発生する。この圧力は瞬時に水中を伝播して、周囲の蒸気膜を破壊し、斉時的に水蒸気泡生成を行うことで周囲の構造物を破壊する大規模な爆発となる。
- 水が熱せられて水蒸気になった場合に体積が約1670倍になるので、水蒸気爆発が起きた場合、1670気圧のオーダーの爆発が起きることになる。

40

A L P H A 試験

軽水炉の苛酷事故（シビアアクシデント）時に、格納容器に加わる負荷、格納容器からのリーク及び格納容器内での核分裂生成物（FP）エアロゾル挙動を定量的に評価することを目的とした試験である（甲C 1 4 9）。水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的とした試験ではない。

溶融物10kg、20kgを水中に落下させ、水蒸気爆発を起こさせた実験結果の報告によれば、10kgを水中に落下させた場合には水蒸気爆発は起きなかった。20kgを落下させた場合には自発的水蒸気爆発が起こった。実機では数トンから10トンの溶融物が落下する可能性があり、この実験データだけから原子炉への外挿、評価をすることはできないが、大気圧下において20kgでも水蒸気爆発が起こる実験結果が得られたことは有意義であるとされている（（甲C 1 5 0））。

4 1

K R O T O S 試験

水蒸気爆発の挙動を調べるには、①トリガーが掛かる前、②トリガーが掛かった後 の実験データが必要である。K R O T O S 試験は②トリガーが掛かった後の実験データの取得を目的としている。爆発が発生した後の現象を調べることを目的とし、最初から外部トリガーを加えることを前提とした実験装置を用いている。

種々のパラメータによる水蒸気爆発の発生の有無も含む、圧力波の測定を通して、爆発の激しさに関するデータを収集するための実験である。

爆発状況のデータを採取して、微粒化の物理モデルを考え、定数等を調整して解析精度を上げ、爆発状況を解明することを目的としたものである。

水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的とした試験ではない。

4 2

F A R O 試験

この実験装置は、主に粗混合状態を解明する目的の実験装置である。すなわち①トリガーが掛かる前の実験データの取得を目的とした実験である。

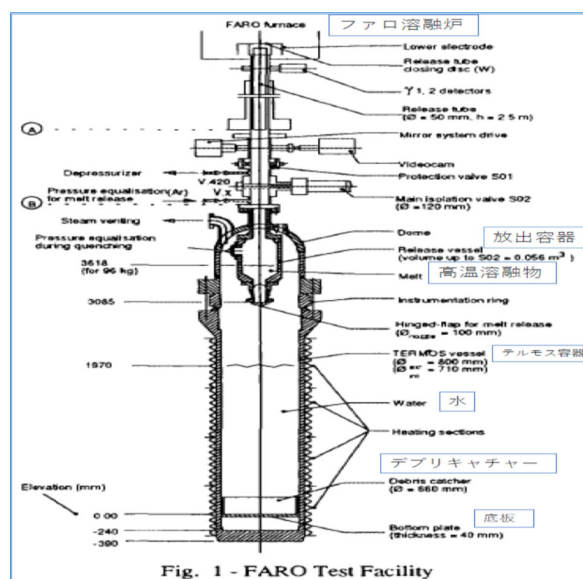
水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的とした試験ではない。

F A R O 試験のうち L - 1 から L - 2 8 までは、粗混合状態をモデル化するために、溶融物の冷却挙動（クエンチング）を解明するために行われたものである。このような実験目的のため爆発の発生は考えられておらず、従って装置の水槽は1重であり、内部の観察もできない構造になっている。

水蒸気爆発が起こらないような飽和温度に近い水の条件で行われている。＝サブクール度が低い。

4 3

F A R O 試験



4 4

F A R O 試験

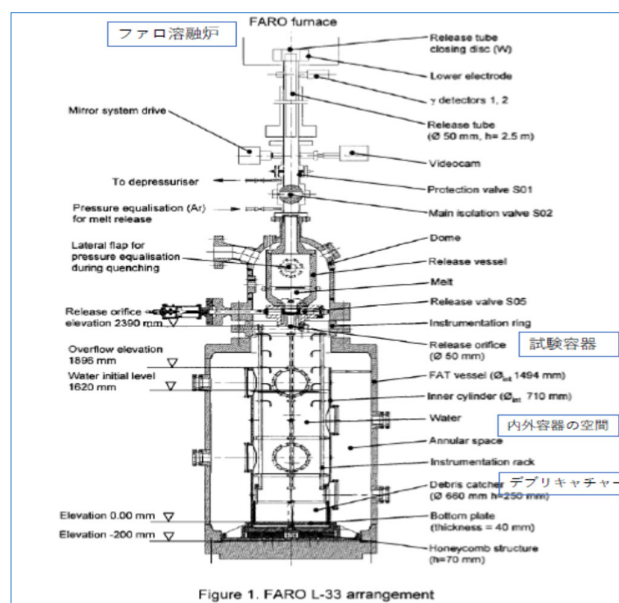
L-29、31、33の実験では二重構造にして水蒸気爆発の発生の有無の確認が行われた。

すなわち、FARO実験のL-1～L-28は「粗混合過程」を把握するための実験であり、L-29、31、33の3例は、水蒸気爆発の全過程、すなわち「粗混合過程」と「爆発過程」の両方の把握を目的としたものである。L-29、31は外部トリガーなしで自発的に水蒸気爆発が起きるかを確認し、L-33では外部トリガーを加えて実験が行われた。

FCI報告書（丙C-18）では、FARO実験では、一切「爆発しない」とし、原審はそれを引用している。しかし、L-33の実験結果に関する原著論文では、弱いながらも「爆発」していると記述。SERENA計画では、L-33の結果を、「爆発した場合」の例として、解析コードによって解析している。外部トリガーを付与したとき（L-33）では水蒸気爆発が発生したということが実験結果である。

45

F A R O 試験



46

COTELS 試験

名目上は、原子力発電技術機構（NUPEC）が実施した試験であるが、実質は出向した東芝社員が計画実施したものであり、原子力発電技術機構（NUPEC）が行った試験とは言い難い。

原発製造メーカーの社員という利害関係者が行った試験は、いわゆる第三者が行った試験ではなく、手続的公正さの担保がないので、資料的価値は少ない。

OECDが行ったSERENA計画では、COTELS試験の結果は解析の対象にしていない。

そして、COTELS試験では溶融物の温度の測定結果が示されておらず、「溶融物の温度は3000～3100K」とする根拠が無い。また、1点を除きすべてがサブクール度の低い水温（0、8、12、21、24、0、21k）での実験であることから、ほとんどの実験は水蒸気爆発が起らないこと、或いは、起らない可能性が高いことがわかっていた条件によるものである。

47

TROI 試験

TROI試験の目的は、「韓国の次世代原子炉(KNGR)の圧力容器外水蒸気爆発の一般的な安全性の問題を解決し、適切な重大事故管理(SAM)戦略を提案することである。また、FCI研究集団(コミュニティ)にとって不可欠かつ優先度の高い研究テーマである、水蒸気爆発の変換効率に対する材料特性の影響の理解にも貢献する」ことである。

水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的とした試験ではない。

ケース13、14では外部トリガーは加えられていないが、水蒸気爆発が発生している。

ケース14はIRON社の温度計によれば、投入温度3000Kで自発的な水蒸気爆発が発生している。

そして実機では3000K程度の溶融物温度にはなりうる。

SERENA計画では、ベースケースの解析（基本となる条件による解析）に当たっては、溶融物温度を2950Kの条件で行うように指示している（甲C136）。

ケース14の溶融物温度は、測定誤差を考慮すれば、十分に実機条件を満たしている。

48

S E R E N A 計画

T R O I 試験の装置を用いて、熔融物の温度を現実的な条件とした実験を行い、外部トリガーを伴わない水蒸気爆発が生じていないことが確認された（原判決573頁）。

しかし、S E R E N A 計画は、水蒸気爆発が起こるか起こらないかを解明することを目的としていない。

S E R E N A 計画は、**原発において水蒸気爆発が起きることを前提にして、原発における事故時の水蒸気爆発現象の解明**、すなわち、FCIのプロセスの理解と、爆発が生じた場合のエネルギー（激しさ）を定量的に評価することと、実際の原子炉の構造の条件で、どの程度の負荷が生じるかを、確実に適用する方法を得ることを目的にしたものである。

49

S E R E N A 計画

S E R E N A 計画は、フェーズ1とフェーズ2の2段階にわたって行われた。S E R E N A—1では実験は行われておらず、S E R E N A—2でT R O IとK R O T O Sの装置を用いてそれぞれ6回、計12回の外部トリガーを与えた実験を行った。

S E R E N A—1

既存の解析コードに実験条件をデータとして入力して、実験結果と計算結果の比較
現実の原子炉圧力容器から流出する（メルトスルー）ケースについて、共通の条件を解析コードで計算を行い、炉外で発生する水蒸気爆発を解析

各研究機関の計算コードの結果を比較 ⇒ 目的達成をめざす

S E R E N A—1の結論では、**爆発時にはキャビティの壁面には許容値以上の負荷がかかることがわかった**（甲C143）。原子炉容器内のFCIは原子炉格納容器の健全性に影響を及ぼすことはないが、原子炉容器外のFCIについてはそのシナリオを排除できないということであった。

50

S E R E N A 計画

S E R E N A—2 では、モデルの精度をあげるための追加の実験が行われ、その結果を反映した解析が行われた。解析で得られた結果は、実機への適用検討では、原子炉キャビティ損傷を引き起こし、格納容器の機能に損傷を起こすほどの圧力と力積の発生する水蒸気爆発となるというものであった。

圧力容器外での水蒸気爆発で計算される単位面積当たりの力積は、加圧水型で底部で $150\text{kPa}\cdot\text{s}$ 、側壁面で $125\text{kPa}\cdot\text{s}$ となり、沸騰水型ではそれぞれ $110\text{kPa}\cdot\text{s}$ と $90\text{kPa}\cdot\text{s}$ となった。キャビティの壁に及ぼす力積は $100\text{kPa}\cdot\text{s}$ 以下でなければいけないとある（甲C144）。

従って、代表的な計算モデルでPWRでは炉外で水蒸気爆発が起こった場合には原子炉キャビティ側面、底部とも破壊され、BWRでも底部が破壊されるということになると結論付けられた。

5 1

原審の各種試験の評価

原審は「BWRの実機条件における溶融物温度や、実機条件においては外部トリガーとなる要因が考え難いことなどから、実機における大規模な水蒸気爆発に至る可能性は十分に小さいとするFCI報告書が存在すること、原子力規制委員会は、S E R E N A計画において、T R O I試験の装置を用いて、溶融物の温度を現実的な条件とした実験を行い、外部トリガーを伴わない水蒸気爆発が生じていないことが確認されたとしていること」を理由として、有効性評価ガイドが、実ウラン溶融酸化物を用いた実験では衝撃を伴う水蒸気爆発は発生していないため水蒸気爆発の可能性は極めて低いことを示すことなどを求めるにとどめていることが不合理であると断じることが出来ない」と判示している（原判決668、671頁）。

5 2

各種試験から水蒸気爆発はめったに起きないという結論を導くことはできない

各種試験の目的は異なり、水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的としたものではなく、また、水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを示した試験結果もない。

A L P H A 試験は軽水炉の苛酷事故（シビアアクシデント）時に、格納容器に加わる負荷、格納容器からのリーク及び格納容器内での核分裂生成物（FP）エアロゾル挙動を定量的に評価することを目的とした試験である。

K R O T O S 試験は、爆発が発生した後の現象を調べることを目的とした試験である。

F A R O 試験はL-1からL-28までは、粗混合状態をモデル化するために、熔融物の冷却挙動（クエンチング）を解明するための試験である。L-29、31、33の3例は、水蒸気爆発の全過程、すなわち「粗混合過程」と「爆発過程」の両方の把握を目的とした試験である。

T R O I 試験は、低圧の冷水と相互作用するときにコリウムが強力な蒸気爆発につながるかどうかを調査し、水蒸気爆発の熱エネルギーから機械エネルギーへの変換比を測定することを目的とした試験である。

5 3

各種試験から水蒸気爆発はめったに起きないという結論を導くことはできない

S E R E N A 計画は、これまでの試験を踏まえた集大成として、原発における水蒸気爆発が起きることを前提にして、原発における事故時の水蒸気爆発現象の解明、すなわち、FCIのプロセスの理解と、爆発が生じた場合のエネルギー（激しさ）を定量的に評価することを目的にした試験である。

代表的な計算モデルでPWRでは炉外で水蒸気爆発が起こった場合には原子炉キャビティ側面、底部とも破壊され、BWRでも底部が破壊されるということになると結論付けられた。

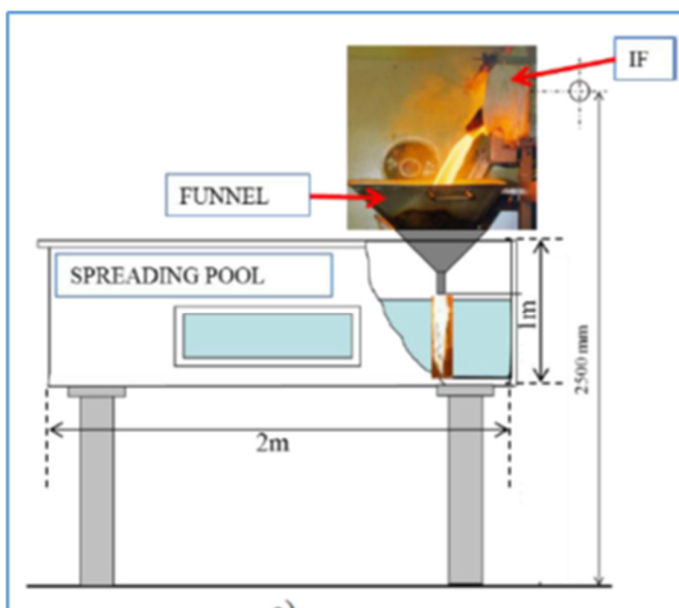
各種試験から原審の結論は到底導き出せるものではない。

5 4

水蒸気爆発のこれまでの知見と異なる結果 をもたらした実験

5 5

新たな検討を要する実験と知見（PULIMS実験）



高温の溶融炉心が水のプールに注入された後に、①溶融物がどのように広がるか、②溶融炉心が固化したあと、どのような形状となるか、③堆積層の厚さが予測できるモデルとコードの検証に必要なデータを提供することを目的とした実験

5 6

PULIMS実験



6回の有効な実験のうち、層状系の自発的水蒸気爆発が5回発生した。左図は3回目の実験（E3）の結果の高速度写真。

(a)は水深20cmの水プールに溶融物が注がれている（爆発が発生する10.52秒前）状態を示す。(b)は爆発が発生する0.04秒前の不安定状態を示し、(c)では、自発的な水蒸気爆発発生から0.16sec後の様相を示したものである。この例では、水中で溶融物は層状に広がった後に爆発が起こっている。

57

PULIMS実験

従来の水蒸気爆発の研究からは説明ができない事実

- ①25K程度の低サブクール度の水温(大気圧では75℃)の状態では自発的な爆発が発生していること
- ②浅い水深のプールで（わずか20cm）激しい水蒸気爆発が起こっていること
- ③熱エネルギーから機械的エネルギーへの変換率が最大約3%である（TRO I 実験では0.3～0.6%である）こと等

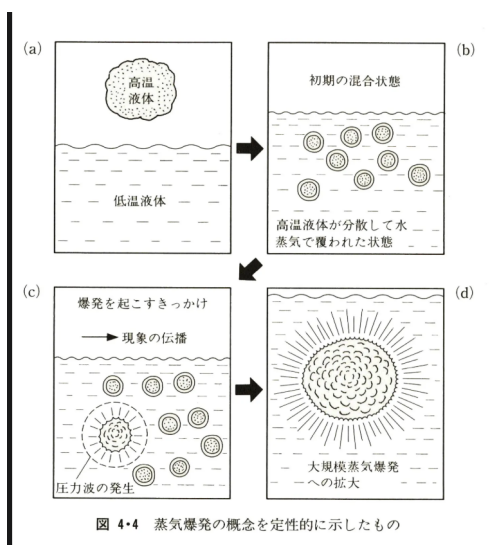
58



トリガーは様々

青a8

水蒸気爆発のメカニズム



- (a) 溶融金属や溶融炉心などのような高温液体が落下する
 - (b) 高温液体の一部分は、水中では液滴となってバラバラに細くなる。液滴は水蒸気膜に覆われた状態（膜沸騰という）で分散する。この状態を粗混合（あるいは予混合）状態という。
 - (c) なんらかの原因で膜沸騰蒸気膜が1か所で壊れると、高温液体と水の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気泡が発生する。この段階をトリガリングという。
 - (d) 発生した水蒸気泡は急成長し圧力波を発生する。この圧力は瞬時に水中を伝播して、周囲の蒸気膜を破壊し、斉時的に水蒸気泡生成を行うことで周囲の構造物を破壊する大規模な爆発となる。
- 水が熱せられて水蒸気になった場合に体積が約 1 6 7 0 倍になるので、水蒸気爆発が起きた場合、1 6 7 0 気圧のオーダーの爆発が起きることになる。

6 0

トリガーには外部トリガーと自発的トリガーが有り、それらに関する知見は未だ不十分である

原審は、「国内外において二酸化ウラン混合物等を用いるなどして種々の実験が行われており、...中略...実機条件においては外部トリガーとなる要因が考え難いことなどから、実機における大規模な水蒸気爆発に至る可能性は十分に小さいとする F C I 報告書が存在する」（原判決 6 6 8 頁）という前提事実を掲げている。

しかし、外部トリガーとなる要因が考え難いといえる程の外部トリガーに関する知見は理論上も実験上も未だ得られていない。

6 1

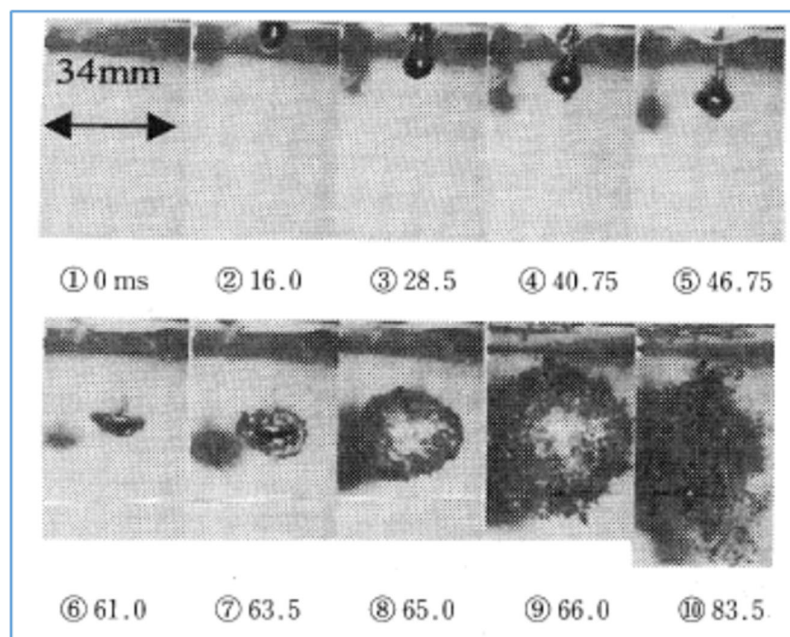
様々なトリガー

表3 トリガーの分類

トリガー分類	A. 自発的トリガー	B. 外的トリガー
1. 熱的要因	1A1. 凝縮（局所的水温の低下、熔融物フィラメントの成長） 1A2. 遷移沸騰 1A3. 微量水の囲い込み・閉じ込め（ペーストリガー）	1B1. 水の成層化⇒強制的な凝縮 1B2. 塩類添加⇒蒸気膜の厚さを減らす 1B3. 低温液強制注入
2. 力学的要因	2A1. 熔融物表面形状の不安定化 （テイラー不安定、ヘルムホルツ不安定、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性）	2B1. 圧力波の付与（微量液体貫入、スポール破壊） 2B2. 異物の侵入

62

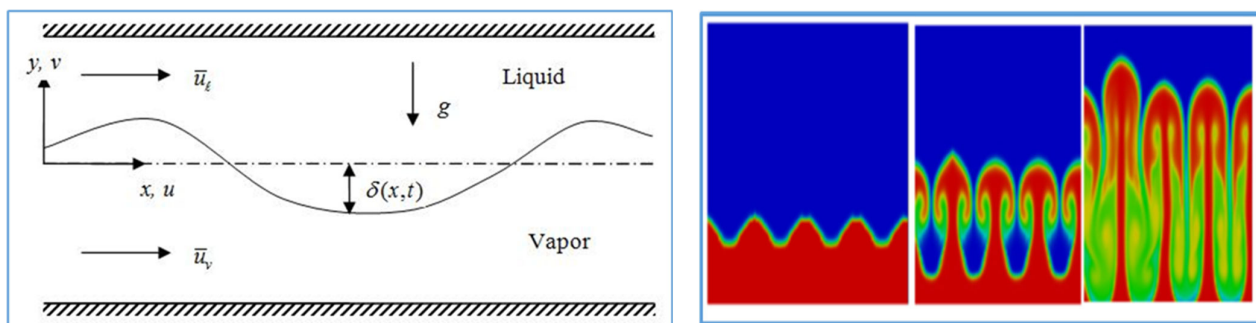
自発的トリガー 熱的要因の例 1 A 1（熔融物温度低下に伴う水蒸気凝縮）



63

自発的トリガー 力学的要因の例 2 A 1 (溶融物表面形状の不安定化 テイラー不安定・ヘルムホルツ不安定)

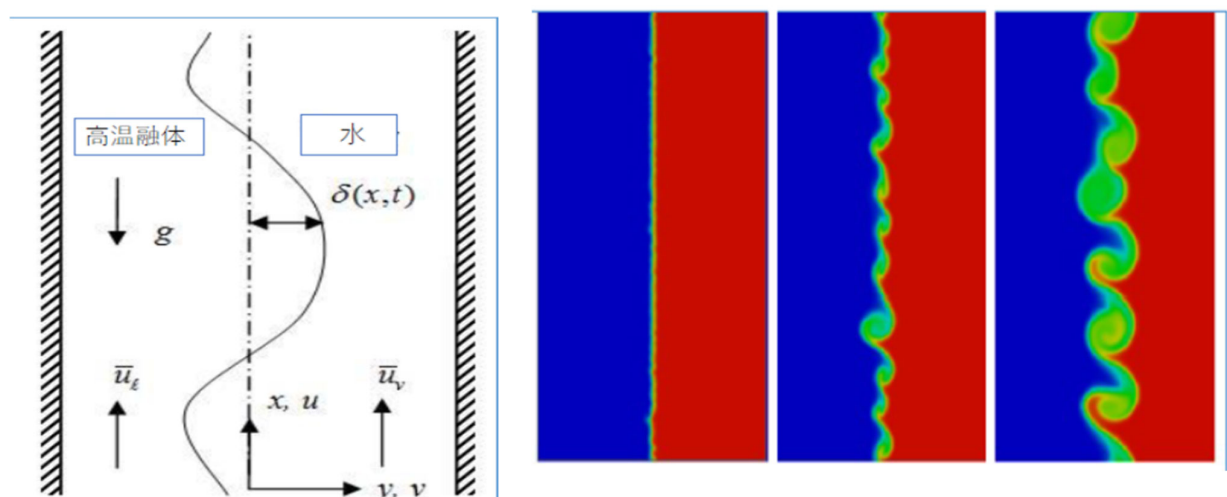
テイラー不安定：波面と直角方向に生じる加速度に起因する不安定



6 4

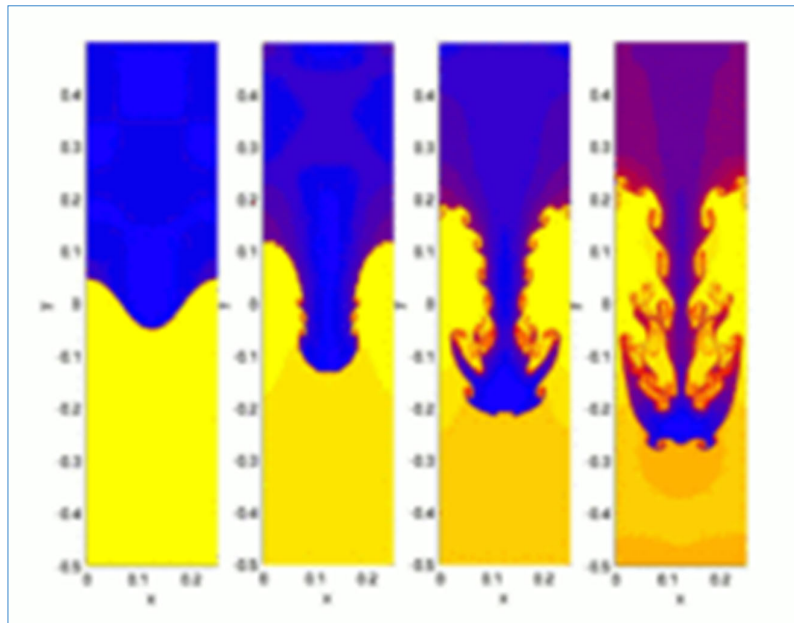
自発的トリガー 力学的要因の例 2 A 1 溶融物表面形状の不安定化

ヘルムホルツ不安定：2流体の速度差（相対速度）に起因する不安定



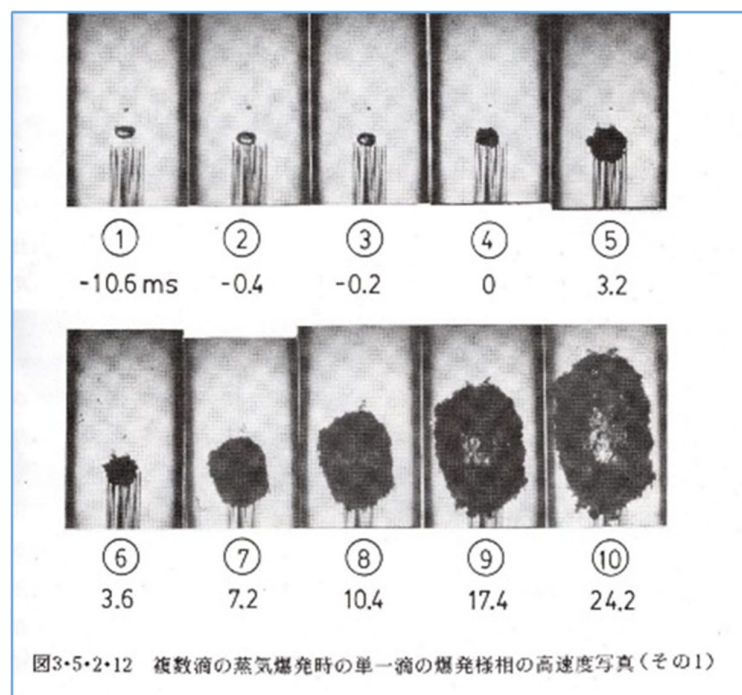
6 5

溶融物ジェット（噴流）に生じる二つの不安定（テイラー不安定・ヘルムホルツ不安定）



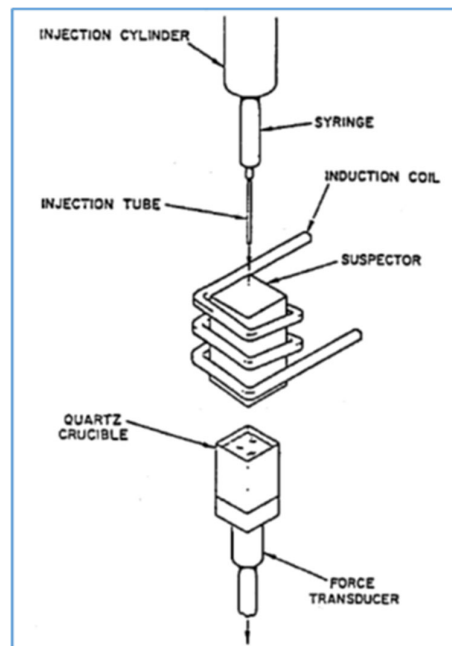
6 6

外的トリガー 力学的要因の例 2 B 2（異物の侵入）



6 7

外的トリガー 熱的要因の例 1 B 3（低温液強制注入）



68

一審被告及び原審のトリガーの考察は不足している

「実機条件においては外部トリガーとなる要因は考え難い」という結論は、何ら根拠が示されない主張であり、その主張に依拠して水蒸気爆発は圧力容器外で起きないという結論を述べるのは、恣意的な判断である。

様々なトリガーの存在を無視することは、水蒸気爆発の発生をごく一部に限定して考察することであり、そのような考察は水蒸気爆発の理解として不十分である。

69

水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策

70

水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策

高温の液体（溶融物）と水が接触すると水蒸気爆発の可能性があり、何らかのトリガリングがあれば水蒸気爆発を誘発する。トリガーになるものは未だ限定的な特定はできていない。

高温の液体が落下する水深については深ければ水蒸気爆発は起こりにくく、浅ければ起こりやすく、水蒸気爆発の規模は水深が深い程大きく浅い程小さいとの考えもあるが、水深が浅くても溶融物が層状態になり大規模な水蒸気爆発になった実験もあり、一概には決められない。

低サブクール度では水蒸気爆発は起こりにくいと考えられていたが、低サブクール度でも水蒸気爆発が起きた実験があり、確定的なことは言えない。

水蒸気爆発に関する知見は、未だ傾向を探求している状況である。但し、水蒸気爆発は起こると考えることは国際的常識であり、その様相を把握するための実験が種々なされている。そして水蒸気爆発の脅威、とりわけ、格納容器内の水蒸気爆発の脅威を考えれば、水蒸気爆発が起きるものとしてその対策を考えるのが必要な安全規制である。

71

水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策

日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究（甲C39 軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価）は、「炉容器外においては溶融炉心が比較的低压で高サブクール度の大量の冷却水と接触する可能性があり、**強い水蒸気爆発の発生可能性を除外できない**。また、炉容器外水蒸気爆発による格納容器破損のシナリオは炉容器内の場合に比較して**炉型に強く依存するため一般的な結論を導き難く、個別の評価の必要性が高い**」と述べている。

一般的に、**水蒸気爆発は起こり難いとして、全ての原発の水蒸気爆発対策を免除するような基準は安全規制として論外であり、炉容器外水蒸気爆発は起こる可能性があるものとして、それぞれの原発において、水蒸気爆発対策を講じなければならない**。

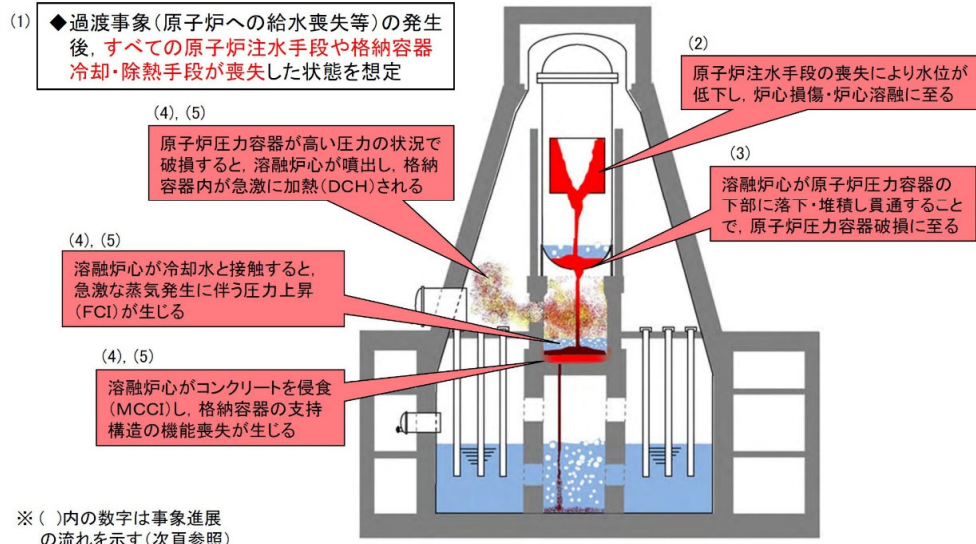
72

東海第二原発で必要な対策

【格納容器破損モードの特徴】

- **過渡事象時にECCS等の安全機能が喪失し**、炉心損傷及び原子炉圧力容器破損に至る。
- 原子炉圧力容器からの溶融炉心の噴出（DCH）、溶融炉心とペデスタル内冷却水との接触に伴う急激な蒸気発生（FCI）、溶融炉心によるコンクリートの侵食（MCCI）等により、**格納容器の破損**に至る。

DCH: 格納容器雰囲気直接加熱、 FCI: 溶融燃料-冷却材相互作用、 MCCI: 溶融炉心・コンクリート相互作用



73

東海第二原発で必要な対策

東海第二原発では、ペDESTALに溶融物が落下した時に水深2メートルまでの水を張り、主にコアコンクリート反応によるペDESTAL底部コンクリートの溶融を防ぐことを目的とした対策を講じ、水蒸気爆発については実験によりめったに起きないという結論を導き、それを持って対策としている。

しかし、高温溶融物と水が接触すれば、何らかのトリガリングで水蒸気爆発は起こる可能性があり、本件ペDESTALに水を注入するシステムでは、水は低温でありサブクール度は高いと考えられるので、水蒸気爆発の可能性が高い。

水蒸気爆発でペDESTALが大きく崩壊すれば、原子炉の傾きや、原子炉に接続している配管の破損もありうる。本件炉型では格納容器下部に水がたたえられているから、ペDESTAL底部が貫通し、溶融物がペDESTAL下にたたえられた水層に落下すれば、大きな水蒸気爆発が発生することもある。

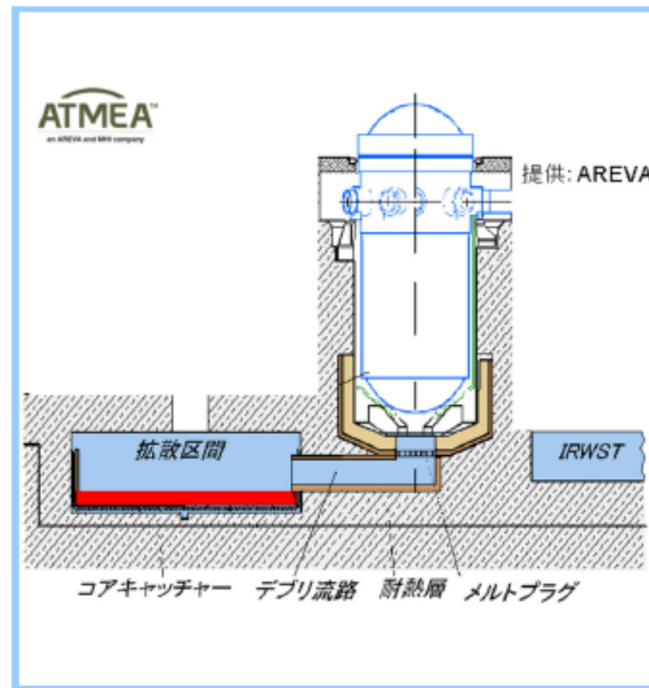
これらの事態を想定して、果たしてどのような対策をすべきかを考えなければならず、それがなされていない本件原発の水蒸気爆発に対する安全対策は欠けている。

7 4

水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準

7 5

水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準



76

水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準

For eliminating steam explosions that could damage the containment barrier、 the preferred method is to avoid dropping of molten core to water in any conceivable accident scenarios。

格納容器を損傷する可能性のある水蒸気爆発を排除するために好ましい方法は、考えられるどのような事故のシナリオにおいても溶融コアを水に落とさないようにすることだ

(国際原子力機関(IAEA)が2016年に公表したレポート より)

77

水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準

米国は 流出した溶融物の冷却性能を確保するために、**デブリ拡散のためのキャビティ床スペースの確保** (provide reactor cavity floor space to enhance debris spreading) を要求している。

フランスでは、「基本原子力施設「フラマンビル 3」の設立を認可する政令(2007年4月10日)」(Decree No. 2007-534 “Decree Authorising the Creation of the “Flamanville 3”, Basic Nuclear Installation (10 April 2007)) のⅢ章「基本的な安全機能」(Basic safety functions) のⅢ-3.3節に「建物による封じ込めの保証」(Containment guaranteed by the buildings) において以下のように要求している。

「炉心溶融を伴う事故の場合、**格納容器基礎部の貫通するのを避けるため、原子炉からの溶融放射性物質を長時間にわたり回収冷却できる装置を設置すべき**」(原文：In order to prevent the basement of the containment system to be perforated in case of accident involving core meltdown, a suitable long-term system shall be implemented in order to collect and to cool any molten radioactive material resulting from the nuclear reactor。)

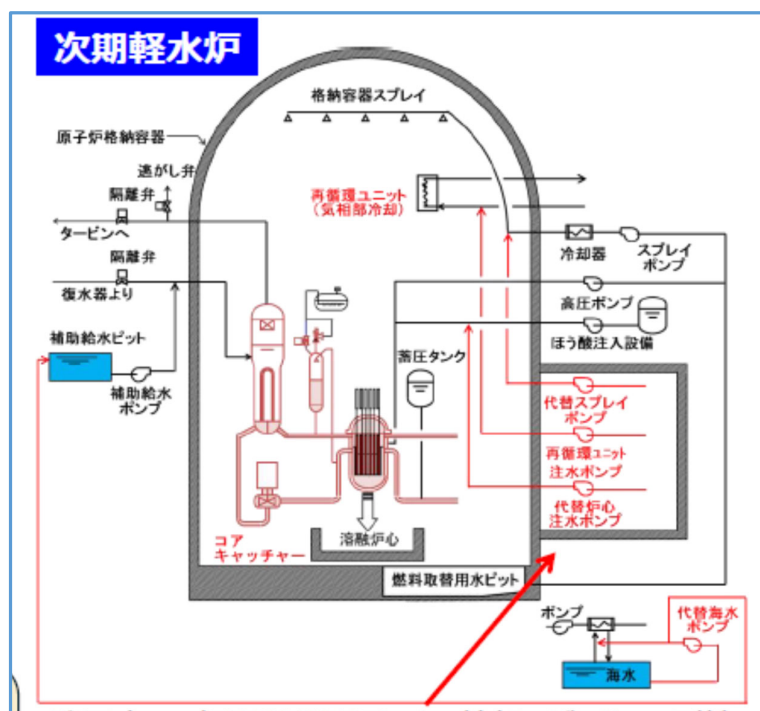
水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準

日本では、電力会社（関西電力）、メーカー（三菱重工）とも、**次期軽水炉**には

「水蒸気爆発等の溶融炉心冷却に係る現象の不確かさの観点から、**欧米の新設炉で採用実績のある溶融炉心冷却方式を含め、次期軽水炉における溶融炉心冷却対策の取扱いを議論**」 するとしている。

「溶融炉心冷却対策については、**水蒸気爆発の可能性排除を考慮し、欧州の新設炉で適用されているドライ型の溶融炉心対策設備（安全確保の実装の考え方が既設炉と異なる対策）の適用も選択肢として考えられることから議論の対象として抽出**」 した

水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準



80

まとめ

81

まとめ

一審被告も原審も各種実験を根拠として水蒸気爆発の可能性は極めて低いと認定して水蒸気爆発対策は不合理ではないとしている。

しかし、これまでに行われた各種実験は水蒸気爆発は極めて低いことを確認することを目的としておらず、また、実験結果はそのようなことを示すものではない。

高温溶融物と水が接触すれば、水蒸気爆発は起こることは、科学の世界の常識であり、その常識を前提にして水蒸気爆発対策を検討することが国際常識である。

最新の原子炉では水蒸気爆発対策として水と高温溶融物の接触を回避する設備を要求している。日本の原子力メーカーはその設備を付けた次期原子炉を計画している。

これらの最新の考えに従って水蒸気爆発対策を考えるべきであり、水蒸気爆発はめったに起きないことを示せば対策は不要とする評価ガイドは不合理であり、そのガイドに適合すれば水蒸気爆発対策として合格させるという審査も不合理である。

さらに、各種の実験結果はめったにおきないことを示すものではないのであるから、これらの実験結果を根拠にしてめったに起きないという結論を導くことはありえない判断であり、そのような審査には、看過し難い過誤欠落があるというべきである。