

令和3年（行コ）第136号

東海第二原子力発電所運転差止等請求控訴事件

一審原告 大石 光伸 外

一審被告 日本原子力発電株式会社

控訴審準備書面（16）

～水蒸気爆発の脅威に対する規制及び対策が欠落している～

2025（令和7）年4月25日

東京高等裁判所第22民事部ハに係 御中

一審原告ら訴訟代理人弁護士

弁護士 河 合 弘 之

外

記

目次

1	はじめに	4
	（1）水蒸気爆発の脅威	4
	（2）原審の認定構造の誤り	6
	ア 原審の行った不公正な判断形式	6
	イ 水蒸気爆発の発生を認めたくない電力会社の見解を争いのない認定事実とする不公正な判断	6
	ウ 原子力規制委員会の見解を何ら検討することなくコピーして認定事実と	

する不公正な判断	7
エ 原審判断は理由不備	8
オ 小括	9
2 水蒸気爆発とは	10
3 水蒸気爆発をシビアアクシデントとして考察する必要性	11
(1) 原発で想定すべき水蒸気爆発	11
(2) 水蒸気爆発は格納容器破損モードとして考察する必要性は科学者の常識	13
ア 元原子力安全委員会委員長佐藤一男氏は、格納容器破損の原因の一つと して水蒸気爆発を掲げている	14
イ 日本原子力研究開発機構（JAEA）は圧力容器外水蒸気爆発が起きる ことを前提に格納容器破損確率を検討している	14
(3) 水蒸気爆発は現実にも何度か発生している。	15
(4) 本件原発は特に大規模な被害を生じさせる水蒸気爆発の発生可能性が高 い形状である。	19
4 水蒸気爆発に係る規制	21
(1) 水蒸気爆発対策は国際基準である IAEA 基準の要求事項である	21
(2) 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	23
(3) 福島第一原発事故後の旧規制の考え方の変更	24
5 新規制基準における水蒸気爆発に係る規制の不合理性	25
(1) 新規制基準において水蒸気爆発にシビアアクシデント対策を要求	25
(2) 水蒸気爆発に係る審査ガイドの不合理性	25
(3) 水蒸気爆発に係る規制は、他のシビアアクシデント対策に比して異常な 規制である	26
(4) 水蒸気爆発に係る規制委員会の不合理な考え	28
(5) FCI 対策を無視した新規制基準	31

6	第一審被告及び原審の判断の誤り	32
	(1) 現行の水蒸気爆発に関する規制基準及びそれに従った対策は、不合理である	32
	ア 深層防護の考え方及びこれ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	32
	イ 原子炉等規制法ないし原子力基本法の趣旨に反する	33
	(2) 水蒸気爆発の具体的機序は未だ解明されておらず、従って、めったに起きないと判断することはできない	34
	(3) 原審は水蒸気爆発に関する各種実験について何ら検討をせずにめったに起きないという結論の根拠としている	35
7	水蒸気爆発に係る実験及び知見	36
	(1) 水蒸気爆発に関する原審の理解は不十分	36
	(2) 水蒸気爆発に係る実験と原審の間違った判断	36
	ア ALPHA 試験	38
	イ KROTOS 試験	39
	ウ FARO 試験	43
	エ COTELS 試験	47
	オ TROI 試験	48
	カ SERENA 計画	52
	(2) 各種試験から原審の結論を導くことはできない	55
8	新たな検討を要する実験と知見	56
	(1) 従来の水蒸気爆発の研究からは説明ができない PULiMS 実験	56
	(2) 水蒸気爆発の発生機序の新知見	60
9	様々なトリガーがある	62
	(1) 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	62

(2) 自発的トリガー	64
ア 熱的要因の例ー1A1 (熔融物温度低下に伴う水蒸気凝縮)	64
イ 力学的要因の例ー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)	65
(3) 外的トリガー	68
ア 熱的要因の例ー1B3 (低温液強制注入)	68
イ 力学的要因の例ー2B2 (異物の侵入)	69
(4) 一審被告及び原審のトリガーの考察は不足している	70
1 0 水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策	70
(1) 水蒸気爆発に係る知見と対策	70
(2) 日本原子力研究開発機構 (JAEA) の研究	71
(3) 東海第二原発で必要な対策	72
1 1 水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準	72
(1) コアキャッチャーによる水蒸気爆発防止	72
(2) 日本の次期原子炉の水蒸気爆発対策	74
1 2 まとめ	76

1 はじめに

(1) 水蒸気爆発の脅威

福島第一原発事故において、水素爆発により原子炉建屋や建屋内の機器、配管が崩壊する様を目の当たりにした。当時の原子力安全委員会委員長の班目氏は水素爆発は起きないと言っていたのに、水素爆発事故が起きた事を目の当たりにして、頭を抱えたと広く報道されている。

この水素爆発と同じく原発のシビアアクシデントとして大規模な

爆発になりうるのが水蒸気爆発である。水素爆発で生じる爆発威力は、爆轟（気体の急速な熱膨張の速度が音速を超え、衝撃波を伴いながら燃焼する現象）では化学反応とともに強い衝撃波（爆轟波）が混合ガス内を伝播する超音速現象で、爆轟波の速度は数千 m/s オーダー、爆轟波面背後の圧力は数十気圧オーダーとなる。

水蒸気爆発は、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、水と高温の熱源が接触して瞬間的な水の蒸発による水蒸気爆発が起きた場合、約 1 6 7 0 気圧のオーダーの爆発が起きることになる。そして、水蒸気は細粒化した核燃料を取り込んでいるので、水蒸気爆発が起きて格納容器外にその水蒸気が広がった場合の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。原子炉の炉型により圧力容器外において溶融燃料と水が接触する構造になっているものがある。福島第一原発では圧力容器下部に水槽が無かったが、東海第二原発では福島第一原発と異なり、圧力容器の真下にサプレッションプールという水槽が備えられている。東海第二原発において福島原発事故のように圧力容器から溶融燃料が下部に落下すれば、サプレッションプール水と溶融燃料が接触して水蒸気爆発が発生し、格納容器が破損して、格納容器外に放射性物質を含んだ水蒸気が放出される可能性が高い。

水蒸気爆発の脅威を考えれば、水素爆発に対する安全規制以上の規制が水蒸気爆発について求められることとなる筈である。しかし、現在の水蒸気爆発に対する安全規制は無いに等しい。しかも原審は、以下のようなレトリックを用いてこの安全規制を是認している。

(2) 原審の認定構造の誤り

ア 原審の行った不公正な判断形式

原審は、認定事実という項目を設け、水蒸気爆発について原審判断の前提とする事実を述べ（原判決５７０～５７７頁）、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。

原審は認定事実を異論がない事実として位置付けて論述している。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り、原審が判断を示さなくてはならない事実である。それにも拘らず、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。

また、その認定の根拠は、一つ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（ＦＣＩ報告書 丙Ｃ１８）であり、公平な第三者の報告書ではなく、一方当事者の報告に過ぎない。これをコピーして引用している。他の一つは、原子力規制委員会の見解であり、何ら検討することなくコピーして引用している。しかし、行政機関の水蒸気爆発に関する判断過程が問題にされ、それに関する司法権の行使が求められているのであるから、何ら検討することなく、規制委員会の見解をコピーすることは裁判の放棄である。

このように原審の水蒸気爆発に関する認定事実は、争いのない事実ではなく、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、何ら検討することなく認定事実とされているのである。

イ 水蒸気爆発の発生を認めたくない電力会社の見解を争いのない認定事実とする不公正な判断

具体的に述べると、認定事実において、原審が、水蒸気爆発について、国内外で各種実験が実施されておりと述べていることは、そ

の通りである。水蒸気爆発は発生するものであり、発生した場合の影響が大きいので各種実験が行われているのである。

続けて原審は、各種実験の結果は以下のとおりとして、ALPHA、KROTOS、FARO、COTELS、TROIの各種試験について実験内容を記載し、そして他電力会社の知見の整理として東北電力株式会社、東京電力、中部電力株式会社及び中国電力株式会社が作成したFCI報告書（丙C18）の記載を引用しているが、以上の原審の述べている各種実験に関する記載並びに他電力会社の知見の記載は、全てFCI報告書のコピー&ペーストである。原審は、一審被告と利害を同じくする電力会社の見解を何ら検討することなく、認定事実にしてしまっている。

水蒸気爆発は、発生の条件が満たされれば必ず起こるものであるから、その発生機序、規模、解析コード等の水蒸気爆発に係る知見を求めて各種実験及び計画が行われてきたが、未だ水蒸気爆発に関する知見は確立していない。各種実験及び計画にはそれぞれの目的があり、そのための実験装置が組み立てられて実験が行われているのであるから、実験結果は実験目的に沿って解釈しなければならず、また、解釈が可能な実験結果と解釈が困難な実験結果も区別して解釈されなければならないところ、FCI報告書は、水蒸気爆発が起きては困るという利害関係を有する電力会社が、水蒸気爆発は起こらないという結論に結び付けるために、各種実験を解釈しているものであり、バイアスのかかった不公平な解釈である。

その解釈をコピー&ペーストして、水蒸気爆発の認定事実としている原審は、判断方法を間違っているうえ、引用した判断内容も間違っている。

ウ 原子力規制委員会の見解を何ら検討することなくコピーし

て認定事実とする不公正な判断

さらに、経済協力開発機構／原子力機関（OECD／NEA）の行ったSERENA計画について、原子力規制委員会の見解を前提事実として記載しているが、いずれも申請書案について述べられた国民の意見に対する原子力規制委員会の見解をコピーしただけのものであり、何らこの見解の正当性について検討をせずに認定事実として記載している（原判決576～577頁）。何の検討もせずに認定事実としていることは、FCI報告書を丸写しして認定事実としたことと同じやり方である。

また、SERENA計画について、「原子力規制委員会は、SERENA計画において、TROI試験の装置を用いて、熔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」と記載（原判決573頁）しているが、そのような確認がなされた事実はない。それにも拘わらず、それを認定事実としているのであるから、水蒸気爆発に関する原審の判断は事実誤認の上に組み立てられていると言わざるを得ない。

FCI報告書の記載を認定事実とすることと同じく、SERENA計画について判断の方法を間違っているうえ、判断内容も間違っている。

エ 原審判断は理由不備

原審は、そのような間違った判断方法及び判断内容の認定事実を記載し、それを前提としてシビアアクシデントの一つとして水蒸気爆発の判断をしている（原判決667～672頁）ので、証人後藤の水蒸気爆発に対する安全確保が不十分である等の批判に対しては、「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、熔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」等々、認定事実を引用して、証人後藤の指摘は直ちに採用することはできない等として、第一審被告の水蒸気爆発に対する有効性評価や対策について、原子力規制委員会が設置許可基準規則 3 7 条 2 項及び 5 1 条に適合すると判断した過程に看過し難い過誤・欠落があるとまではいえないと結論付けている。

原審の判断は、検討を要する事項について何ら検討することなくそれを認定事実とし、その認定事実と相反する或いは疑問を呈する批判的見解に対して、その認定事実を用いて批判的見解を理由がないとしているのであるから、何ら検討することなく批判的見解を理由なしとしているに等しいものである。典型的な理由不備である。

オ 小括

従って、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。

そこで、以下には、水蒸気爆発の概要、水蒸気爆発をシビアアクシデントとして考察する必要性、水蒸気爆発に係る規制について述べたうえで、水蒸気爆発に関する各種実験及び S E R E N A 計画の目的、内容、そして結果として理解すべき事実、水蒸気爆発に係るその余の実験、トリガーに関する実験、トリガーとして理解すべき事実を述べたうえで、現在のあるべき水蒸気爆発対策を述べ、水蒸気爆発に係る現行の規制基準が不合理であり、かつ、一審被告の水蒸気爆発対策も不合理であること、そして一審の判断が誤っていることを述べる。

2 水蒸気爆発とは

水蒸気爆発は、水などの低温の液体に、熔融金属などの高温液体が流入あるいは落下した際、低温の液体の急蒸発（高温液体から低温液体へ熱エネルギーが移動し、低温液体が過熱され急蒸発）による体積膨張によって、高い圧力波を生ずる物理的な爆発現象である。図 1 に概念図を示す（高島他の著書¹から）。

飽和温度（大気圧では水は 100℃。「飽和」の意味は、熱エネルギーを与えても温度が上昇しなくなる（飽和する）ことから用いられるものである）以上に熱せられた水（過熱水）では、急蒸発しやすくなる。過熱水から放出された熱エネルギーによって急激に蒸発してできた水蒸気は、膨張することで力学的エネルギーに変換される。このようにして起こる爆発現象を突沸ともいう。水でいえば、爆発現象下においては、等圧の条件では約 1 6 7 0 倍に体積膨張する。

概念図を説明すると次のようになる。水蒸気爆発は、水に代表される液体プールに、熔融金属や熔融炉心などのような高温液体が落下すると（a）、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かくなる（b）。残りは、水槽底部に溜まるかもしれない。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。

¹ 高島武雄・飯田嘉宏、蒸気爆発の科学、裳華房 1998 年、p.51（[甲 C 1 3 0](#)）

ここで、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（図では低温液体）の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気泡が発生する（c）。この段階をトリガリングという。

発生した水蒸気泡は急成長し圧力波が発生する。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、斉時的に水蒸気生成を

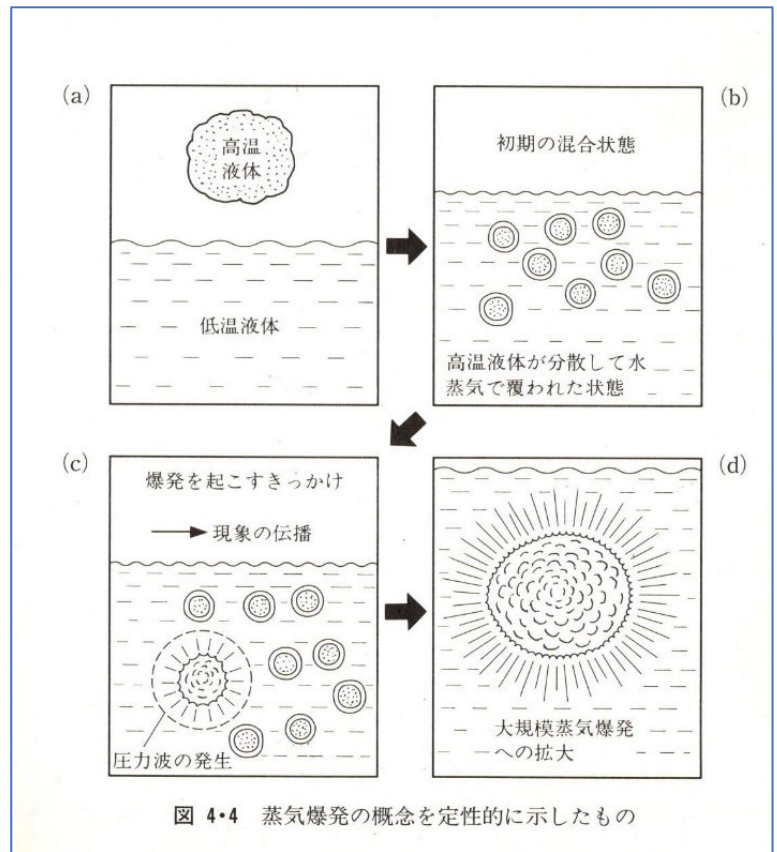


図 1 水蒸気爆発の概念図

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（d）。（c）から（d）の過程を、伝播拡大過程と呼ぶ。

原子力発電所において、冷却材喪失事故などで、炉心熔融が生じた際、圧力容器内や、圧力容器外（格納容器内）で概念図のような過程を経て発生する水蒸気爆発の発生が想定される。

3 水蒸気爆発をシビアアクシデントとして考察する必要性

（1）原発で想定すべき水蒸気爆発

過酷事故（シビアアクシデント severe accident：SA ともいう）の惨状は、チェルノブイリ原発事故や、東京電力福島第一発電所の事故によって現実のものとなった。そもそも核発電と呼ぶべき原子力発電は潜在的な危険をかかえている。すなわち、①放射性物質を大量に内

包している、②高圧、高温状態に密閉されている、③高温流体（高温水、高温・高圧水蒸気）を循環させている、ことなどである。

原発においては②の状態を維持する部材に破損が生じたり、③の循環に必要な供給電力が停止することによって循環が停止された状態になると、最悪の場合、炉心溶融などの過酷事故が起こりうる。炉心溶融が引き起こされると、溶融した炉心と冷却水の接触による水蒸気爆発(Steam Explosion あるいは Vapor Explosion)の発生が想定される。水蒸気爆発を含む溶融燃料と冷却材（水）の接触時の現象を、「溶融燃料と冷却材の(熱的)相互作用；FCI…Fuel Coolant (Thermal) Interaction」と呼ぶこともある。

溶融炉心が圧力容器外に流出して格納容器内の水と接触して水蒸気爆発が発生すると、格納容器の破損をもたらす恐れがある。

溶融炉心の流出によって途方もない量の放射能微粒子と放射能ガスが格納容器に充満している状態になっているのであるから、格納容器が破損するとこれらの放射性物質が大量に外部環境に放出され、重大な放射能被害をもたらすことになる。

例えば、日本原子力研究開発機構（JAEA）は、格納容器破損確率評価（[甲C39](#)）において以下の事故シナリオを想定している。

① 圧力抑制プール内水蒸気爆発

ペDESTAL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ペDESTAL円筒部分の中に落下し、水蒸気爆発が発生する。

ペDESTAL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。

② ペDESTAL領域水蒸気爆発

炉容器の下部ヘッドを溶融貫通した炉心溶融物が、ペDESTAL床
上に形成された水プールに落下し、水蒸気爆発が発生する。

水蒸気爆発負荷に起因する炉容器の変位により、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。炉容器変位のシ
ナリオとしては、i ペDESTAL壁構造物の破損による炉容器支持
喪失、及び ii 水蒸気爆発で加速された水塊が炉容器下部ヘッドに
衝突する際の突き上げの2通りを考慮した。

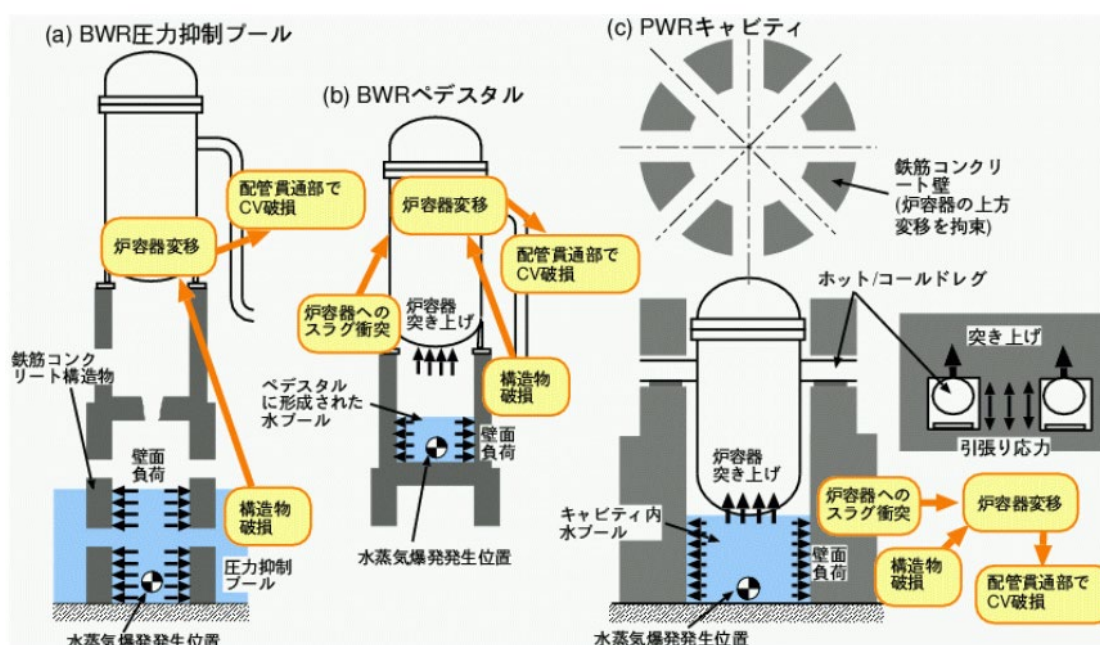


図3 BWR及びPWRモデルプラントにおける炉外水蒸気爆発
による格納容器破損シナリオ¹³⁾

図2 (甲C39 p6より)

したがって、原発には、過酷事故時において、水蒸気爆発を防止す
ることと、水蒸気爆発が発生しても放射性物質が外部環境に放出され
ないような対策が求められる。

(2) 水蒸気爆発は格納容器破損モードとして考察する必要性は科学者

の常識

熔融炉心が圧力容器を貫通して格納容器内の水と接触した場合、水蒸気爆発発生の可能性を除外することはできない。以下に例示するように、格納容器破損モードとして水蒸気爆発を考えなければならないことは原発に関わる科学者において常識とっていいことである。以下にその例を挙げる。

ア 元原子力安全委員会委員長佐藤一男氏は、格納容器破損の原因の一つとして水蒸気爆発を掲げている

「1 この現象は、金属工場で水たまりに熔融金属を落とすと爆発する非常に危険な現象として昔から恐れられている。

また、火山のマグマが地下水と接触すると大規模なマグマ水蒸気爆発を起こすことも知られている。

2 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」(改訂原子力安全の論理 215 頁 [甲C35](#))。

イ 日本原子力研究開発機構(JAEA)は圧力容器外水蒸気爆発が起きることを前提に格納容器破損確率を検討している

日本原子力研究開発機構(JAEA)は、「炉容器外においては熔融炉心が比較的低压で高サブクール度²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。」と考え、日本で使用されている典型的な軽水炉を想定したモデルプラントについて、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を、水蒸気爆発の機構論的解析モデルと確率論的手法を組み合わせて評価する手

² サブクール度：当該液体の飽和温度と実際の液温の差

法及び評価例を示す研究を行い、発表している（[甲 C 3 9](#) 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 2007. 11）。

（3）水蒸気爆発は現実にも何度も発生している。

水蒸気爆発を目の当たりにするものとしては、自然界に散見されるマグマ水蒸気爆発である。マグマが地下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。

マグマ水蒸気噴火と水蒸気噴火

これまでの関連する研究

1983年度～1985年度

神戸大学での卒論・修論
過去の海底火山噴出物の調査研究
噴出した火山灰の形状解析

1989年度

地質調査所での伊東沖1989年海底噴火の対応

1991年度～1994年度

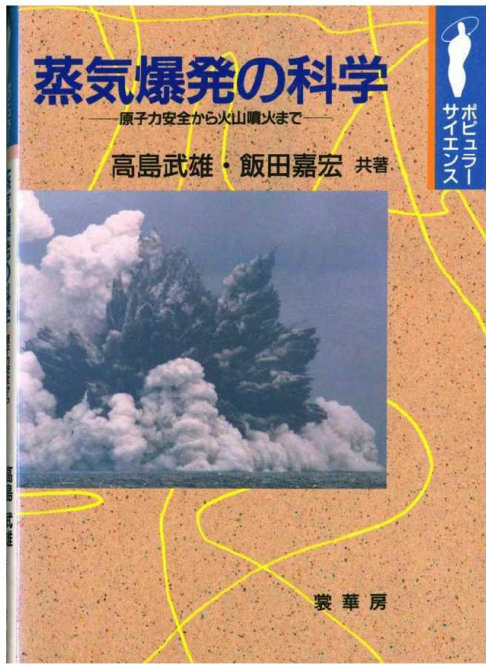
振興調整費による磐梯火山の研究

1993年度～1997年度

科研費：蒸気爆発の動力学

1999年度～2000年度

有珠火山・三宅島の2000年噴火対応



NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

図3 産総研 山元（2015）（[甲 C 1 4 5](#)）より

自然界での水蒸気爆発の事例



図4 水蒸気爆発噴火の実例

原発では、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）で事故が起こった。事故では「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、燃料が熔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とみられ」³ている。『原子力ハンドブック』⁴（オーム社2007年）でも同様の見方をしている。熔融した黒鉛と冷却材の水と接触して水蒸気爆発を起こした⁵という見方

³原子力百科事典 ATOMICA

(https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-04-11.html)

⁴ 原子力ハンドブック編集委員会編、原子力ハンドブック、オーム社、p.1193（2007）

⁵ 中尾政之、チェルノブイリ原発の爆発、失敗知識データベース—失

もある。

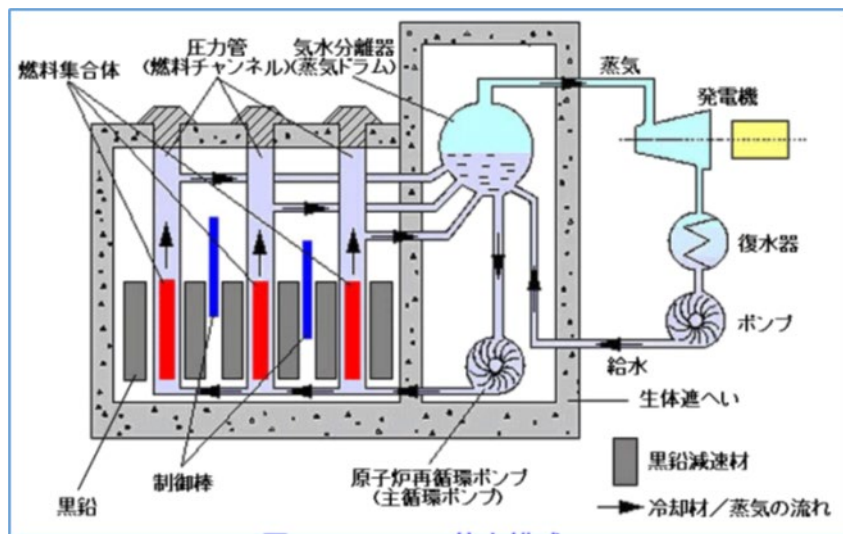


図5 チェルノブイリ原発の模式図

また、日本において発生した顕著な水蒸気爆発の事例が下記の通り存在する。これら水蒸気爆発事故の詳細なメカニズムは解明されていないが、高温の溶融物と水が接触した結果水蒸気爆発事故が生じたことは事実である。

表1

番号	日時	場所	溶融物	量	温度℃	受傷者
1	2008.1.21	長岡市鋳物工場「興和」	鉄			重傷4人
2	2012.10.20	マツダ	鉄と砂の			3名火傷

敗百選(<https://www.shippai.org/fkd/hf/HA0000644.pdf>)

			水分			
3	2013. 4. 9	N伸銅	真鍮		約 800	死傷 4 名
4	2014. 1. 14	小名浜製錬	銅			
5	2015. 4. 18	JFE スチール西日本製鉄所	溶鋼	200 トン	約 1500	重軽傷 5 名
6	2015. 9. 1	北九州のメッキ工場	アルミニウム			
7	2017. 4. 25	旭川市の檜山鉄工所	鉄			16 人病院搬送
8	2017. 5. 1	掛川市大淵 M 工場	アルミニウム	少量		軽傷 1 名
9	2018. 7. 6	朝日アルミ産業岡山工場	アルミニウム			数十人負傷
10	2018. 7. 20	浦添市クリーンセンター	焼却灰塵			
11	2021. 4. 26	太平洋セメント埼玉工場	高温の流動砂			
12	2022. 9. 6	いわき大王	高温の砂			1 人軽傷

		製紙工場 ⁶				
--	--	-------------------	--	--	--	--

これらの事故からすれば、高温溶融物と水が接触する場合に、水蒸気爆発発生の可能性は除外できない。メルトスルーにより高温溶融物が格納容器内に流れ落ち、格納容器内にある水槽の水と接触すれば水蒸気爆発の可能性は除外できないのであるから、原発におけるシビアアクシデント対策として水蒸気爆発対策を検討することは必須である。特に東海第二原発の炉型は、圧力容器下部に水槽があるのでメルトスルーした溶融炉心と水が接触して水蒸気爆発が発生することを想定した対策は必ず考える必要がある。

（４）本件原発は特に大規模な被害を生じさせる水蒸気爆発の発生可能性が高い形状である。

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ない。

本件原発は、福島第一原発と異なり、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おり、水蒸気爆発が発生する可能性が高い構造である。

⁶いわき大王製紙 自家発電設備爆発事故について [018_03_02.pdf \(meti.go.jp\)](#)

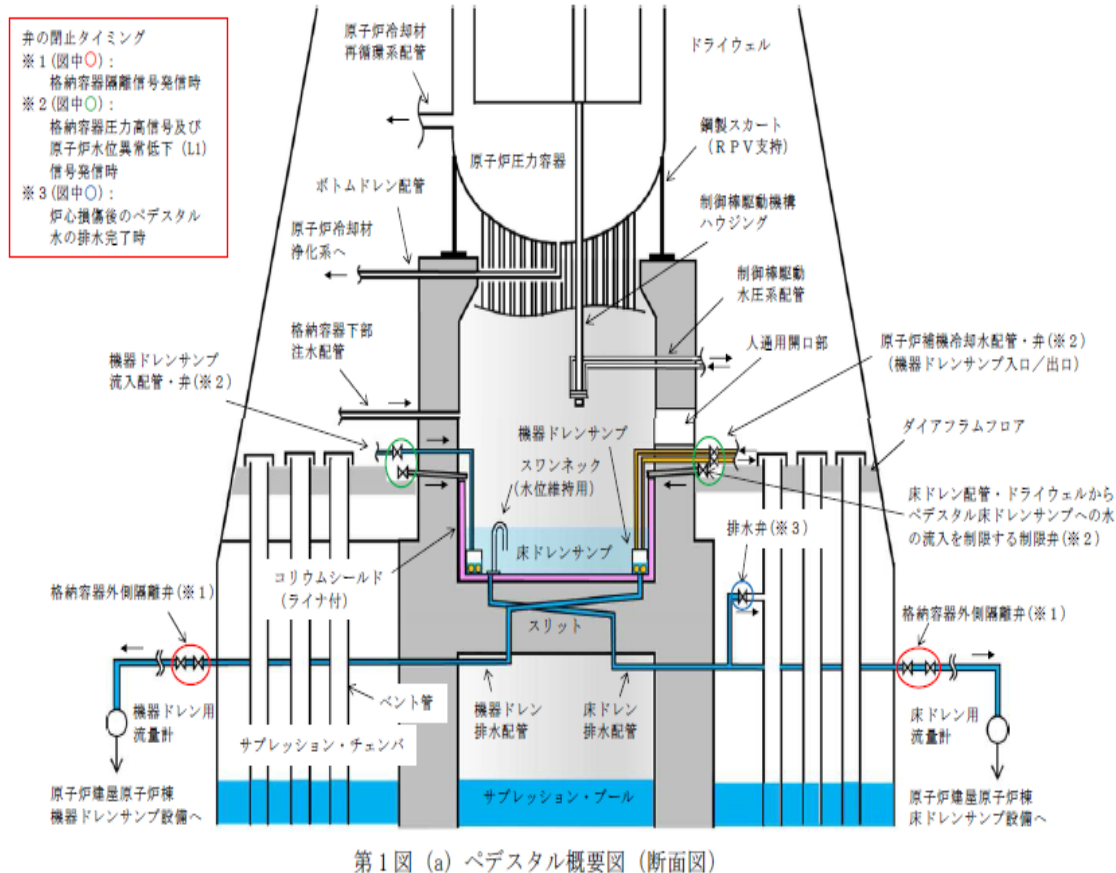


図6 東海第二原発の概要図

例えば、ペデスタルにデブリ（炉心溶融物）が落下し、ペデスタルに張ってある水と接触すれば、水蒸気爆発が発生し、ペデスタルが破壊され、ペデスタルのR P V（原子炉压力容器）支持機能が失われてR P Vの傾斜・転倒事故を招き、或いは、ペデスタルの床スラブのデブリ保持機能が失われて下部のサプレッションプールにデブリが落下し、サプレッ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。

以下の図は、茨城県東海第二発電所ワーキングチームの会議において、一審被告が説明資料として提出した「重大事故等に対する安全対策の手順及び有効性評価について(改訂版) 2024年7月23日 日本

原子力発電株式会社」の図である。

【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DESTAL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

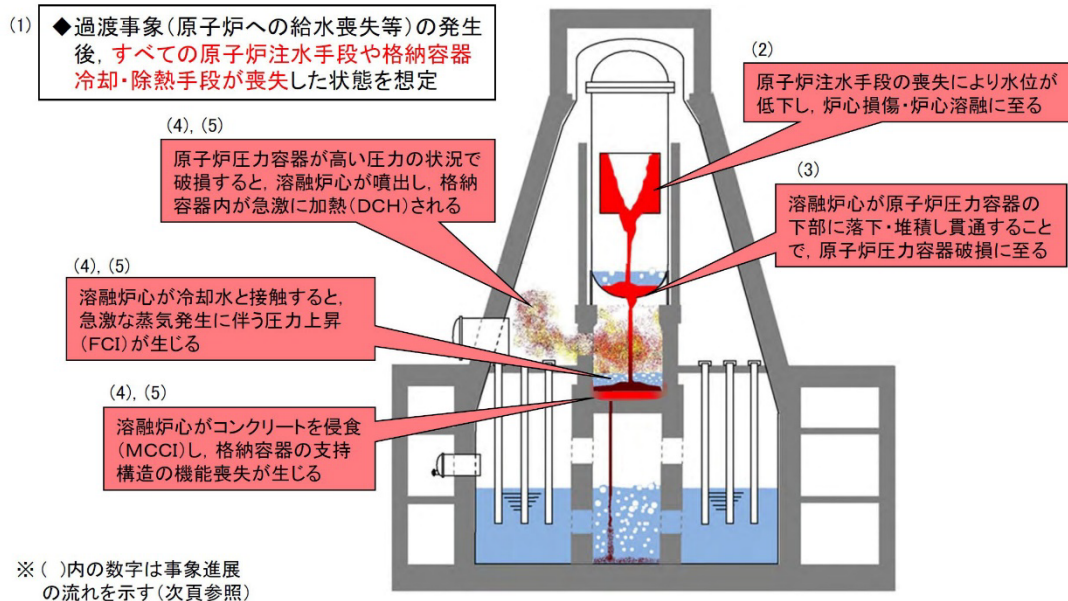


図 7 東海第二原発の FCI の模式図

JAEAも前記のとおり同じような事故シナリオを描いている。

これらの想定は、あり得ない想定ではなく、あり得る事故想定の一つであり、水蒸気爆発事故の脅威に対する規制及び対策が合理的になされなければ、大惨事が惹き起こされることになる。

4 水蒸気爆発に係る規制

(1) 水蒸気爆発対策は国際基準である IAEA 基準の要求事項である

福島第一原発事故を契機として、我が国では国際的視野を欠いたガラパゴス的安全規制が行われていたことを反省し、原子力基本法を改正して、原子力利用の安全を確保するには確立された国際基準を踏ま

えることが追加規定された（原子力基本法 2 条 2 項新設）

シビアアクシデントの進行過程において水蒸気爆発が発生することを想定して対策を講じるべきであることは、国際的に共通の了解事項であり、I A E A の指針には、以下のように水蒸気爆発をシビアアクシデントとしてその対策を必要とするものと位置づけている。

ア 新規発電所については、発生する可能性がある重大事故は、格納系の設計段階で考慮されるべきである。重大事故の考慮は、以下の状態を実質的に排除することを目的とされるべきである。

— 格納構造物の直接加熱、水蒸気爆発又は水素の爆轟の結果として、早期の段階で格納構造物に損傷を与え得る重大事故状態（原子力発電所の原子炉格納系の設計 安全指針 N S - G - 1 . 1 0 [甲 C 3 6](#) 7 2 頁 6 - 5 項）。

イ 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 N S - G - 1 . 1 0 [甲 C 1 5](#) [5](#) 1 1 0 頁 III - 1 0 ）。

ウ 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。この過程において、解析では頻繁には考慮されない問題、すなわち、極めて起こりそうもない設備の故障や異常動作などの追加的なことも考慮されるべきである（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 N S - G
- 2。 1 5 [甲 C 3 7](#) 1 3 頁 3 - 3 項)。

エ 起こり得る事象を決定するのに本質的な不確かさがあることを考慮すると、P S A は、シビアアクシデントの手引きの策定において事故シナリオを除外するために、先験的に使用されるべきではない。

(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 N S - G - 2。 1 5 [甲 C 3 7](#) 1 3 頁 3 - 5 項)。

以上のように I A E A は、水蒸気爆発はシビアアクシデントの一つとして発生するものであり、シビアアクシデント対策を講じる必要があること、また、起こり得る事象に本質的な不確かさがあることを考慮すると、P S A (確率的安全評価) はシビアアクシデントの手引きの策定において事故シナリオを除外するために、先験的に使用してはならないと規定している。すなわち、発生確率が小さいことを理由に水蒸気爆発をシビアアクシデントから除外するようなことがあってはならないということである。

(2) 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

しかし、福島第一原発事故以前は、水蒸気爆発をシビアアクシデントとして想定してその対策を講じることを規制として要求してこなかった。すなわち、「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)において、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。

(3) 福島第一原発事故後の旧規制の考え方の変更

しかし、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、上記決定は廃止することになった（[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

2 シビアアクシデント対策における原子炉設置者と規制の役割

3 シビアアクシデントに係る安全評価

4 法令要求化の範囲

5 安全研究の推進

この考え方と同様に、政府の事故調査・検証委員会等は、どんなに発生確率が低い事象であっても、あり得ることは起こると考えるべきであり、発生確率の低いものは対応しなくてもよいと考えることは誤りであると指摘している（[甲C49](#)）。

そして、新規制基準では、水蒸気爆発は「原子炉圧力容器外の熔融

燃料—冷却材相互作用」として、格納容器破損モードとして必ず想定すべき事項にされた（設置許可基準規則の解釈第 3 7 条 2-1 (a)、実用発電用原子炉に係る運転停止中原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価に関する審査ガイド [甲 C 3 3](#)）。

5 新規制基準における水蒸気爆発に係る規制の不合理性

（１）新規制基準において水蒸気爆発にシビアアクシデント対策を要求

新規制基準においては、深層防護の第 4 層の防護レベルも規制対象とし、水蒸気爆発対策をシビアアクシデント対策として要求している。

具体的には、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 3 7 条 2 項）と規定し、必ず想定すべき格納容器破損モードの一つとして、水蒸気爆発（原子炉压力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用）を掲げた（同項解釈 2-1 (a)）。

そして、「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」において、3. 2. 3 格納容器破損モードの主要解析条件等の（３）原子炉压力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用について規定している（甲 C 3 3）。

（２）水蒸気爆発に係る審査ガイドの不合理性

しかし、その対策は「解析によって原子炉格納容器バウンダリの機能が喪失しないこと確認する」である。水蒸気爆発により原子炉格納容器が破損する場合を想定し、その為の対策を検討するものとはなっていない。しかも、主要解析条件の（注）には、「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（圧力スパイク）の可能性があることから、その影響を評価する」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。

福島第一原発事故の発生を受けて、「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という認識に至り、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にもかかわらず、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。

すなわち、原発の安全確保の考え方の基本は、深層防護による。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るものである。シビアアクシデントとしての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し、また「リスクが十分に低く抑えられている」という認識によってシビアアクシデント対策を不要とするのは、平成23年決定に反して福島第一原発事故以前の安全対策の考え方に関する間違いを踏襲するものである。

（3）水蒸気爆発に係る規制は、他のシビアアクシデント対策に比して

異常な規制である

他のシビアアクシデント対策は以下のようにになっている。

(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

それぞれシビアアクシデントが発生することを想定し、それが発生しないように対策を講じる規定になっている。

しかし、水蒸気爆発については以下のように対策として具体的要求はなく、対策がないのに対策と称する異様な対策になっている。他のシビアアクシデント対策と比較すれば明らかに不合理である。

(6) 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用

対策例：解析によって原子炉格納容器バウンダリの機能が喪失しないことを確認する。水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いことを示すこと。

(4) 水蒸気爆発に係る規制委員会の不合理な考え

以上のように、水蒸気爆発に係るシビアアクシデント対策を規定した新規制基準は、対策は何も求めない不合理な基準となっている。それは、新規制基準に関する検討チームの委員らが、下記の通り、水蒸気爆発は、発生頻度は極めて低いから、その対策は取らなくてよいとする極めて不合理な見解に基づいて基準の検討をしたからである。この規制委員会の考えは、福島原発事故を踏まえた政府事故調の考え、国際的基準である I A E A の安全指針、深層防護の考え方に反するものであり、福島原発事故の教訓を無視するものである。

発電用軽水型原子炉の新安全基準に関する検討チーム 第 9 回会合
平成 25 年 1 月 11 日（金）（[甲 C 1 4 6](#)）[000050419.pdf](#)

更田委員： 例えば、一つの例、渡邊さんの指摘で言う、熔融燃料－冷却材相互作用、FCI、今、水蒸気爆発と言われましたけれども、その回避策という意味でそれぞれの対策が上がっているわけではないし、実態として、FCI に関して言うと、明示的な防護策で、例えば、水に対してサーファクタント、界面活性剤を入れるとか、いろいろな対策というのはあるけれども、実態としては発生頻度が極めて小さいということで、明示的に水蒸気爆発に対して対策はとられていないのが事実で、こういう整理にすると、例えば、今言われたように、減圧が対策であるかのようにだけれども、水蒸気爆発の発生からいうと、減圧した方が起こりやすいのは事実で、むしろ、その対策を明示的にとっていない。対水蒸気爆発対策というのは、あるとすれば、例えば、水が溜まる場所の水深を浅くしておくとか、そ

ういったような考慮だと思うんですけれども、この辺りの整理はどうですか。(p 5)

更田委員： ごめんなさい。ちょっと先に言うと、私としては、どちらかという、熔融燃料－冷却材相互作用、水蒸気爆発に対してどう
いう対策を云々という整理の仕方というのは、あまりふさわしくな
くて、要するに、逆に言うと、全体を見たときに、先ほど申し上げ
たように、圧力容器の直下にある程度以上の水深を設けているもの
が、そして、サブクールが大きければ大きいほど起きやすいだとか、
そういった色々があるから、それを全体として見たときに、水蒸気
爆発の発生頻度が十分低く抑えられているかという整理はあるんだ
ろうと思いますけれども、明示的にこの対策が水蒸気爆発対策であ
るかのような整理をするというのはふさわしくないと思いますけれども。(p 5)

発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム 第 23 回会合
平成 25 年 6 月 3 日 (月) ([甲 C 1 4 7](#)) [000050433.pdf](#)

更田委員： もう皆さん、釈迦に説法かもしれないけど、水蒸気爆発、
混合熔融物と冷却材との接触のモードによっても、ですから、熔融
物がどのように、どう接触するかにもよるし、粗混合の状態によっ
てもその後のプロセスが変わってくるし、電場の様式や、その後の
爆発に関しても、非常に大きな不確かさがある。例えば、JASMINE
といったようなコードに関しても、粗混合状態に関して、流体力学的な、
何といいますか、微粒子化等々を考慮して粒径を求めている
けども、それにしてもやはり仮定があると。それから、梶本さんが
再三おっしゃっているように、セラミックス系で大規模な水蒸気爆

発が起きた例はない。とはいうものの、じゃあ、規模を、スケールをどんどん大きくしていったら起きないかと言い切れるかというと、そういった実験というのはないから何とも言いようがないと思えますけれども。ただ、極めて起きにくい現象であるということぐらいはわかっていると。そういう程度だと思っていて、むしろ水蒸気爆発については、純金属を溶融させて、水と接触させたような実験があって、それが現象として極めておもしろいがために非常に注目された。それがために、ちょっと脅威が過剰に捉えられている部分があるというようなことを以前申し上げましたけれども、極めて不確かさが大きなものではあるから、やっぱり感度解析みたいなものはきちんとやって、その程度は押さえておいて、ただし、やはりこれは抑え込むものという、そういう位置づけなのだろうと思います。

(p 3 2)

これらの新規制基準検討チームの考えは、福島原発事故の教訓を踏まえて第4層を規制基準に取り入れることにした根本的考えに反する考えであり、その不当な考えに基づいて、シビアアクシデント対策はなされず、前記のとおりめったに起きないことを示せば水蒸気爆発対策は不要という非現実的な規定がなされている。

但し、詳細に検討すると、原子力規制委員会の検討チームは、水蒸気爆発は、圧力容器の直下にある程度以上の水深を設けているもの、そして、サブクールが大きければ大きいほど起きやすい、減圧した方が起こりやすい等と水蒸気爆発の可能性や水蒸気爆発が起こりやすい条件についても言及しており、発生頻度が極めて低いから水蒸気爆発対策は不要という結論の根拠は不明としか言いようがなく、無理やり対策は不要としていると解される。

そして、新規制基準案に対する公募意見に対する規制委員会の回答でも、水蒸気爆発対策の必要性は認めている。

【溶融燃料－冷却材相互作用の精度について】

- ① 水蒸気爆発については、まず原子炉設置者がその発生を考慮すべきか否かを検討しなければなりません。
- ② 発生を考慮するならば、格納容器が破損するか否かの検討が必要です。
- ③ 水蒸気爆発により格納容器が破損するのであれば、何らかの対策が必要です。（[甲 C 1 4 8](#) 新規制基準に関連する評価ガイド（重大事故対策関係）に対する御意見への考え方（案） 平成 2 5 年 6 月 3 日 p 1 9）[000050394.pdf](#)

と三段階に分けて述べ、水蒸気爆発対策の必要性は認めている。

水蒸気爆発の対策は不要という結論は、無理やり選択した結論である。

（5）F C I 対策を無視した新規制基準

高温溶融物と冷却材の接触により、水蒸気爆発は発生し得る。必ず発生する訳ではないが、発生し得ることに争いは無い。それ故、水蒸気爆発対策がシビアアクシデント対策として求められている。

しかるに、現在の基準が無策であることは前述のとおりであるが、そればかりでなく、M C C I（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を制定しているのが新規制基準である。

すなわち、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 5 1 条）と規定し、これは、M C C I 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）と規定され、M C C I 対策のために冷却設備を設けることを要求している。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。新規規制基準は、水蒸気爆発対策を求めないばかりか、水蒸気爆発の発生を軽視して、水蒸気爆発を誘発する対策を求めるという不合理な基準を策定しているのである。

6 第一審被告及び原審の判断の誤り

前項の不合理な規制基準（水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことを示すこと）に基づき、一審被告は、これまで行われてきた各種の水蒸気爆発の実験に関する電力会社の解釈を引用して水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いと主張し、原審もその引用を何ら検討することなくそのまま前提事実とし、その前提事実を根拠として水蒸気爆発対策に過誤、欠落がないと判断した。しかし、第一審被告及び原審の判断は、以下の理由から、水蒸気爆発の安全対策として欠落しているか又は不十分である。

（１）現行の水蒸気爆発に関する規制基準及びそれに従った対策は、不合理である

ア 深層防護の考え方及びこれ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

深層防護は前段否定、後段否定の考えに依拠し、各層では後の層があるから緩やかな安全対策を講じればよいという考えを否定して各層で出来る限りの安全対策を講じるべきであり（後段否定）、また、各層で安全対策は終結すると考えるのではなく、各層は破られるものとし

て後の層の安全対策を考える（前段否定）。この考え方に従えば、水蒸気爆発は起こるものとしてその対策を講じなければならず、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。どんなに発生可能性が低い事象であっても、あり得ることは起こると考えるべきであり、発生可能性の低いものは対応しなくてもよいと考えることは誤りである。また、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（実用発電用原子炉に係る新規制基準の考え方：66 頁、原子炉等規制法 1 条、原子力基本法 2 条 1 項・2 項）不合理である。

イ 原子炉等規制法ないし原子力基本法の趣旨に反する

「原子力発電所のシビアアクシデントのように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（略）の精神にのっとり、・・・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（略）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つて、これを行うものとする。」と定めていることからすれば、上記のような新規制基準は、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。

(2) 水蒸気爆発の具体的機序は未だ解明されておらず、従って、めったに起きないと判断することはできない

現に、度々水蒸気爆発は発生している。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ある。」([甲 C 1 4 4](#) Status Report on Ex-Vessel Steam Explosion NEA/CSNI/R(2017)15)。

OECD/SERENA フェーズ 2 プログラムの枠組みの中で重要な進歩が遂げられたにもかかわらず、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。「OECD/SERENA フェーズ 2 プログラムの後も、新たな FCI/SE プログラムが進行中です。2017 年には国レベルで、フランスの ICE-ポスト福島プログラムが、そしてスウェーデンでも実施された。欧州の国際レベルでは、NUGENIA プログラムの枠内で SARNET ネットワークが構築され、専門家間の交流を提供し、欧州 SAFEST (2014-2018 年) および ALISA (2015-2018 年) プログラムの枠内で欧州の一部の施設へのアクセスを促進しています。」(同上)。

従って、水蒸気爆発に関する不十分な知見からすれば、水蒸気爆発はめったに起きないと判断することは不可能であり、現行の基準は、水蒸気爆発に関する現在の知見に反する不合理な基準である。

また、仮に確率的に低いから事故シナリオから除外するとすれば、それは、福島原発事故の教訓を踏みにじるものである。「起こり得る事象を決定するのに本質的な不確かさがあることを考慮すると、P S A

は、シビアアクシデントの手引きの策定において事故シナリオを除外するために、先験的に使用されるべきではない。(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項 [里C37](#))。」にも反する。

(3) 原審は水蒸気爆発に関する各種実験について何ら検討をせずにめったに起きないという結論の根拠としている

原審は、めったに起きないという判断をしたのは、ALPHA試験、FARO試験、KROTOS試験、COTERS試験、TRO I試験に関する電力会社の報告書(FCI報告書)、SERENA計画の結論であるとして引用した原子力規制委員会見解、を何ら検討することなく前提事実として、水蒸気爆発はめったに起きないという結論を取った上で、「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はできない」(671頁)とするものであるが、ある見解を何ら検討することなく前提事実とし、しかも、それを争点の判断理由とする判断方法は何ら判断をしていないに等しい。また、原審が引用して前提事実とした内容も間違っている。

原審は、水蒸気爆発に関する新規制基準が福島原発事故の教訓及び深層防護の考え方を踏まえて規定された原子炉等規制法等の法の趣旨に反して不合理であることを見落としただけでなく、めったに起きないとする基準への当て嵌めにも看過し難い過誤、欠落があることを見落としている。

7 水蒸気爆発に係る実験及び知見

(1) 水蒸気爆発に関する原審の理解は不十分

水蒸気爆発は、その発生には、熔融物の組成・温度、過熱度、粒状熔融物の形状、粗混合の分散状態、ボイド率、水温、水深、熔融物と水の接触状況等影響を与えるパラメータと現実の状況等が複雑に絡み合い、未だ発生機序は不確かであり、いつ、どのように水蒸気爆発が起こるという予測はできないのが現在の研究レベルである。原審は、水蒸気爆発の機序はある程度解明されている（669ページ）と述べているが、解明されているのは第2項で述べた概略であり、上記のとおり「主に未解決の不確実性のため、原子炉圧力容器外水蒸気爆発の考慮は未解決の問題のままである」（[甲C144](#)）ので、水蒸気爆発はめったに起きないという結論に結び付くような解明はなされていない。

そもそも、水蒸気爆発に係る上記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のであるから、各実験の評価は目的に沿って行うべきところ、第一審被告及び原審は、各実験の目的を間違い或いは無視し、我田引水した評価を行い、めったにおきないという結論に結び付けている。そのような誤った判断をしたのは、水蒸気爆発に関する理解が不足していることに由来するものでもある。

(2) 水蒸気爆発に係る実験と原審の間違った判断

水蒸気爆発に係る主な実験は、1998年に始まったALPHA試験以降、KROTOS試験、FARO試験、COTELS試験、TROI試験が行われた。2002年1月からSERENA計画（OECD/SERENA計画はシビアアクシデント時の水蒸気爆発現象を対象とした国際研究プログラムであり、各参加機関の解析手法の比較・検討を通じて、実機解析における有効性を評価することを目的としている）が行われ、同計画はフェーズⅠとフェーズⅡに分かれて行われ、

同計画のフェーズⅡにおいてTROⅠとKROTOSの装置を用いた実験が行われた。

原審は、SERENA計画以前に行われた各実験についてFCⅠ報告書をコピーして前提事実とし、また、SERENA計画のフェーズⅡにおけるKROTOSの装置を用いた実験には触れず、TROⅠの装置を用いた実験にのみ言及した原子力規制委員会の見解をコピーして前提事実として、何ら検討することなく、これらを結論としている。すなわち、「ALPHA試験以降、KROTOS試験、FARO試験、COTEL S試験、TROⅠ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熔融物温度や、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、TROⅠ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ないことが確認されたとしている」（原判決668頁）。

原審の各実験に関する評価は以下のとおりであり、それぞれに問題点があり、原審において後藤証人が個別の実験の信頼性や評価の問題を指摘しているが、原審はそれにもまともに回答をしないか、或いは、何ら検討をせずにコピーをしただけの前提事実を理由にして、問題の検討をしていない。

以下に、各試験に対する判示と各試験結果として観察すべき内容を比較して原判決の不十分な事実認定及び評価について述べる。なお、原審の各実験に関するコメントは一審被告のコメントでもある。

ア ALPHA 試験

原審はこの実験を以下のように取り上げている。

酸化アルミニウムと鉄からなる模擬溶融物（融点が低く過熱度が大きくなりやすいなど水蒸気爆発が発生しやすい性質を有する）。

高雰囲気圧力、サブクール度（対象とする液体の圧力の相当する飽和温度と実際の液温の差）が小さい場合は、水蒸気爆発は抑制され、溶融物を半減させた 3 ケースのうち 2 ケースで水蒸気爆発が発生していない。水蒸気爆発のエネルギー変換効率は約 1 ～ 6 %。（原判決 5 7 1 頁）

しかし、この試験は、以上のような結論を導くことを目的とした実験ではない。1988 年に日本原子力研究所 東海研究所（現在の日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所）に ALPHA 試験装置が設置され（ALPHA とは事故時格納容器挙動試験のこと）、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](#) ALPHA ATOMICA）。

ALPHA 計画では（1）貫通部リーク定量化試験、（2）溶融炉心冷却材相互作用試験、（3）溶融炉心コンクリート相互作用試験、（4）エアロゾル挙動試験の 4 項目の試験を行うこととしていた。

溶融炉心冷却材相互作用試験のうち、テルミット反応により生成した溶融物 10kg 及び 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が、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](#) JAERI M 92-035「ALPHA 計画溶融物落下水蒸気爆発実験—現象の把握とエネルギー変換効率の推定 1992 年 3 月」）。

1992 年までに大規模水蒸気爆発実験（ALPHA-STX 実験）は終了し、日本原子力研究所では、水蒸気爆発解析コードの開発に研究方針を定めた。そのようにして開発されたのが JASMINE コード（実機規模の水蒸気爆発負荷の評価のためのシミュレーションコード）である。

イ KROTOS 試験

原審はこの実験を以下のように取り上げている。

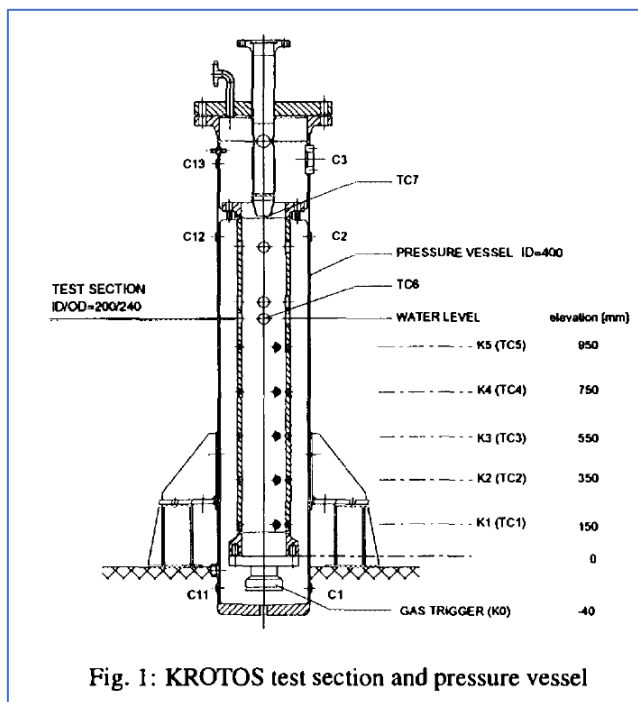
アルミナを用いた試験では、サブクール度が大きい試験ケースでは外部トリガー無しで水蒸気爆発が発生している。サブクール度が小さい試験ケースでは外部トリガー無しでは水蒸気爆発は発生していない。

二酸化ウラン混合物を用いた試験では、外部トリガー無しでは水蒸気爆発は発生していない。外部トリガーがあるものでも、一部のサブクール度が大きい試験ケースでは水蒸気爆発が発生しているが、水蒸気爆発が発生していないものもある。水蒸気爆発に至ったケースのエネルギー変換効率は、アルミナを用いた試験と比較すると低い。

二酸化ウラン混合物は、一般的に過熱度が小さく、粒子表面が水と接触した直後に表面が固化しやすいことや水素が発生することが、水蒸気爆発の発生を抑制した可能性がある。（原判決 571 頁）

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。KROTOS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。

この試験は、JRC -ISPRA⁷が実施した FCI のうち、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。従って、この実験装置の形状は、実機の形状とは異なっている。



アルミナを用いた試験は9回行われ、うち外部トリガーを与えたもの1回、与えないもの8回である。外部トリガーを与えた試験では、サブク

ール度10K（このサブクール度は小さいと評価される）で水蒸気爆発が発生している。外部トリガーを与えないものでも、8回中5回の試験において、サブクール度79K、83K、80K、100K、120Kで水蒸気爆発が発生している。

図8 KROTOS実験装置

二酸化ウラン混合物を用いた試験は10回行われ、うち外部トリガーを与えたもの8回、与えないもの2回である。外部トリガーを与え

⁷ JRC -ISPRA の JRC (Joint Research Centre) は、欧州連合 EU の原子力研究機関「共同研究センター」であり、ISPRA は JRC の所在地で、イタリア北部の町名である。

た試験はサブクール度 83 K、102 K、122 K で水蒸気爆発が発生している。外部トリガーを与えない試験では水蒸気爆発は発生していない。

本実験は、このように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。水蒸気爆発を数値的に解析するためには、大きく分けて「粗混合過程＝高温融体の落下から水中での分散などの時間変化、粒子径の分布、液相と気相の体積割合（ボイド率という）の時間変化など」と「爆発過程＝人為的に加えたトリガーによって、高温液の細粒化、水蒸気の発生量変化、圧力波の圧力値と伝播の過程など」の2種類の物理モデルと物理モデルの数式化を行う必要がある。KROTOS 試験は、このうちの「爆発過程」の把握を目的としたものである（上記②）。

その結果の1例は、下図(Fig. 7)のようにまとめられている。

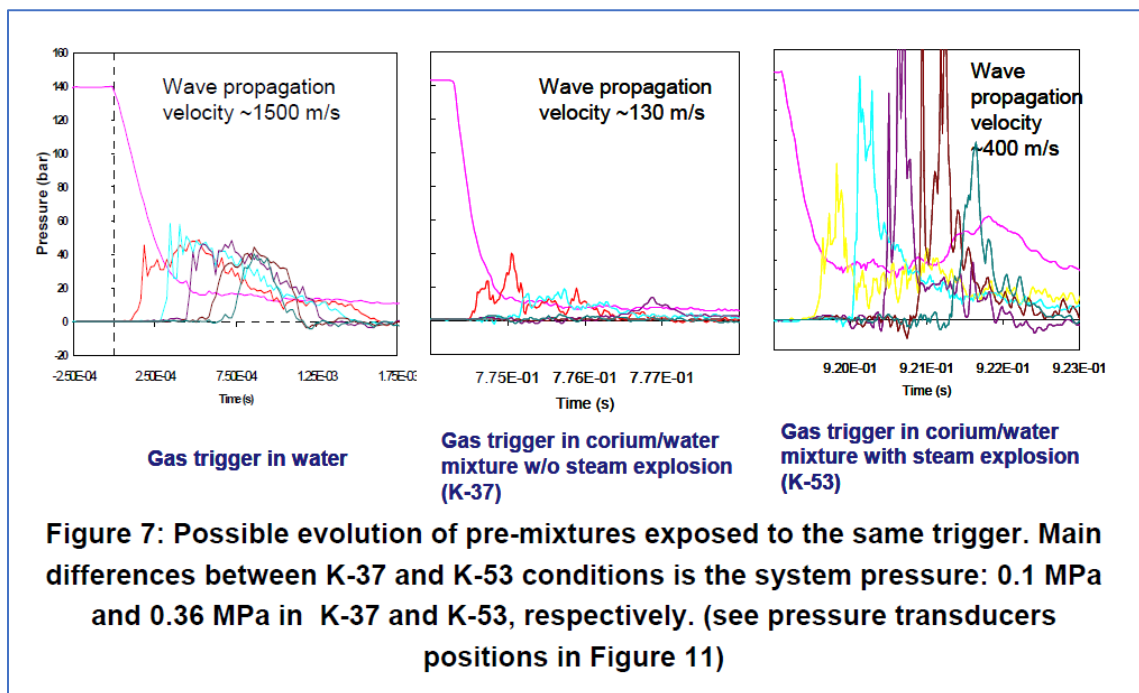


図9 KROTOS 圧力波データ

図中の、左の図がトリガー波形の伝播の様子、中の図が水蒸気爆発が起こらなかった時の圧力波の伝播過程、右の図が水蒸気爆発が生じた時の場合であり、それぞれ伝播速度が、約 1 5 0 0 m / S、1 3 0 m / S、4 0 0 m / S などと得られている。

上記図の縦軸は気圧、横軸は秒、破線は 0 秒の位置を示し、左の図は、溶融物は投入せずに、1 5 0 気圧のガスをトリガーとして加えた場合、ガス室の圧力変化（1 5 0 気圧から減少している）と、水槽中の一つの圧力波の変化を違う位置から測定したものである。

中の図は、溶融物は投入したが水蒸気爆発は起こらず、蒸気泡に圧力波が吸収されている状態を示すものである。

右の図は、溶融物を投入して水蒸気爆発が起こり、爆発時の圧力が成長しながら伝播していくことが示されている。

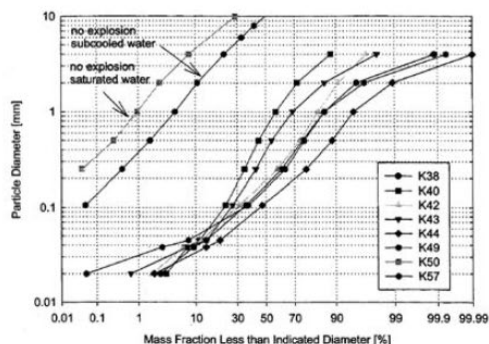


Figure 12 : Debris size in selected KROTOS alumina tests with steam explosion compared to debris size without steam explosion (top two curves)

図 1 0 KROTOS 粒子径データ

さらに爆発後に細粒化した粒子も回収され、その分布も測定されている。上記 Fig. 1 2 はアルミナの場合であるが、横軸が全体質量に対する各粒子の積算割合、縦軸が粒子径となる。上記図における点は、回収された粒子サンプルの代表値であり、図上の左側の 2 本の線は爆

発しなかった時の状態を示し、粒子が大きいことが示されている。右側の 5 本の線は爆発した時で、爆発時は微粒化していることがわかる。

このような結果をもとに、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ることになる。K R O T O S 試験はこのような爆発状況のデータを採取して、爆発状況を解明することを目的としたものである。

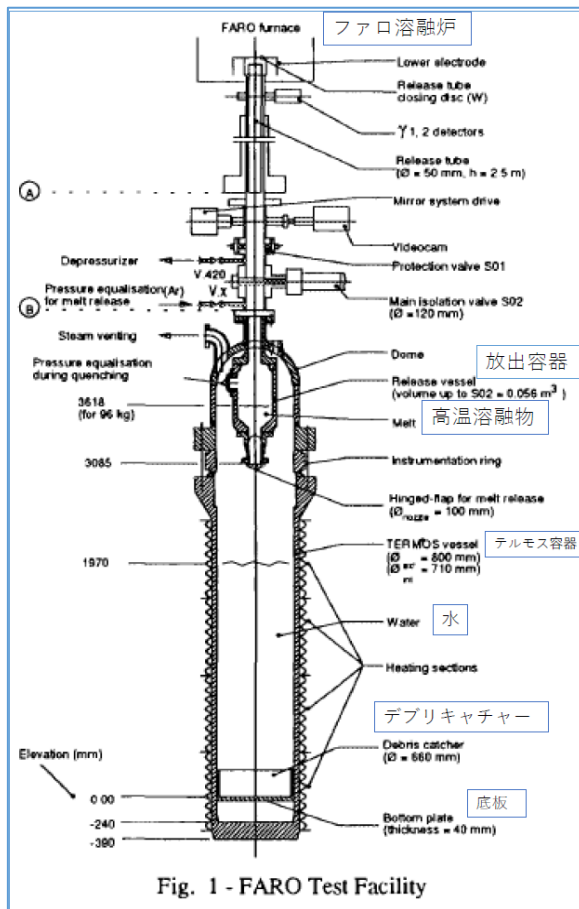
ウ F A R O 試験

原審はこの実験を以下のように取り上げている。

二酸化ウラン・二酸化ジルコニウム混合物が用いられた試験で、高圧・飽和水試験、低圧サブクール試験のいずれにおいても水蒸気爆発は発生していない。（原判決 5 7 2 頁）

しかし、この実験は水蒸気爆発発生の有無を調べるための試験ではない。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。

FARO試験のうち L-1 から L-28 までは、粗混合状態をモデル化

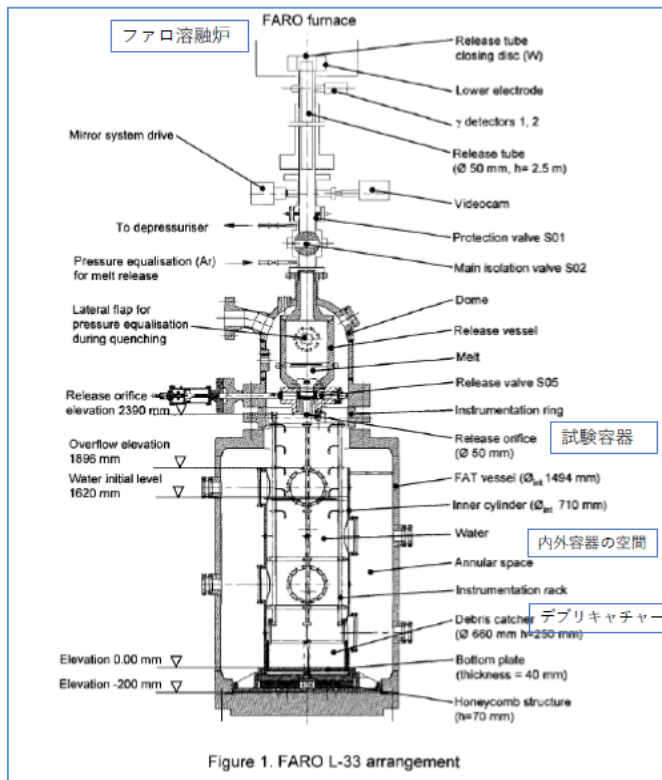


するために、熔融物の冷却挙動（クエンチング）を解明するために行われたものである⁸。このような実験目的のため、爆発の発生は考えられておらず、従って装置の水槽は1重であり、内部の観察もできない構造になっている。また、水蒸気爆発が起こらないような飽和温度に近い水の条件で行われた実験である。

図 11 FARO の L-1～L 28 の実験装置

⁸ D. MAGALLON、I. HUHTINIEMI、H. HOHMANN、Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments [Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309397000433) (甲 C 1 3 3)、Proceedings of the OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions May 19 - 21、1997、Tokai-mura、Japan、p.431。

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は前記の「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

図 12 FARO の L-29、31、33 の実験装置

確認し、L-33では外部トリガーを加えて実験が行われた。

原審指摘の結果（高圧・飽和水試験、低圧サブクール試験のいずれにおいても水蒸気爆発は発生していない。）は、FARO試験において当初より想定されていた事実である。何故ならFARO試験は水蒸気爆発は発生しない状態における冷却挙動を調査する実験なのである。

なおその原審指摘事実についてさらに述べると、FARO試験については、12回の実験中、8回はサブクール度が0から2Kという極めて低サブクール水で行われている。水蒸気爆発発生に関するこれまでの知見では、水温が飽和温度もしくは飽和温度に近い低サブクール度の条件では、水蒸気爆発は起こらないということが多くの研究で明

らかにされている⁹。庄司・高木の実験によれば、大気圧下で行われたサブクール度20 K以下の条件では水蒸気爆発は全く発生しておらず、サブクール度が大きいほど爆発発生確率も発生圧力も大きくなる傾向がある。

その理由を説明すれば以下のようなになる。

低サブクール度の条件では高温溶融物を覆う膜沸騰蒸気膜内の水蒸気が凝縮しにくくなるためである。

すなわち、蒸気膜周囲の水温が飽和温度（サブクール度＝ゼロ度）では水蒸気は水に戻る（凝縮する）ことなく、蒸気膜あるいは蒸気泡のまま存在する。水温が低い場合（サブクール度がある場合）は、水温（サブクール度）に応じて凝縮する。急速に凝縮する場合は、凝縮パルスが発生する。巨大な水蒸気泡が凝縮するときは高い圧力値を発生し、周辺の水中を伝播していく。これが水蒸気爆発時の圧力パルスである。なお、審査ガイドにおいて検討すべきとされている圧力スパイクはこれと全く異なり、時間をかけて圧力が上昇する状態を指すもので、水蒸気爆発ではない。

上記二重構造の実験装置において、外部トリガーなしの自発的水蒸気爆発の発生の有無の確認のためにL-29、31、33の3回の実験が行われたが、これらは低圧、高サブクール度での試験である。このうちL-33は外部トリガーを与えている。FCI報告書（丙C-18）ではいずれも「水蒸気爆発」は「なし」として、FARO実験では、一切「爆発しない」としている。原審はそれを引用して、FA

⁹ 例えば、庄司・高木（水中落下溶融せずに生ずる小規模水蒸気爆発に関する実験的研究、日本機械学会論文集 B 編 48(433)1982-09、p.1771（[甲 C 1 5 1](#)）

R O 実験では一切「爆発しない」ことを前提事実としている。

しかし、L-33の実験結果に関する原著論文¹⁰では、タイトルで「ENERGETIC EVENT (激しい現象)」、本文中では「mild explosions (弱い爆発)」と、弱いながらも「爆発」していると記述している。さらに、2002年から開始された、過酷事故時の水蒸気爆発を対象としたS E R E N A計画では、T R O I 実験のT R O I-13 (核燃料溶融物使用) や、K T R O T O S 実験の44 (アルミナ使用) の結果とともに、F A R O 実験の番号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、実験結果との比較を行っている。これらのことから、F A R O 実験のL-33では水蒸気爆発が発生していると解される。

従って、低圧、高サブクール度の試験条件では、自発的水蒸気爆発は起こらなかった (L-29、31) が、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。

エ C O T E L S 試験

原審はこの実験を以下のように取り上げている。

二酸化ウラン・二酸化ジルコニウム混合物を用いた。溶融物の温度は3000～3100 Kと見積もられている。サブクール度が大きいケースも含めすべての試験で水蒸気爆発は発生していない (原判決572頁)。

¹⁰ ENERGETIC EVENT IN FUEL-COOLANT INTERACTION TEST FARO L-33
D. MAGALLON*, I. HUHTINIEMI

本試験は、名目上は、原子力発電技術機構（NUPEC）が実施した、UO₂混合物を用いた圧力容器外条件下での溶融物/冷却材相互作用（FCI）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）が行った試験とはいえない。

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と言わざるを得ない。

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3000～3100 K」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、21 k）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こらないこと、或いは、起こ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。

従って、外部トリガーを与えず8回の試験を行い、いずれも水蒸気爆発は発生していないが、水蒸気爆発が発生しないと思われる低サブクール度の試験結果は、想定通りの結果というだけのことである。

オ TROI 試験

原審はこの実験を以下のように取り上げている。

二酸化ジルコニウム、二酸化ウラン・二酸化ジルコニウム混合物等が用いられた。2600 K～3800 Kと高い溶融物温度条件で行わ

れた。なお、ケース 13 の熔融物温度が 2600 K となっているが、3500 K に達した後に噴出した大量のガスによる影響により低く計測された可能性が指摘されており、実際は 3500 K 程度以上であったと推測されている（丙 C 21）。また、ケース 14 については 3000 K とされているが、二つの温度計は 4000 K、3200 K と異なる温度を計測しており、計測の不確かさが大きいとされている（丙 C 21）。

二酸化ジルコニウムを用いた試験では外部トリガー無しで水蒸気爆発や圧カスパイクが発生した。二酸化ウラン・二酸化ジルコニウム混合物を用いた試験では、混合物の割合、水深及び混合物量等の条件を変えて実施したところ、幾つかのケースで水蒸気爆発が発生した。

水深 130 cm のケースでは、外部トリガーを与えない限り、水蒸気爆発は発生していない。（原判決 572～573 頁）

TRO I 試験では、二酸化ウラン混合物、トリガー無しで水蒸気爆発が発生している。TRO I 試験の熔融物温度はかなり高い、他の試験で想定しているような実機条件に近い熔融物温度では水蒸気爆発の可能性は十分小さい（原判決 574 頁）。

TRO I 試験では、水深 0.67 m で熔融物温度が高く過熱度が大きいケース 10（3800 K）、12（3800 K）で自発的水蒸気爆発が発生している。水深 1.3 m と深いケース 23（3600 K）では水蒸気爆発は発生していない。これは、熔融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、熔融物粒子が固化しやすいため、熔融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングを抑制したと考えられる。

ケース 25 はケース 10、12 と水深、粒子割合は同じだが熔融物温度が低く、水蒸気爆発は発生していない。過熱度が小さく粒子が固

化しやすいため、水蒸気爆発が抑制されたものとする（原判決 574 頁）。

実機条件では、ペデスタル注水対策により水深は 2.0 m 以上、熔融物温度は 2600 K 以下で水蒸気爆発が発生した TRO I 試験より十分低い。大規模な水蒸気爆発の可能性は十分小さい。（原判決 574 頁）

しかし、TRO I 試験は、原判決が行った「実機条件では大規模な水蒸気爆発の可能性は小さい」という評価をするための試験ではない。TRO I 試験は、韓国原子力研究所（KAERI）の FCI 実験装置を用いた試験であるが、TRO I 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（[甲 C 139](#)）。

その目的のために行われた試験結果は次のとおりである。

第一に、ケース 4、5、10、12、13、14、24、34～37、51 は、水蒸気爆発が発生している。そして、ケース 34～37、51 は外部トリガーが加えられているが、その余では外部トリガーは加えられていない。後記のように、トリガーには外部トリガー、自発的トリガーが何種類もあり、しかもそれらが全てのトリガーを網羅している訳ではないのであるから、34～37、51 のケースに加えられた外部トリガー以外の外部トリガー、自発的トリガー、不明なトリガーによる水蒸気爆発の有無は検証されていない。実験で用いた外部トリガーを加えなくても水蒸気爆発が発生しているということは、TRO I 試験で用いられた外部トリガー以外のトリガーによって水蒸気

爆発が発生することを想定することは可能である。TRO I 試験で用いたトリガーだけに限定して水蒸気爆発発生の可能性を論じて、実機条件では水蒸気爆発の可能性は十分に小さいという結論を導くのは暴論である。

第二に、TRO I 試験で水蒸気爆発が発生した熔融物温度が実機よりかなり高いので、実機では水蒸気爆発発生の可能性は小さいという結論も乱暴な評価に基づく強引な結論である。

ケース 13 は、外的要因による温度低下があり、温度計の測定値 2600 K とは言えないとしても、SERENA 計画では、ケース 13 の解析の際は、高温熔融物温度を～3300 K (約 3300 K) として解析するとしている ([甲 C 1 4 3](#))。

ケース 14 は I R C O N 社の測定器によれば、投入温度 3000 K で自発的な水蒸気爆発が発生している。

そして実機では 3000 K 程度の熔融物温度にはなりうるので、実機の熔融物が水蒸気爆発が発生する可能性はある。

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、熔融物温度を 2950 K の条件で行うように指示している ([甲 C 1 3 6](#))。この温度設定も考慮すれば、TRO I-14 の熔融物温度は、測定誤差を考慮すれば、十分に実機条件を満たしていると考えてよい。

また、原審は、水深が 2 m 以上だと水蒸気爆発は起こらないという結論を導き出しているが、TRO I 試験は水深 2 m 以上の条件で試験を行っていない。水深 130 cm のケースでは、ケース 21～23 は外部トリガーなしで水蒸気爆発が起きず、ケース 35、51 は外部トリガーを与えて水蒸気爆発が発生した。このケースに加えられた外部トリガーで水蒸気爆発が発生した事実、並びに、このケースで加えら

れた外部トリガー以外の外部トリガー、自発的トリガー、不明なトリガーによる水蒸気爆発の発生の有無は検証されていない事実からすれば、水深 2 m 以上だと水蒸気爆発は起こらないという結論は導き出せない。

カ S E R E N A 計画

原審はこの計画について以下のような判断を引用している。

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（丙 H 6 別紙 1・1 9 4～1 9 5 頁）。（原判決 5 7 3 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（[甲 C 1 5 6](#) 高島意見書 p 2 4）。

S E R E N A 計画は、フェーズ I とフェーズ II の 2 段階にわたって行われた¹¹。S E R E N A—I では実験は行われておらず、S E R E N A—II で初めて T R O I と K R O T O S の装置を用いてそれぞれ

¹¹ [Nuclear Energy Agency \(NEA\) - Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications \(SERENA\) Project \(oecd-nea.org\)](#)（[甲 C 1 5 2](#)）

6 回、計 12 回の外部トリガーを与えた実験を行ったに過ぎない。これらの 12 回という数少ない実験でかつ外部トリガーを与えた実験から、外部トリガーがない自発的な水蒸気爆発発生の有無の結論を導き出すことは不可能である。

これらの実験は、プロジェクト参加国及び機関の水蒸気爆発解析コードの不確定部分を減らし、計算結果のバラツキを小さくすることを目的に行われたものである。

実験は、爆発時のデータを得るために、すべて十分大きい外部トリガーを加えて強制的に爆発を発生させることを目指して行われている。トリガーの有無、大きさなどはここでは全く問題とされていない。

SERENA 計画では、むしろ、「どの程度の爆発が、どの程度の確率で起こるか」を、「解析コードによって精度をあげて、把握する」ことを目的にしたわけである。なお、結局、どの程度の爆発が、どの程度の確率で起こるかを把握できたとは言えず、SERENA 計画は、当初の目的を十分には達成できなかった。

フェーズ I では、既存の実験データ（ファロの L14、L28、L33、クロトスの K44 およびトロイの 13、34）を利用可能な計算コード（主に使用されたのは ①MC3D（developed by IRSN-CEA）、②JASMINE¹²（developed by JNES）、③JEMI-IDEMO（developed by IKE）、④TEXAS-V（developed by UW）、⑤TRACER-II（developed by KMU）である¹³。）に入力して、現実の原子炉圧力容器から流出して（メルト

¹² JASMINE コード…日本原子力研究開発機構(JAEA)で開発した水蒸気爆発解析コードで、JASMINE は、JAeri Simulator for Multiphase INteraction and Explosion の頭文字である。

¹³ NEA/CSNI/R(2014)15、OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions、February 2015.

スルー)、炉外で発生する水蒸気爆発の解析を行った。こうして各研究機関の計算コードの結果を比較することによって目的を達成することをめざした。

フェーズⅠ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¹⁴。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。

フェーズⅡ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。しかし、相変わらず、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¹⁵の発生する水蒸気爆発となるというものであった。

解析コードによる計算では、詳しい解析の条件は明記されていないが、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。なお、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 C 1 4 4)。すなわち、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

¹⁴ NEA/CSNI/R(2007)11、OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA Final Report - December 2006、p.8. (甲 C 1 4 3)

¹⁵ 力が作用した時間と、その力との積。力の大きさや方向が時間とともに変化する場合には、力を時間で積分した値。力積は力を受ける物体のその時間内での運動量の変化に等しい。

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。

(2) 各種試験から原審の結論を導くことはできない

原審は各種試験に関する一審被告の評価を前提事実として争点の対象から除いたうえで、「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、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は出来ないと判示している（原判決668、671頁）。

しかし、上記のとおり、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。

ALPHA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。

KROTOS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。

FARO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、溶融物の冷却挙動（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。

TROI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、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。

SERENA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。

フェーズⅠではこれまでの試験を整理、確認し、フェーズⅡで行われた実験は、各種の水蒸気爆発解析コードの不確定部分を減らし、計算結果のバラツキを小さくすることを目的に行われたものである。

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。

8 新たな検討を要する実験と知見

（１）従来の水蒸気爆発の研究からは説明ができない PULiMS 実験

規制委員会の共通認識は、サブクール度が小さいと水蒸気爆発は起こらない、熔融物が落下する格納容器内のプールの水深が浅いと激しい水蒸気爆発は起きないということであるが、これらの認識に反する PULiMS 実験¹⁶が存在する。浅い水深においても激しい水蒸気爆発は観察され、層状系¹⁷と呼ばれる系での水蒸気爆発の場合は特

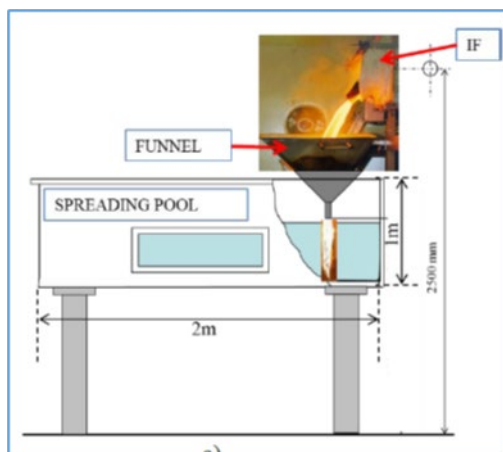
¹⁶ PULiMS は、Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading（熔融液体の注入と水面下の広がり）の頭文字をとったもの。

¹⁷ 高温熔融物のプールに冷却材が注入され、熔融物が水中でプール底面

に顕著である。

下記図に示したのは PULiMS 実験の装置図である。この実験は、スウェーデン王立工科大学 (KTH) で行われ、水蒸気爆発に関する知見を得ることを目的に行われた実験ではなく、高温の熔融炉心が水のプールに注入された後に、①熔融物がどのように広がるか、さらに、②熔融炉心が固化したあと、どのような形状となるか、そして、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に行われたものである。

図 13 PULiMS 実験の実験装置



(甲 C 1 4 3 p 3 より)

しかし、2014 年の P. Kudinov et al.¹⁸の報告 ([甲 C 1 4 2](#)) では、6 回の有効な実験のうち、層状系の自発的水蒸気爆発が、PULiMS 装置で 3 回、縦長の水槽の SES (Steam Explosion in Stratified

に広がるような、熔融物と水の接触モード。

¹⁸ A. Konovalenko, A. Karbojian, and P. Kudinov, Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction, NUTHOS-9, 2012, p.10。 (<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:678317/FULLTEXT01.pdf>)

melt-coolant configuration) 装置で 2 回、実に 5 回も発生している。

Table 1. Summary of PULiMS and SES exploratory tests conditions.

		PULiMS			SES		
		E3	E5	E6	E1	E2	E3
Melt							
Mixture	-	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃
Composition	%	eutectic	eutectic	eutectic	eutectic	eutectic	eutectic
Load mass	kg	78.1	41.2	78.1	41.27	34.40	41.27
Load liquid volume	L	10	6	10	6	5	6
Max melt temperature in the funnel	°C	1076	1531	1049	1402	1406	1420
Melt superheat in the funnel	°C	206	300	179	171	175	>189
Melt delivery							
Nozzle diameter	mm	20	20	20	20	20	30
Melt free fall height in air	mm	200	200	200	200	200	50
Water pool							
Dimensions (LxWxH)	m	2x1x0.2	2x1x0.2	2x1x0.2	1x1x0.2	1x1x0.2	1x1x0.22
Mass	kg	400	400	400	200	200	220
Temperature	°C	75	72	75	70	86	95
Subcooling	°C	25	28	25	30	14	5
Melt spreading							
Duration of release before explosion	sec	14.8	3.8	6.82	1.13	5.56	6.04
Diameter	cm	~75 – 80	~40 – 45	~40 – 45	~30 – 40	~40 – 43	43x43
Layer thickness	mm	~30	~30	~30	~5	~30	30
Steam explosion							
Steam explosion	-	yes	yes	yes	yes	yes	no

Table 2. Summary of the experimental results.

		PULiMS			SES	
		E3	E5	E6	E1	E2
Steam explosion						
Spontaneous steam explosion		yes	yes	yes	yes	yes
Number of explosive events		2*	2*	1	2	2
Peak force	kN	-	-	546	710	170
Impulse	kN·s	4.0 – 5.1	1.1 – 2.2	3.05	1.0	0.725
Duration of the impulse	ms	-	-	10	3	10 and 5
Melt mass at the time of the explosion	kg	~72	~15	19	7.5	12
Melt thermal energy	MJ	27 – 59	16 – 23	7 – 15	8 – 11	12 – 18
Projected area of accelerated water	m ²	0.5 – 0.44	0.28 – 0.13	0.28 – 0.13	0.19 – 0.07	0.16 – 0.13
Accelerated water mass	kg	83 – 73	47 – 21	47 – 21	24 – 14	34 – 23
Impulse per area	kPa·s	9 – 15	4 – 18	11 – 24	8 – 14	3.9 – 5.8
Peak pressure	MPa	-	-	1.9 – 4.3	5.7 – 10	0.6 – 1.4
Total released kinetic energy	kJ	163 – 302	26 – 233	100 – 224	21 – 37	7.7 – 11.3
Steam explosion conversion ratio	%	0.16 – 0.66	0.06 – 0.73	0.65 – 3.23	0.19 – 0.5	0.04 – 0.09
Bottom plate characteristics						
Thickness	mm	10	10	10	NA	NA
Thermal displacement upon spreading	mm	-	-	9.23	-	-
Max amplitude of oscillations	mm	-	-	1.5	no	no
Displacement upon steam explosion	mm	-	-	10	0.3	0.15
Max residual deformation	mm	60	25	35.9	-	-

*Indirect evidences, e.g. sound and video recording.

表 2 (甲 C 1 4 1 p 6 より)

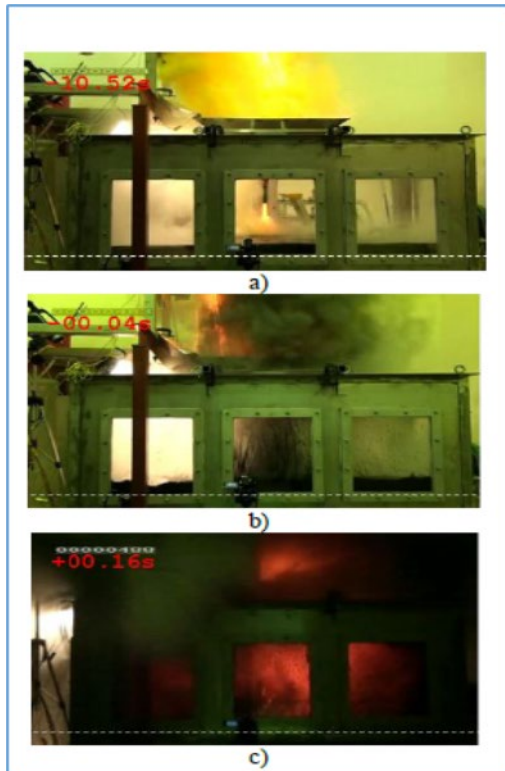
下記図はこのうち、3 回目の実験 (E3) の結果の高速度写真から代表的なコマを示したものである。(a)は水深 20 cm の水プールに溶融物が注がれている(爆発が発生する 10.52 秒前)状態を示す。(b)は爆発が発生する 0.04 秒前の不安定状態を示し、(c)では、自発的な水蒸気爆発発生から 0.16sec 後の様相を示したものである。

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。

そして、①25K 程度の低サブクール度¹⁹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、PULiMS 実験で観測された水蒸気爆発は、従来の水蒸気爆発の研究からは説明ができない事実が明らかになっている ([甲 C 1 4 1](#))。

¹⁹ サブクール度…飽和温度 T_s と実際の液温 T との差をサブクール度 ΔT_{sub} という。すなわち、 $\Delta T_{sub} = T_s - T$ である。例えば、大気圧下 75℃の水のサブクール度は 25℃である。

図 14 PULiMS 実験における水蒸気爆発



(2) 水蒸気爆発の発生機序の新知見

これまでの爆発モデルは、例えば、下記図のように熔融物ジェットから分離した粒子のみが爆発に関与するものとされており、水深が浅いほど爆発規模は小さくなるとされていた。また、従来、層状系では粗混合に関与できる高温液の量が少ないと考えられていたため、爆発が発生しても発生圧力などの大きさは小さいと考えられていた。

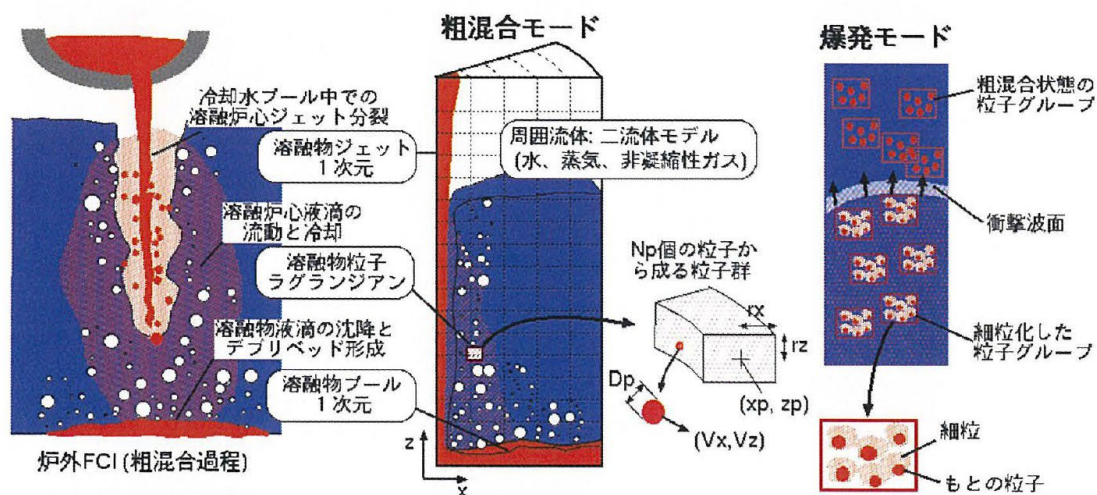


図 2 水蒸気爆発解析コード JASMINE v3.2 の概要 ¹³⁾

図 15 ([甲 C 3 9](#) p4 図 2 より)

しかし、PULiMS 実験の結果は、従来の水蒸気爆発の研究で得られている知見では説明できない。水蒸気爆発の研究は演繹的に予測できるほど進んでおらず、PULiMS 実験で用いた溶融物が、実機の溶融炉心と異なるから起こったものであるから考える必要がないとか、また原子炉事故時には、層状系での水蒸気爆発は起こらない等ということはできない。PULiMS 実験の結果は、水蒸気爆発の概念をより広くとることや、発生条件に関しても再考を求めるものである。

スウェーデンやフィンランドの BWR 型原発（フォルスマルク Forsmark 1 & 2、オルキルオト Olkiluoto 1 & 2²⁰、オスカーシャ

²⁰ オルキルオト原子力発電所（フィンランド語：Olkiluodon ydinvoimalaitos）は、フィンランドのオルキルオト島にある原子力発電所（スウェーデン ABB ASEA-ATOM 製 1 号機 1978 年 9 月運転 2 号機 1980 年 2 月運転）

ム Oskarshamn 3、Forsmark 3) では、DEFOR 実験²¹などの結果を通じて、深い水深（7～11m）による水張り方式を取っている。その方が溶融物が水中を降下中に表面が冷えて固化するため、たとえ膜沸騰蒸気膜が崩壊しても液—液の接触が起こらず爆発しにくいという考え方に基づく独自の対策である。しかしながら、溶融炉心表面が固化する前にトリガーが生じれば大規模な水蒸気爆発にいたるリスクがあり、危険なことには変わらない。

9 様々なトリガーがある

（１）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

一審被告は「大規模実験の条件と実機条件とを比較した上で、実機においては、液—液直接接触が生じるような外乱となり得る要素は考えにくい」(丙H6 245頁)という設置変更許可申請をし、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668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。また、外部トリガーではない自発的トリガーに関する知見も不十分なうえに、

²¹ DEFOR 実験…DEFOR は、Debris Bed Formation（デブリベッド形成）。スウェーデン王立工科大学(KTH)で実施された、模擬溶融物が水プールに投入された際のデブリベッドの形成過程を解明することを目的とした実験のこと。

設置変更許可申請及び原審では自発的トリガーの検討は行われていない。水蒸気爆発の研究は、1950年代の後半から始められて、現在も実験的解析的研究が行われている。しかしながら、トリガーの種類について合意がなされたとは報告されていない。高島意見書では、これまでの実験を総覧してトリガーを分類し、その多様性を明らかにし、分類の結果を以下にまとめた。

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、溶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(ベーストリガー)	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. 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、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

([甲C156](#) 高島意見書 p 33より)

トリガーは、大きく A. 自発的トリガー、B. 外部トリガーに分類される。A、B について、さらに熱的要因によるものと力学的要因によるもの

のとに分けることが出来、各マトリクスとも複数の要因が考えられる。
さらに、原発事故の際には、ここで取り上げた以外の想定外のトリガーがないとは言えない。

以下に、上記分類中のトリガーの例を示す。

(2) 自発的トリガー

ア 熱的要因の例—1 A 1 (熔融物温度低下に伴う水蒸気凝縮)

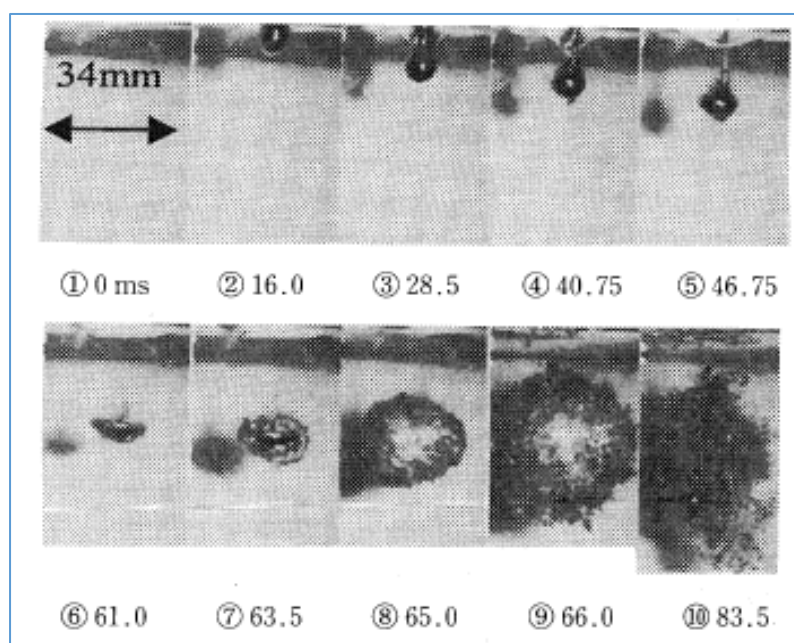


図 16 自発的トリガーによる爆発例

熔融スズなど低融点金属を用いた水蒸気爆発実験のトリガーはこの機構による（高島の研究²²⁾。

図 16 は、常温の水中のスズ液滴が自発的に蒸気爆発するときの写真である。①の、熔融金属液滴が水面に到達した時間を 0ms として

²²⁾ 高島武雄、液滴規模の自発的蒸気爆発の開始段階の観察、日本機械学会論文集 B 編、2007 年 73 巻 728 号 p. 185 ([甲 C 1 5 3](#))。

いる。金属液滴が蒸気膜に包まれたまま水中を沈下していく（②～④）。⑤～⑥の写真によると、液滴が横方向に広がるように変形（水の抵抗で変形）しながら液滴底部か笠状液滴の縁で蒸気膜の一部が崩壊し始め（トリガー）、水と高温液が接触して急激に水蒸気になり水蒸気爆発が開始していることが見て取れる。

冷水中を沈下する溶融物先端（底部や縁部）の蒸気膜が薄くなって熱伝達率が大きくなり、溶融物先端の温度が低下し、蒸気膜の維持ができなくなったこと、そもそも、蒸気膜の厚さは薄く、しかも不安定で瞬時に凝縮して蒸気膜の維持が出来なくなったことが推定される。

イ 力学的要因の例ー2A1（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）

- ① テーラー不安定(Taylor instability)あるいはレイリー・テーラー不安定 (Rayleigh-Taylor instability)

蒸気膜のような密度の小さい流体(図 17 では vapor=蒸気)の上に水などの、より密度の大きい流体(図 17 では Liquid=液体)があり、垂直方向（y 方向）に加速度（重力 g など）が作用するとき、この加速度に起因する力によって界面が波打つ不安定現象である。

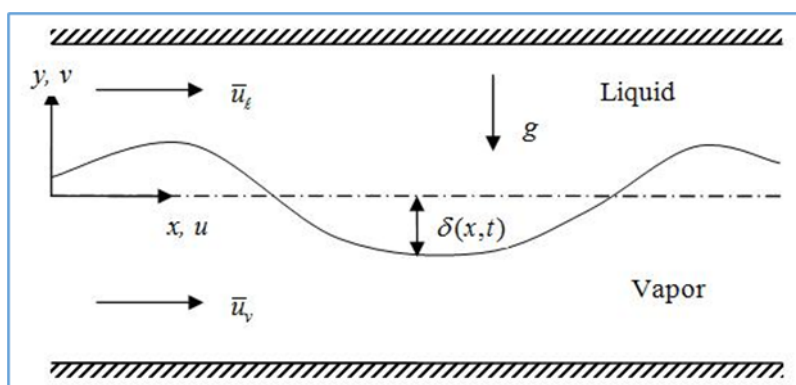


図 17 テーラー不安定

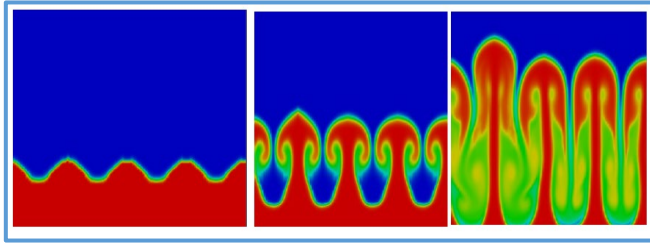


図 18 蒸気膜上の水、水の上の溶融金属などの界面

蒸気膜が緑色の層、水が青い色の部分、高温溶融物が赤色の部分とすると、界面の不安定が大きくなると、水と高温溶融物が接触したり、水が溶融物に取り込まれたりすることで、水が急蒸発してトリガーになり得ることが考えられる。

② ケルビン・ヘルムホルツ不安定性 (Kelvin-Helmholtz instability)。

密度の異なる流体が、お互いに異なる速度で他の流体層と並行に運動するときに発生する不安定現象である。図 19 が説明図である。

高温融体がジェットとなって水に流入するとき、両者の速度差によって、界面が不安定化されて波打つ。不安定が大きくなると、水と高温融体が接触したり、融体が変形して水を取り込んだりする。

この説明をさらに図式化すると、図 20 のように、蒸気膜を緑、赤い部分を高温融体、青い部分を水とすると、高温融体がジェットとなって水に流入するとき、両者の速度差によって、

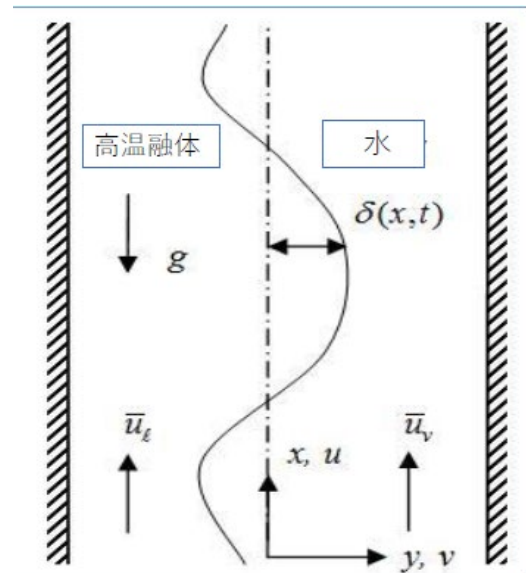


図 19 ケルビン・ヘルムホルツ不安定

界面が不安定化されて波打つ。不安定が大きくなると、水と高温融体が接触したり、融体が変形して水を取り込んだりする。その結果、ジェットの部分で爆発がトリガーされることもあると考えられる。

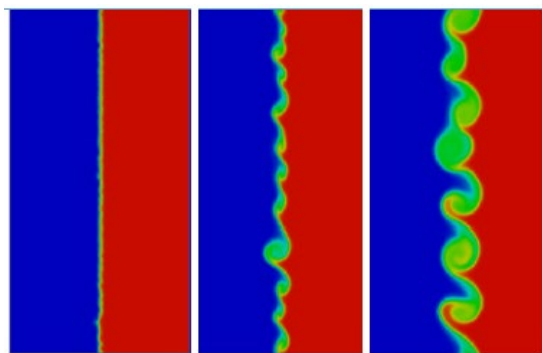


図 20 高温融体がジェットとなって
水に流入する模式図

図 2 1 のように実機事故時に、例えば高温液体（青色部分）が低温液（黄色部分）に流入する状況では、両液体の界面は、2 流体間の界面に生じる 2 種類の不安定現象のため、両液体が細粒化を伴いながら混合する複雑な形状と

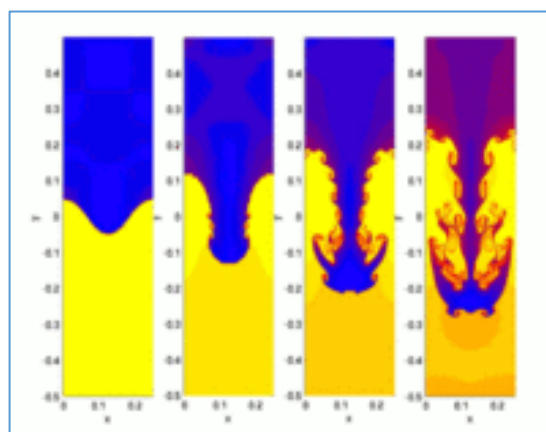


図 21 熔融液体の水突入時シミュレーション

なり、少量の低温液が高温液に取り込まれることが起こり得る。その結果、やはり低温液は急蒸発を生じて水蒸気爆発のトリガーとなり得る。

2018 年 7 月の西日本豪雨の際に、アルミニウム溶解炉に洪水の水が流入して発生したと考えられる岡山県総社市アルミニウム溶解工場で起きた水蒸気爆発事故のトリガーは、このような 2 流体間の 2 種類のどちらかの不安定現象がトリガーとなって発生したものと推定される。

(3) 外的トリガー

ア 熱的要因の例—1B3 (低温液強制注入)

高温の熔融物に注射器と同様の構造の装置の金属製細管によって外部から水を注入することによって水蒸気爆発をトリガーさせる実験が、Armstrong et al.²³によって行われた。図 22 に実験装置の構造を示す。下部の荷重計の上のるつぼに熔融塩や UO_2 を入れ、中央の誘導コイルで巻かれた四角柱を下部の荷重計の上のるつぼにはめ込む。そして誘導コイルによって外部から加熱して $1000^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ にして、

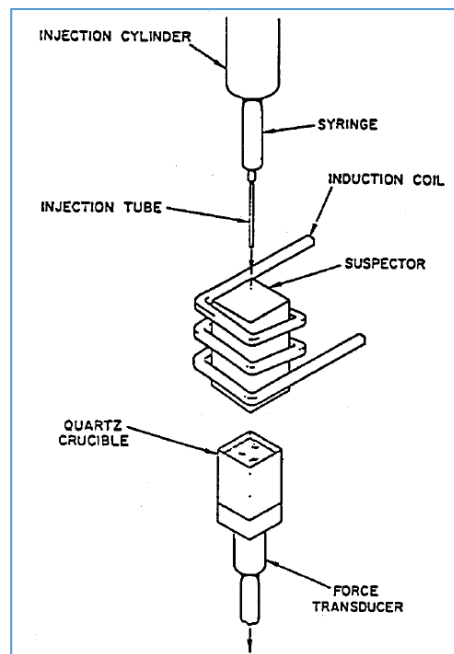


図 22 外発的トリガー例 (水注入)

るつぼ内の熔融塩や UO_2 を融解後、その上部から金属細管を熔融塩や UO_2 液面下に差し込んで少量の水やナトリウムをガス圧で注入してトリガーとするものである。本実験では、非常に激しい爆発現象の発生が報告されている。

²³ Armstrong, D.R., Goldfuss, G.T., and Gebner, R.H., Explosive Interaction of Molten UO_2 and Liquid Sodiumu, ANL/RAS 75-4, Argonne Natl.Lab.(1975)。

イ 力学的要因の例ー2B2（異物の侵入）

700℃～800℃に加熱融解した熔融塩（硝酸リチウム LiNO_3 ）の液滴と、エタノールによる飯田ら²⁴の実験では、エタノール中に設置した多

数の金属針の上に、膜沸騰中の液滴を接触・一部貫通させることをトリガーとして、蒸気爆発を発生させた。高温熔融物にとっては、金属針と言う異物が侵入してきた事態になる。

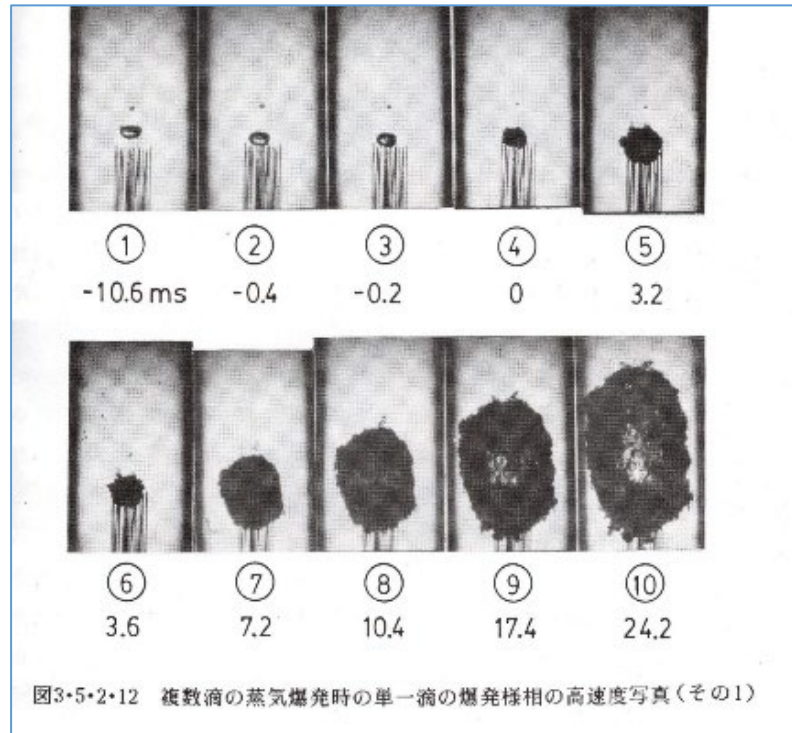


図 23 異物の侵入によるトリガー

図 2 3 は、エタノール中を沈降する高温の熔融塩液滴が異物である針に接触してトリガーされるときの高速度写真である²⁵。

④で液滴の蒸気膜が崩壊しており、このことがトリガーとなって、蒸気爆発に至る過程が確認できる。

²⁴ 飯田嘉宏・高島武雄・秋吉亮、高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究（第1報、単一滴による実験）、日本機械学会論文集B編、1986年52巻476号 pp. 1777-1783。

²⁵ 高島武雄、蒸発を伴う液液直接接触伝熱現象に関する研究、博士論文(1990年)、p.241。

(4) 一審被告及び原審のトリガーの考察は不足している

以上のように、様々なトリガーが考えられる。

例えば、高温溶融物が水中に落下する際に、テラー不安定現象による自発的トリガーが発生して水蒸気爆発に至る場合も考えられる。機器の一部が異物としての外的トリガーとなり水蒸気爆発に至ることも考えられる。

「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、あまりにも恣意的な判断である。

水素爆発は起きないと言い切っていた班目原子力安全委員会委員長が、水素爆発の発生を目の当たりにして頭を抱えた事態を二度と起きないようにすることが福島第一原発事故の大事な教訓である。条件を限定して水蒸気爆発は起きない筈だという結論を容認することは、この教訓を踏まえたものではない。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、そのような考察が水蒸気爆発の理解として不十分であることは明らかである。

10 水蒸気爆発に係る知見の現状と必要な対策

(1) 水蒸気爆発に係る知見と対策

現在の水蒸気爆発に関する異論のない知見を整理すると以下のようになる。

高温の液体（熔融物）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、水深が浅くても熔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。ただし、高サブクール度では水蒸気爆発は起こりやすい傾向があることは否定できない。

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を考えれば、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。

（２）日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究

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熔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。

（３）東海第二原発で必要な対策

本件東海第二原発では、ペデスタル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デスタル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、本件ペデスタル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、水蒸気爆発が発生する可能性が高い。

水蒸気爆発でペデスタル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。また、ペデスタルのコンクリート部を破壊するに至れば、高温溶融物はさらに下に落下する。本件炉型では格納容器下部に大量の水がたたえられているから、ペデスタル底部が貫通し、溶融物がペデスタル下にたたえられた水槽に落下すれば、大きな水蒸気爆発が発生することも考えられる。

そのような事態を想定して、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ない、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か不十分である。

1 1 水蒸気爆発に対する最新の科学技術水準

（１）コアキャッチャーによる水蒸気爆発防止

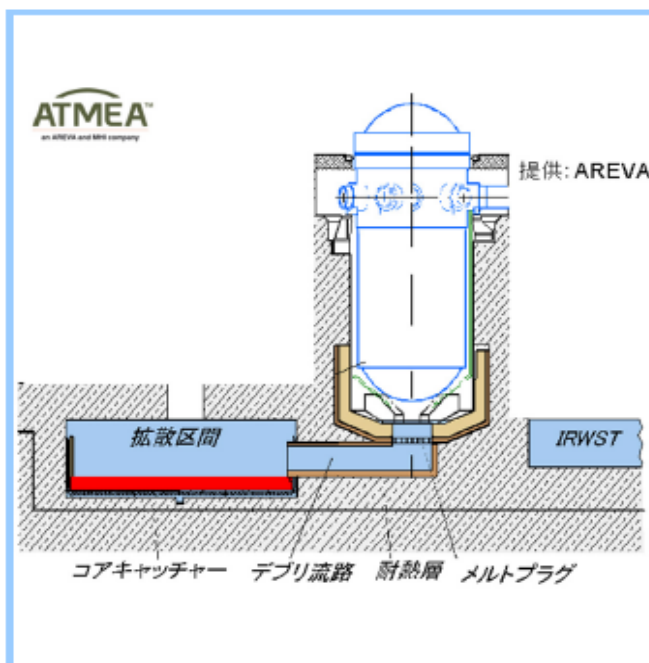
水蒸気爆発対策は、原発の構造に依存する。原発推進の国際機関で

ある国際原子力機関(IAEA)が 2016 年に公表したレポート²⁶では、大規模水蒸気爆発 (LARGE STEAM EXPLOSION) について、以下のように記述している。

「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」(高島訳 原文: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.)

水蒸気爆発に対するドライ型コアキャッチャーによる対策が望ましい

ことを示唆するものである。



国別では、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)²⁷を要求してい

図 24 コアキャッチャーの概念図

²⁶ IAEA-TECDOC-1791、 CONSIDERATIONS ON THE APPLICATION OF THE IAEA SAFETY REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS、 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY、 VIENNA、 2016、 p.61 ([甲 C 1 5 4](#))。

²⁷ NRC SECY-93-087

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.)

装置の具体名は記していないが、コアキャッチャーの設置を要求している。

(2) 日本の次期原子炉の水蒸気爆発対策

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」²⁸するとしている。

²⁸ 佐藤拓(関西電力)、日本原子力学会 原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」WG 「次期軽水炉の技術要件に関するシンポジウム」

The diagram illustrates the components and flow of a secondary light water reactor. Key parts include:

- 原子炉格納容器 (Reactor Vessel):** The central vessel where the nuclear reaction occurs.
- 格納容器スプレイ (Vessel Spray):** A spray system at the top of the vessel.
- 再循環ユニット (気相冷却炉) (Recirculation Unit (Gas Phase Cooler)):** A unit for recirculating the coolant.
- タービンへ隔離弁 (Isolation Valve to Turbine):** A valve connecting the primary loop to the turbine.
- 遠がし弁 (Remote Control Valve):** A valve for remote control.
- 復水器 (Condenser):** A heat exchanger that cools the steam from the turbine.
- 補助給水ピストン (Auxiliary Feedwater Piston):** A device for auxiliary feedwater.
- 補助給水ポンプ (Auxiliary Feedwater Pump):** A pump for auxiliary feedwater.
- 高圧タンク (High Pressure Tank):** A tank to maintain high pressure in the system.
- 冷却器 (Cooler):** A device for cooling the system.
- スプレイポンプ (Spray Pump):** A pump for the spray system.
- 高圧ポンプ (High Pressure Pump):** A pump to circulate the coolant at high pressure.
- ほう酸注入設備 (Boric Acid Injection Equipment):** Equipment for injecting boric acid to control reactivity.
- 代替スプレイポンプ (Replacement Spray Pump):** A backup spray pump.
- 再循環ユニット注水ポンプ (Recirculation Unit Feedwater Pump):** A pump for the recirculation unit.
- 代替炉心注水ポンプ (Replacement Core Feedwater Pump):** A backup core feedwater pump.
- コアキャッチャー (Core Catcher):** A device to catch the core in case of an accident.
- 溶融炉心 (Molten Core):** The core of the reactor.
- 燃料取替用ピストン (Fuel Replacement Piston):** A device for replacing fuel.
- ポンプ (Pump):** A general pump for the system.
- 海水 (Seawater):** The source of water for the system.

コアキャッチャーの設置も検討していることを報告している（[甲 E 2 7・28](#)）。

ム」 ～より安全・合理的な設計を目指して～ 「次期軽水炉の技術要件検討」WG 活動報告（1）次期軽水炉の技術要件を議論する上での論点、2020.11.25。（[PPT \(aesj.or.jp\)](https://aesj.or.jp)）

(www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/symposium2020/lec2.pdf)

1 2 ま と め

新規制基準は、水蒸気爆発の可能性は極めて低いことを示すことをもって水蒸気爆発対策としている。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、それら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。

以上