

意見書

2025年4月3日

東京高等裁判所 御 中

題目：東海第二原発の水蒸気爆発対策の問題点について

住所 〒236-0033 横浜市金沢区東朝比奈 2-40-13

氏名 高島 武雄



目次

1. はじめに	4
2. 原発の潜在的危険性	7
3. 日本原電の水蒸気爆発発生に関する主張の批判と反論性	8
3.1 日本原電の主張の主たる根拠	8
3.2 ファロ (FARO) とクロトス(KROTOS), コテルス(COTELS)実験について	10
3.3 トロイ(TROI)実験について	17
3.3.1 トロイ(TROI)-13 の温度測定について	17
3.3.2 トロイ(TROI)-14 の温度測定について	19
3.3.3 日本原電のトロイ(TROI)-13,14 の温度測定解釈の誤り	20
3.4 層状系での水蒸気爆発	21
3.5 セレナ (SERENA) 計画について –その実施と結果–	24
3.5.1 実施主体	24
3.5.2 実施に至った経緯	24
3.5.3 セレナ (SERENA) 計画の目的	25
3.5.4 セレナ (SERENA) 計画の実施手法	26
3.5.5 セレナ (SERENA) 計画で得られた結果	27
3.6 アルファ (ALPHA) 実験とジャスミン (JASIMINE) コードの関係	29
4. 規制委員会の審査とセレナ (SERENA) 報告書の扱い	31
5. 水蒸気爆発におけるトリガーの重要性	33
5.1 トリガーの分類	33
5.2 自発的トリガーの説明	34
5.2.1 自発的トリガーのうちの熱的要因の説明	34
5.2.2 自発的トリガーのうちの力学的要因の説明	36
5.3 外的トリガーの説明	37
5.3.1 外的トリガーのうちの熱的要因の説明	37
5.3.2 外的トリガーのうちの力学的要因の説明	38
5.4 実機で考えられるトリガー	40
6. 原発のシビアアクシデント対策	41
6.1 過酷事故対策としての水蒸気爆発対策	41
6.2 水蒸気爆発対策の有効性	43

6.3 東海第二原子力発電所の水蒸気爆発対策.....	43
7. 水蒸気爆発対策の海外の対応.....	44
8. 次期原子炉の水蒸気爆発対策.....	45
9. おわりに	46
経歴.....	48

1. はじめに

水蒸気爆発（蒸気爆発ともいう）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、拙著¹から概念図を示す。

図1の(a)では、水に代表される低温液体のプールに、熔融金属や熔融炉心などの高温液体が落下する。(b)では、高温液体の1部分は、水中では液滴となってバラバラに細くなる。残りは、水槽底部に沈んでいく。バラバラとなった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）では、なんらかの原因で膜沸騰蒸気膜が1か所で壊れると、両液体の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気が発生する。この段階を**トリガーリング過程**という。

発生した水蒸気泡は、急成長し周囲の水を押して圧力波を形成する。この圧力波は瞬時に水中を伝播して、周囲の蒸気膜を破壊し、自発核生成による斉時的な（「コヒーレントな(coherent)」などともいう）水蒸気生成を行うことで水槽などの周囲構造物を破壊する。その結果（d）に示したような大規模な爆発となる。(c)から(d)の過程を、**伝播拡大過程**と呼ぶ。

伝播拡大過程は、2001年11月12日に起きた、「スーパーカミオカンデの光センサー破損」事故とよく似ている。この事故では、1個の高電子増倍管の破損によって、実に6000個以上の光電子増倍管が破損した。その破損のメカニズムは、高エネルギー加速器研究機構の「衝撃の光センサー破損事故」²の説明によれば、「光電子増倍管は大きな電球のようなガラス球であり、ガラス管の内部は真空になっています。最初の光電子増倍管が交換作業の際に受けたストレスなどの原因により一瞬にして水圧により破壊され、そのために衝撃波が発生し、次々と隣の光電子増倍管を連鎖的に破壊しました」となっている。まさに、粗混合状態の1個の粒子の蒸気膜の崩壊によって発生した圧力波が、周囲の

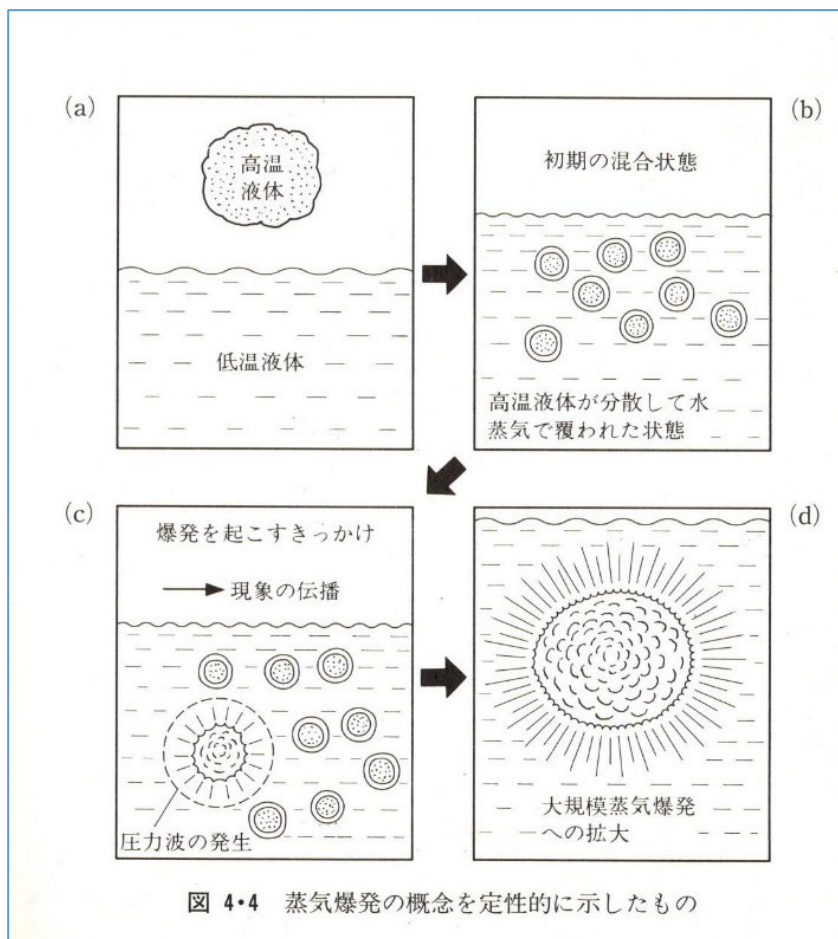


図1 水蒸気爆発の概念図

¹高島武雄・飯田嘉宏、蒸気爆発の科学、裳華房1998年、p.51.

²<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2002/janfeb/k2k.html>

粒子の蒸気膜を連鎖的に破壊し、圧力値を増大させながら伝播拡大して周囲の構造物を破壊する水蒸気爆発とそっくりである。事故については、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の動画チャンネル（JST Channel）の動画³、「【WLP】失敗に学ぶ-泡が機械を破壊「スーパーカミオカンデの増倍管破損」」でも分かりやすく解説されている。

原子力発電所では、冷却材喪失事故（過酷事故）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）で水蒸気爆発の発生が懸念されており、原子力規制委員会でも対策を要求している。

東海第二発電所の運転差止裁判においても、過酷事故時の水蒸気爆発発生の有無と、発生時の爆発の大きさの評価が、争点の一つとなっている。日本原電は、「溶融燃料—冷却材相互作用（FCI）に関する実験研究として行われた、ALPHA 試験、KROTOS 試験、FARO 試験、COTELS 試験、TROI 試験及び SERENA 試験を踏まえて、本件発電所の実機においては、格納容器の損傷に至る大規模な圧力容器外の水蒸気爆発の可能性は十分に小さいと考えられると評価」⁴している。

ここで上記の試験について簡単に説明しておく。

○ALPHA 試験…アルファ試験. ALPHA は Assessment of Loads and Performance of containment in a Hypothetical Accident（高島訳：仮想事故時の格納容器にかかる負荷と封じ込め性能の評価）を表わし、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装置である。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）に設置された。

ALPHA 計画の 1991 年度～1995 年度の年次計画においては、「シビアアクシデント時の格納容器等の健全性に関する研究」が計画されている。このうち、格納容器の健全性に脅威となりうる現象としては、溶融炉心コンクリート相互作用試験と溶融炉心冷却材相互作用試験、それに、リーク定量化試験とエアロゾル挙動試験が実施された⁵。本意見書では、最初に 1991 年度から実施された溶融炉心冷却材相互作用試験についてのみ言及する。

○KROTOS 試験…クロトス試験. JRC-ISPRA が実施した FCI のうち、粗混合、トリガリング、伝播、膨張過程のモデル化を支援するための実験装置。

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、ISPRA は JRC の所在地で、イタリア北部の町名である。

○FARO 試験…ファロ試験. JRC-ISPRA が実施した FCI のうち、混合および急冷挙動（クエンチング）に関するデータを提供するように設計された実験装置である。

○COTELS 試験…コテルス試験. 旧原子力発電技術機構（NUPEC）が実施した、 UO_2 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。実質は出向した東芝社員が計画実施したものの。

³https://www.youtube.com/watch?v=2dXd_g9ZthM

⁴日本原電準備書面（10）, pp.253-254（2019年1月31日）

⁵山野憲洋・ほか7名、事故時格納容器挙動試験（ALPHA）—装置設計報告書—, JAERI-Tech 98-019, P.3.

○ TROI 試験…トロイ試験. 韓国原子力研究所 (KAERI) の FCI 実験装置. 「压力容器外水蒸気爆発の安全性の問題を解決, 過酷事故管理 (SAM) 戦略の提案と FCI 研究のテーマの一つである、水蒸気爆発に対する材料特性の影響の理解」をめざしている.

○ SERENA 計画…セレナ計画. OECD が FARO, KROTOS, TROI の各実験結果を複数の計算コードによって解析し, 比較検討した国際プロジェクト. SERENA とは Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications (訳: 原子力発電所 (核エネルギー応用施設) における水蒸気爆発の解明) のことで, 具体的には原発における事故時の水蒸気爆発現象の爆発の大きさ, エネルギー変換率の把握を目的にしたものである.

なお, 日本原電は, 水蒸気爆発に関する国際プロジェクトであるセレナ (SERENA) 計画に関する報告書で, “OECD/SERENA Integrated Report 2014” なる文書に, 「自発的水蒸気爆発は発生しないこと確認した」という記述があるとしている⁶. しかし, 著者が調査した範囲では, セレナ (SERENA) 計画に関する OECD 発行の上記文書の存在が確認できなかった. 公式の報告書は, 以下の4件である.

SERENA Report 4 件

(1) NEA/CSNI/R(2004)7, SERENA Phase 1 TASK 1 FINAL REPORT
IDENTIFICATION OF RELEVANT CONDITIONS AND EXPERIMENTS FOR FUEL-COOLANT INTERACTIONS IN NUCLEAR POWER PLANTS, 12-Mar-2004. (訳: 核燃料プラント (原子力発電所) における燃料-冷却材相互作用に関する条件と実験の特定)

(2) NEA/CSNI/R(2007)11, OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA, Final Report - December 2006/17-Sep-2007. (訳: 核燃料施設 (原子力応用施設) のための燃料・冷却材相互作用である水蒸気爆発解析に関する OECD 研究プログラム-セレナ)

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

(4) NEA/CSNI/R(2017)15, Status Report on Ex-Vessel Steam Explosion, March 2018.

このうち「2014」とあるのは (3) の「OECD/SERENA Project Report, Summary and conclusions, NEA/CSNI/R(2014)15. (2015)」のみである. 日本原電が指摘した “OECD/SERENA Integrated Report 2014” は, おそらく, 公表されていない文書と思われる. 日本原電は, この文書の存在を前提にして, 「自発的水蒸気爆発は発生しないこと」を主張するのであれば, それを提示すべきである.

後述するように, セレナ (SERENA) プロジェクトの目的は, 「水蒸気爆発の発生の有無を実験的に調べることではない」⁷. 自発的爆発発生の有無には触れていない. セレナ (SERENA) プロジェクト

⁶ 丙 C 第 72 号証…規制委員会のパブリックコメントに対する回答 (考え方)

⁷ SERENA 計画の TASK 1 FINAL REPORT Identification of Relevant Conditions and Experiments for FCI in NPP's, NEA/CSNI/R(2004)7 の 4 ページでは, SERENA プロジェクトの目的については, The overall objective of SERENA is to obtain convergence on the understanding of FCI processes and energetics, as well as on method(s) for reliable estimate of the magnitude of loadings for realistic reactor conditions, in order to bring understanding and predictability of FCI energetics to desirable levels for risk management. (訳: セレナの全体的な目的は, FCI プロセスと爆発の大きさの理解についての見解の合意を得ることであり, 同様に, 現実的な原子炉の運転状態での負荷の大きさの信頼できる見積もりについても収斂させることである. それは, リスク管理の上で望ましいレベルでの, FCI の大きさ (エネルギー変換率) の理解と予測をもたらすためである) とある.

トのフェーズ1とフェーズ2のなかで、実験が行われたのは、フェーズ2で、2種類の実験装置を用いて各6回、合計12回にすぎない。しかも、すべての実験で外部トリガーを与えて行っている。したがって、セレナ（SERENA）プロジェクトの実験から、「外部トリガーを伴わない自発的な水蒸気爆発は生じていないことが確認されている」⁸などと言う結論は導き出すことはできない。日本原電は、この点も含めて、セレナ（SERENA）プロジェクトの理解が間違っている。

本意見書では、日本原電が主張する「水蒸気爆発が発生するためには、トリガリングが働く必要がある」⁹ことは事実と考える。しかし、「実機条件では、このようなトリガー装置で発生させているような圧力外乱となる要因は考えられない」¹⁰という日本原電の主張には同意しかねる。このことを検証するために、これまで報告されているトリガーについて分類し、それぞれについて解説を加えた。トリガーに関しては、1950年代の後半から長年にわたって水蒸気爆発の研究が行われて、多様な機構が確認されているにもかかわらず、その分類すら行われていないのが現状である。“Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology.”(2012)（『軽水炉における原子力安全：過酷事故現象論』エルゼビア社2012）¹¹の編者である B.R. Sehgal は、別のレビュー¹²で “Triggering is a complex process which is poorly understand.”（訳：トリガリングは、最も理解されていない複雑な過程である）と述べている。

本意見書では、水蒸気爆発について説明して、東海第二原発の水蒸気爆発対策の問題点について意見を記述する。

2. 原発の潜在的危険性

過酷事故（シビアアクシデント severe accident：SA ともいう）後の惨状は、チェルノブイリ事故や、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、供給電力が停止することによって、③の循環が停止する状態を招くことがあり、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。

水蒸気爆発は、格納容器の破損をもたらし恐れがある。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か、発生しても放射性物質が環境に放出されないような対策が求められる。

⁸被告準備書面(10), p.257.

⁹東北電力株式会社ほか、重大事故対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第5部 MAAP）添付2 熔融炉心と冷却材の相互作用について、2015年10月, p.5-2-1

¹⁰同上 p. 5-2-7

¹¹本書の発行は、EUの行政府に相当する欧州委員会の研究項目プログラムのなかの SARNET(Severe Accident Network)にサポートを受けたものである。

¹²B.R. Sehgal, H.O.Haraldsson and Z.L.Yang., A Review of Steam Explosions with Special Emphasis on the Swedish and Finnish BWRs, SKI Report 02:16, p.12.(2002)
(<https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20273627>)

1986年4月26日に、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）が事故を起した。図2に

RBMK型原発の基本構成を示した

¹³。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とみられ」¹⁴ている。この爆発については、溶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¹⁵という見方もある。

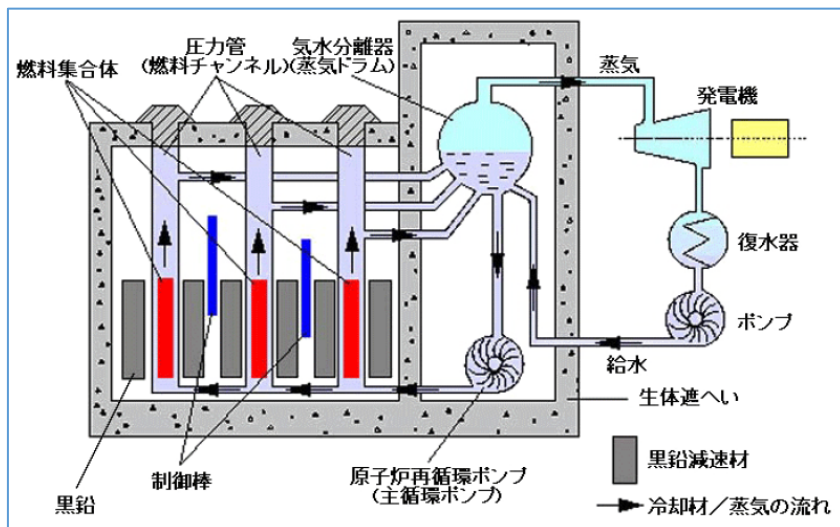


図2 RBMK型原発の基本構成

3. 日本原電の水蒸気爆発発生に関する主張の批判と反論

3.1 日本原電の主張の主たる根拠

日本原電は、MAAP（マープ）コード¹⁶による解析を行った結果、「実機条件では水蒸気爆発は起こらない」と主張する¹⁷。その主たる根拠は、①外部からの強制的なトリガーを与えない場合には水蒸気爆発は発生せず、事故時にはそのような外部トリガーが存在しない、②事故時の溶融物に相当する溶融物を用いた実験において、トロイ（TROI）実験の何回かを除き、ファロ（FARO）とクロトス（KROTOS）、コテルス（COTELS）実験で自発的な水蒸気爆発が観察されなかったことである。

しかし、①に関しては、外部トリガーを与えなくともトロイ（TROI）実験で明らかなように、自発的な爆発も発生している。後述するように、トリガーは圧力波だけでなく、A.自発的トリガー、B.外部トリガーがあり、それぞれ複数の要因が考えられる。原発事故の際には外部トリガーが存在しないと断定することはできない。また、原電がトリガー源とする圧力波に関して、圧力値だけでなく、圧力波の急峻さ（立ち上がり速度）などもトリガーの要素であり、圧力波の大きさだけで外部トリガーが定まるものではない。

¹³ 原子力百科事典 ATOMICA(https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-01-01-04.html)

¹⁴ 原子力百科事典 ATOMICA (https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-04-11.html)

¹⁵ 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—失敗百選 (<https://www.shippai.org/fkd/hf/HA0000644.pdf>)

¹⁶ MAAP…MAAP（Modular Accident Analysis Program）コードは、米国電力研究所（EPRI）が所有するシビアアクシデント解析コードである。

¹⁷ 東北電力株式会社ほか、重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第5部 MAAP）添付2 熔融炉心と冷却材の相互作用について、2015年10月、p.5-2-1 および p.5-2-37。

②に関しては、トロイ（TROI）実験において、 UO_2 試料（トロイ(TROI)-12, 13, 14），ジルコニア試料（トロイ(TROI)-4, 15, 24)などで、高い確率で自発的水蒸気爆発が発生している。日本原電は、 UO_2 試料の実験トロイ(TROI)-13, 14の結果については、(1)温度測定値の確度の問題と、(2)高過熱度での条件による爆発発生であることを理由に、実機での条件とは異なるとして、その重要性を無視している。(1)のトロイ（TROI）-13,14の温度測定については後述する。(2)については、水蒸気爆発の発生においては、膜沸騰蒸気膜の崩壊時に、高温液が液体状態でなければならないことから、数十度程度の過熱度は水蒸気爆発の発生に必須の条件の一つであると理解されている。日本原電の反論では、実機と実験の過熱度の違いを主張するにもかかわらず、必要とされる過熱度の定量的な比較・検討がなされていない。例えば、事故時の炉心溶融に、圧力容器の鋼鉄や構造物のステンレス鋼が加わるなどして、溶融物の組成が変わり、融点が低下して過熱度は上昇することもありうる。実機条件では過熱度をコントロールすることはできない。

このように①、②も事故時の水蒸気爆発の発生を否定する決め手とすることはできないと考える。

日本原電は、水蒸気爆発を MAAP コードに関する文書で考察しているが、そもそも、「FCIにともなう水蒸気爆発については、MAAPではモデル化されていない」¹⁸⁾ので水蒸気爆発のような複雑な現象はおろか、事故時の圧力容器内の圧力変動すら解析はできない。「水蒸気爆発は起こらない」ということが前提のため、水蒸気爆発現象を解析する意志がないことを示している。

MAAP コードを用いた解析例としては、東京電力が福島第一原発事故時の2号機の圧力変化を解析したものなどがある。図3は、福島第一原発2号機の3月11日の12時から3月18日の12時までの圧力容器の圧力変化の計測値（オレンジ色の○印）とMAAPによる解析結果（黒い実線）を示したものである¹⁹⁾。

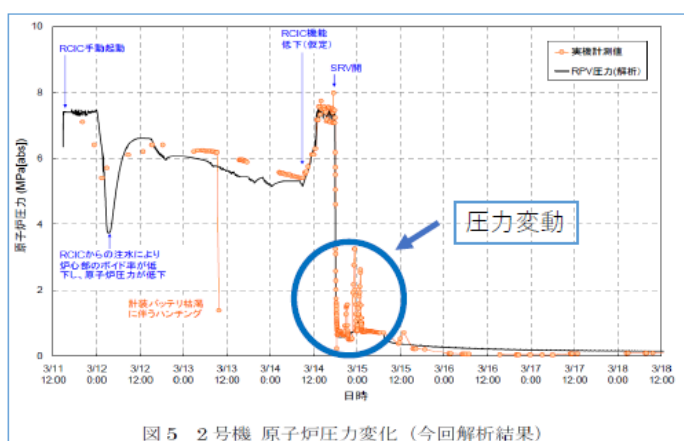


図3 MAAPによる2号機の原子炉圧力変化解析例

それによると、2011年3月14日18時にSRV（蒸気逃がし安全弁）が開かれて圧力が急減している。MAAPの解析でもこの時の圧力変動の解析結果は計測値を再現している、しかし、3月15日0時をはさんだ時間に計測されたパルス状の圧力変動（筆者が青丸で囲んだ部分）や、3月15日12時頃の圧力変動は、まったく再現できていない。これらの点について、国会事故調は、その報告書²⁰⁾で、「圧力変化のパ

¹⁸⁾原子力規制委員会データベース、（第5部 MAAP）, p.5-54.（N-ADRES]第236回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合）

(<https://www.dansr.go.jp/view/NRA022002342?contents=NRA022002342-002-003#pdf=NRA022002342-002-003>)

¹⁹⁾東京電力株式会社、MAAPコードによる炉心・格納容器の状態の推定、2012年（平成24年）3月12日、添付6-7.

²⁰⁾東京電力福島原子力発電所事故調査委員会、国会事故調 報告書、2012年9月30日、p.168.

ルスの挙動は無視され、なだらかに減少する圧力変化が与えられている」結果は、MAAP という「複雑、高価なシミュレーションコードによる予測の意味は何か、疑問が残る」と MAAP による解析に疑問を呈している。MAAP の解析では、重大な物理現象を見落としてしまう危険があるからだろう。MAAP 解析では、起こるかもしれない圧力変動などは再現できないのである。

3.2 ファロ (FARO) とクロトス(KROTOS), コテルス(COTELS)実験について

JRC-ISPRA (5 ページ参照) では、ファロ (FARO) とクロトス(KROTOS)のふたつの実験装置を用いて水蒸気爆発に関する実験を行った。これらの大規模実験の目的等を表 1 にした。ファロ (FARO) は、主に粗混合状態を解明する目的で、クロトス(KROTOS)は、主に拡大伝播の機構を解明することを目的としており、それぞれ目的が異なるのである。

ファロ (FARO) 装置による実験のうち、L-28 までは粗混合を調べる目的の実験で、爆発の発生は考えていない。装置の水槽も 1 重で、内部の観察もできない構造となっている (図 4)。高サブクール水での水蒸気爆発実験は、L-29,31,33 の 3 回のみで、外部トリガーを与えた実験は L-33 の 1 回しかおこなわれていない。L-29 以降の実験は水槽を 2 重にして、観察窓を設置して現象の撮影を行っている (図 5)。

表 1 の (1) 「ファロ (FARO) 実験は、プロトタイプ条件で 150 kg スケールの UO_2 ベースの溶融物を使用することにより、欠くことのできないコリウム溶融ジェットと水の混合および急冷挙動 (クエンチング) に関するデータを提供するように設計されたものである」。(原文: The FARO tests were designed to provide data on the integral corium melt jet/water mixing and quenching behaviour by using

表 1 大規模実験の目的等

番号	実験	実施主体	実験番号	試料	おもな目的	外部トリガー	おもな結果	実施期間	備考
(1)	FARO	JRC ISPRA	L-1~L-28	コリウム(主に $\text{UO}_2\text{:ZrO}_2=80:20$)	粗混合				
			L-29~L-32		自発的水蒸気爆発発生の有無	なし	爆発せず		
			L-33		水蒸気爆発発生の有無	あり	爆発アリ		
(2)	KROTOS	JRC ISPRA	K38~44, K49~51	アルミナ	拡大伝播、爆発発生の有無	あり(一部なし)	ほとんど爆発		
			K32~37,45~47,52,53	コリウム ($\text{UO}_2\text{:ZrO}_2=80:20$)			自発爆発せず		
(3)	TROI	KAE(Korea Atomic Energy Res.Inst.)	TROI-4,15	純ジルコニア	自発的水蒸気爆発発生の有無	なし	一部爆発		*1
			TROI-13,14	共晶コリウム ($\text{UO}_2\text{:ZrO}_2=70:30$)	爆発の大きさ	なし	自発爆発アリ		*2,*3
			TROI-16~	熱添加共晶コリウム	爆発の大きさ	あり		継続中	
(4)	COTELS	NUPEC		溶融燃料模擬物質	自発的水蒸気爆発発生の有無	なし	爆発せず		*4, *5

*1ジルコニア溶融物が強力な蒸気爆発を引起こす

*2共晶コリウムは外部トリガー適用により強力な蒸気爆発に至るが、外部トリガーがなければ弱い蒸気スパイクを示した。

*3外部トリガーが強力な蒸気爆発に至るので共晶コリウムの爆発性を無視できない

*4実質東芝の出向技術者が実施

*5低サブクール水など爆発しない条件設定、メルト温度測定せず

150-kg-scale of UO₂-based melt in prototypical conditions.)²¹。つまり、L-28 までは粗混合状態をモデル化するために必要な情報を得るために行われたものであり、水蒸気爆発が起こらないことがわかっている飽和温度の水の条件で実験が行われたファロ（FARO）実験については、L-06, 11, 14, 19, 20, 24, 27, 28 の 8 回はサブクール度が、0 から 2 K という極めて低サブクール水で行われ、L-08 は 12K と比較的低サブクール水でおこなわれている。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、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。例えば、庄司・高木²²によれば、大気圧下で行われたサブクール度 20K 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。その理由は、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せず、蒸気膜が崩壊しにくくなるためである。このことは、これまでの研究で十分確認されていることである。つまり L-28 までの実験では、水蒸気爆発発生の有無ではなく、粗混合状態での冷却挙動に及ぼす系の圧力、溶融物の質量、水深の影響を調べたためのものである。

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は、L-29 以降、わずか 2 回の実験が行われたにすぎない²³。さらに、水蒸気爆発実験と呼ばれるのは L-33 の 1 回のみであり、外部トリガーを加えることで水蒸気爆発を起こしている²⁴。ファロ（FARO）実験の L-33 は外部トリガーによって水蒸気爆発が発生している。2001 年に報告されたファロ（FARO）実験に関する論文²⁵によると、L-33 の結果は、論文中の図からは、発生圧力が 10MPa を超えていることが確認できる。これらの点から、L-33 の結果は、水蒸気爆発が発生したとみなすべきであろう。同じ報告書²⁶では「FARO、KROTOS、TROI のコリウム実験で軽度の爆発（mild explosions）を引き起こした」と、FARO での爆発（爆発したのは L-33 のみ）を弱いながらも「爆発」としている。

²¹ D. MAGALLON, I. HUHTINIEMI, H. HOHMANN, Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments, Proceedings of the OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions May 19 - 21, 1997, Tokai-mura, Japan., p.431.

²² 庄司正弘・高木二郎，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.

²³ D. Magallon, I. Huhtiniemi, Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO, Nuclear Engineering and Design, Volume 204, Issues 1-3, February 2001, Pages 369-376.

²⁴ 日本原子力研究開発機構，原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価技術高度化）事業成果報告書，2016 年 3 月，p.2-2.

²⁵ 菊池航・平等雅巳・枋尾大輔・堀田亮年・阿部豊，軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発，原子力規制庁長官官房技術基盤グループシビアアクシデント研究部門 RREP-2023-2001, p.21. (<https://www.nra.go.jp/data/000434335.pdf>)

²⁶ D. Magallon et al., FCI Phenomena Uncertainties Impacting Predictability of Dynamic Loading of Reactor Structures (SERENA programme), Workshop on Evaluation of Uncertainties in Relation to Severe Accidents and Level 2 Probabilistic Safety Analysis, Aix en Provence, France, November 7-9, 2005, p. 8.

²⁷ 同上, p.7.

ところが、丙 C-18 では L-33 が「水蒸気爆発」は「なし」と記述している。その結果、ファロ（FARO）実験では、一切「爆発しない」としている。しかし、L-33 の実験結果に関する原著論文²⁸では、タイトルで「ENERGETIC EVENT（激しい現象）」としており、圧力波が下方（水槽底部）から上方に向かって、成長しながら 370m/s の速度で伝播していることも示している。さらに、2001 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セレナ（SERENA）計画では、トロイ（TROI）実験の TROI-13（核燃料溶融物使用）や、クロトス（KTROTOS）実験の 44（アルミナ使用）の結果とともに、FARO 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、FARO 実験の L-33 では、水蒸気爆発が発生しているとする方が自然である。

既に記述したように、ファロ（FARO）試験では 2 種類の水槽を用いて実験を行っている。図 4 にファロ（FARO）装置の実験番号 L-28 までの水槽部を示す²⁹。L-28 までの水槽は、内部の観察ができない“Thermos”（テルモス（独語読み）またはサーモス（英語読み））と呼んでいる水槽である。水槽底部に粒子の粒子径分布を解析するために、細粒化した固形後の溶融物の受け皿（デブリキャッチャー）が設置してある。他方、圧力計も外部トリガー装置も設置されておらず、内部の観察もできない構造になっ

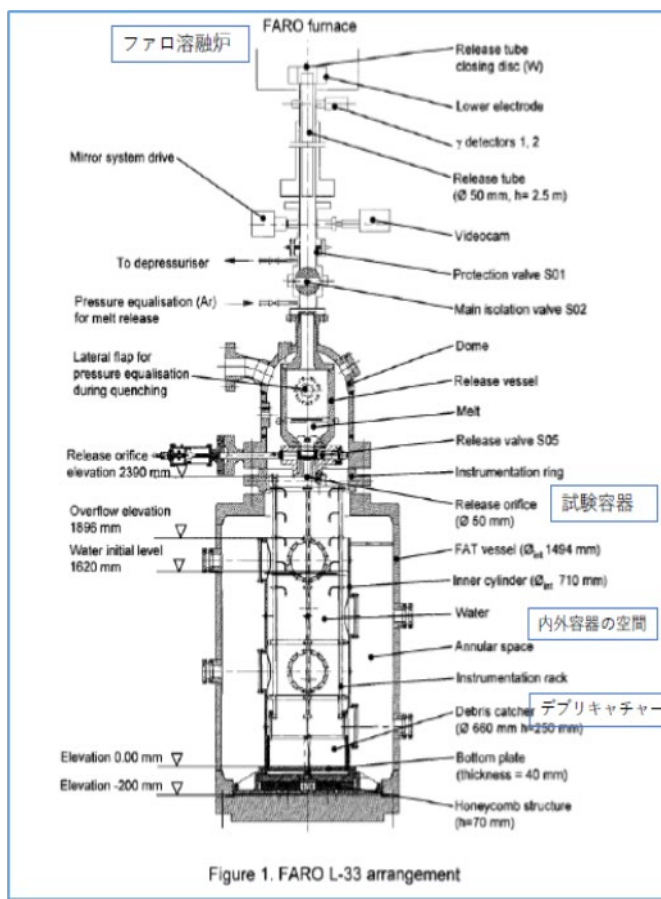
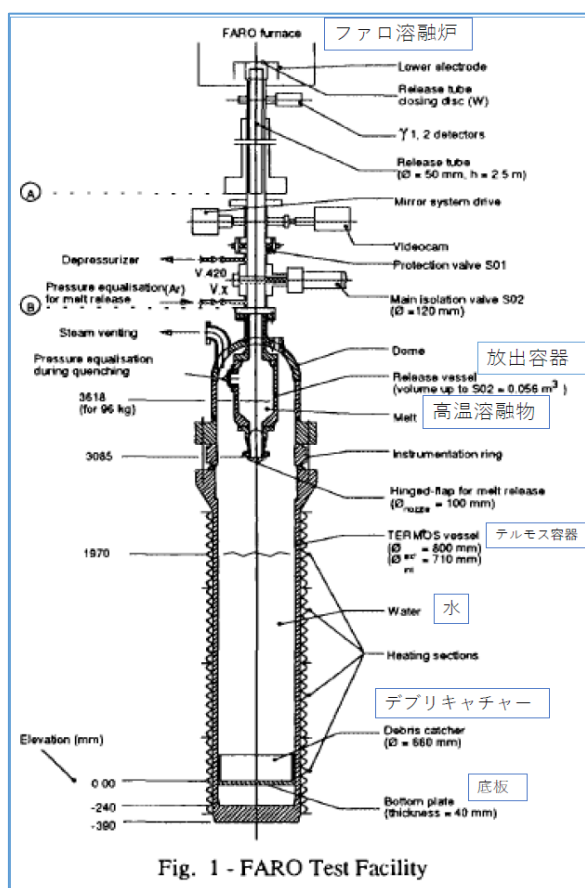


図 4 FARO 装置の L-28 までの水槽部

図 5 FARO 装置の L-29 以降の水槽部

²⁸ Magallon, D., and Huhtiniemi, I. 2001. Energetic event in fuel-coolant interaction test FARO L-33. ICONE-9 Conference, Nice, France, 8-12 April 2001., p.1.

²⁹ D. MAGALLON, I. HUHTINIEMI, H. HOHMANN, Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments, Proceedings of the OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions May 19 - 21, 1997, Tokai-mura, Japan., p.432.

ている。したがって、実験は、爆発が発生しない条件で行われることが前提となっていることがわかる。溶融燃料が水中に落下したあと、水中でどのような粒径の粒子に分かれていくかを知るため（プレミキシングテスト「粗混合あるいは予混合試験」とか「クエンチ」テストと呼んでいる。クエンチは焼入れといった意味があるが、水蒸気爆発の実験では「溶融物の冷却挙動」を意味する）の装置である。水蒸気爆発では、水中に投入された後の高温物質の粒径分布を調べれば、だいたいどのような現象が起こったかわかる。

文献³⁰⁾には、ファロ（FARO）実験については、「現在の一連のテストの参照シナリオは、溶融コリウムのジェットが下部プレナムの水プールに落下し、粒子となって（膜沸騰状態のまま）、下部ヘッドに堆積すると想定されているようなタイプの圧力容器炉心のメルトダウン事故に関連したものである」

（原文：The reference scenario of the current test series is relevant to a postulated invessel core melt down accident when jets of molten corium penetrate into the lower plenum water pool, fragment and settle on the lower head.）として、そもそも水蒸気爆発が発生することを想定しておらず、2重の構造にもなっていない。

L-29からL-33までは図5³¹⁾のような、内部の観察（高速写真撮影）ができる構造（丸いガラス窓）になっている。ビデオカメラは内外容器の空間に設置してある。外部トリガーはL-33のみ加えられた。

図5には記入されていないが、外部トリガーは底板から5 mmの位置で0.5gの火薬を爆発させることで与えている。この装置による実験L-29,L-31では、外部トリガーを与えず、自発的な水蒸気爆発を観測していない。外部トリガーを与えたL-33では圧力が伝播していく現象を確認している。

（2）クロトス(KROTOS)試験では、水蒸気爆発の「JRC-IspraのFARO計画の中で各過程（粗混合、トリガリング、伝播、膨張過程）のモデル化を支援するために必要な実験が行われた(原文：To support these modelling efforts, fundamental experimental investigations are being performed in the KROTOS facility in the frame of the FARO programme at JRC-Ispra.)」³²⁾。特に、伝播拡大過程の解析を目的とした1次元とみなせる細長い形状の水槽による、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である。図6にKROTOS装置の水槽部分を示す。

FARO実験が、原子炉のシビアアクシデント時に発生の可能性のあるFCI現象のうち、主に粗混合状態の把握のために行われたのに対し、クロトス(KROTOS)実験は、爆発開始後の現象を調べるので、当然、水蒸気爆発が発生させることが前提となっている。つまり、外部トリガーを与える実験が基本になっている。水蒸気爆発が発生しなくては実験の目的を達成できないため、十分大きいトリガーを与えている。

³⁰⁾ A. Annunziato, A. Yerkess, and C. Addabbo, FARO AND KROTOS CODE SIMULATION AND ANALYSIS AT JRC ISPRA, Proceedings of the OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions, May 19 - 21, 1997, p.751.

³¹⁾ Magallon, D., and Huhtiniemi, I. 2001. Energetic event in fuel-coolant interaction test FARO L-33. ICONE-9 Conference, Nice, France, 8-12 April 2001., p.3.

³²⁾ I.HUHTINIEMI, D.MAGALLON and H.HOHMANN, Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina vs. Corium Melts, JAERI-Conf 97-011, (1998), p.275.

クロトス(KROTOS) 実験の主な目的は、トリガーが加えられた以降の爆発状況に関する基本的な実験情報を提供することである。以下に述べるような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、圧力波の測定やエネルギー変換率の測定を通して、爆発の激しさに関するデータを収集するためである。

図7は、クロトス(KROTOS) 実験の圧力波形の代表例でクロトス(KROTOS) 52の実験で得られた圧力波形（太い黒実線）である。水槽の異なる位置での圧力値の測定結果を示している³³。K0からK5は圧力センサーを表わし、水槽底部からの距離が番号に対応している。K0はトリガーガス室の圧力センサを表わしている。

圧力センサーの取り付け位置は、K1は底部から150mm、K2は350mm、K3は550mm、K4は750mm、K5は950mmで、K0はマイナス40mmの位置になる。

水蒸気爆発によって発生した圧力波（黒い実線）が、最大17MPa（約170気圧）まで成長しながら水槽底部から水面に向かって伝播していく様子を表わしている。トリガーによる圧力波は薄い色の実線で記録されている。トリガーの圧力波は、高温溶融物を投入せずに測定したものである。

図7中の色の薄い細い実線が、トリガー装置によって発生した圧力波の伝播の様子を示している。この波形は、水プールに溶融物のない状態で測定したものを爆発時と重ねたものである。水槽K1の位置では、爆発時の圧力波形は、トリガーの圧力波の波形と同程度であるが、K1以降の爆発圧力波形（黒い実線）はトリガー波形を取り込んだ形になっている。

図8（原著ではFigure 7）は、図7に示したような

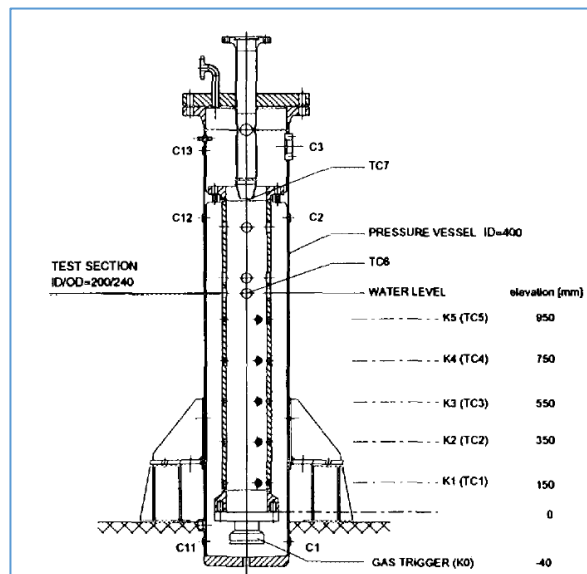


Fig. 1: KROTOS test section and pressure vessel

図6 KROTOS 装置の水槽 部分

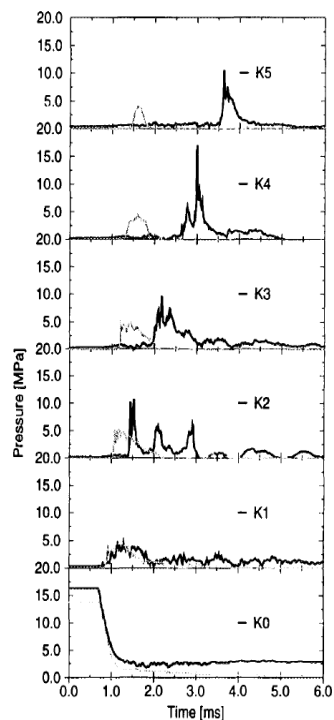


Fig. 7: Dynamic pressures in KROTOS 52 vs. external trigger pulse (light gray)

図7 KROTOS-52 の圧力波形

³³ 同上 I.HUHTINIEMI, D.MAGALLON and H.HOHMANN, Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina vs. Corium Melts, JAERI-Conf 97-011, (1998), p.281.

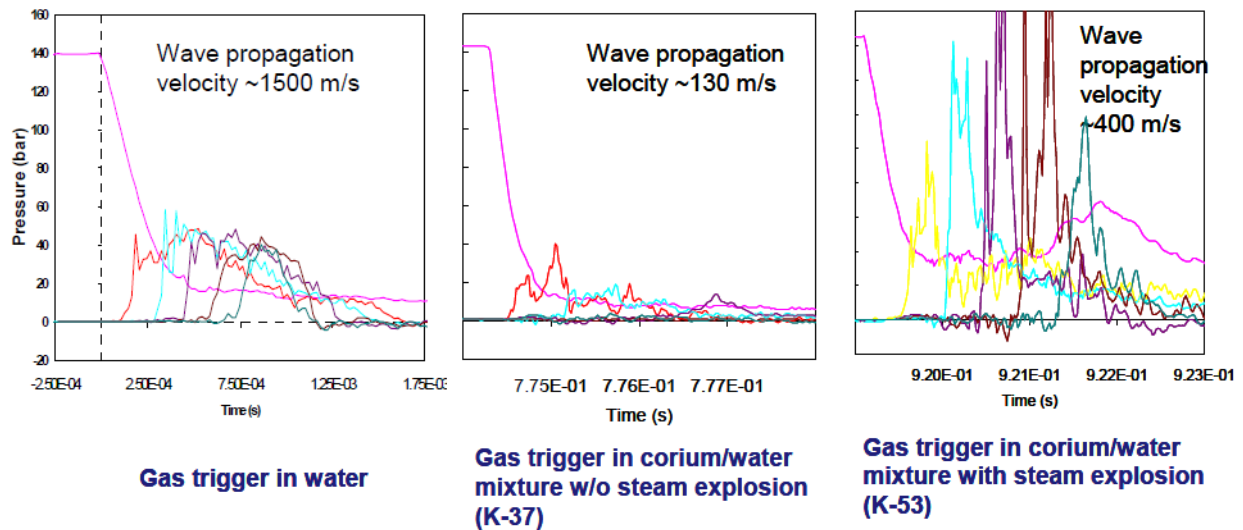


Figure 7: Possible evolution of pre-mixtures exposed to the same trigger. Main differences between K-37 and K-53 conditions is the system pressure: 0.1 MPa and 0.36 MPa in K-37 and K-53, respectively. (see pressure transducers positions in Figure 11)

図8 クロス(KROTOS)実験の圧力測定例

5か所の圧力計によって得られた圧力波形を、同一の軸に重ねて表示したものである³⁴。横軸は時間（秒），縦軸は圧力（1bar≒1atm≒0.1MPa）で，3枚のグラフの左は，溶融物を投入しない場合のトリガー波形が，水中を伝播していく過程を示す。140barから減少してくる曲線（ピンク色）は，トリガーガス室の圧力変動（K0）を示す。やや遅れて次々に立ち上がる波形は，左から圧力計K1～K5によって測定されたものである。圧力計の位置（距離）と時間の関から，水中を伝播していくトリガー圧力波の速度は約1500m/s（音速）と測定される。

中央の波形は，K-37のもので，トリガーを加えたものの水蒸気爆発が発生しなかった時の圧力波形を示す。測定された圧力値は，トリガー波形よりも小さくなり，圧力が伝わる速度も約130m/sと遅くなる。左の波形の圧力波との相違は，水中に蒸気泡が存在する水中では，トリガー圧力波が蒸気泡に吸収され大きさが減少し，密度と弾性率が変わるため，伝播速度が小さくなることを示す。

右の波形は，水蒸気爆発が発生したK-53のもの（Gas trigger in corium/water mixture with steam explosion (K-53) 訳：水蒸気爆発を伴うコリウム／水混合系(K-53)における高圧ガストリガーの様相）で，K3, K4の圧力値は，160bar以上になったこと，爆発による圧力波が成長しながら約400m/sの速度で伝播していくことを示している。なお，K-37の系圧力は0.1MPa，K-53の系圧力は0.36MPaであった。

³⁴B.R. Sehgal, P. Piluso, (Editors), SARNET LECTURE NOTES ON NUCLEAR REACTOR SEVERE ACCIDENT PHANOMENOLOGY, SARNET-SPREAD-118 Lecture notes on Nuclear Reactor Severe Accident Phenomenology September 2008, p.VI – 176.

さらに爆発時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。図9（原著では Figure 12）は、アルミナ試料の爆発時と非爆発時の回収粒子径の粒径分布の比較を示す³⁵。粒子の横軸が積算質量（％），縦軸は粒子径（mm）となる。図9における点は、回収された粒子サンプルの直径の代表値であり、図上の左側の2本の線は爆発しなかった時の積算粒子径を示し、粒子径の小さいものの占める割合が小さく（1mm以下の粒子が1％と約5％），大きいものが大半を占めていることが示されている。

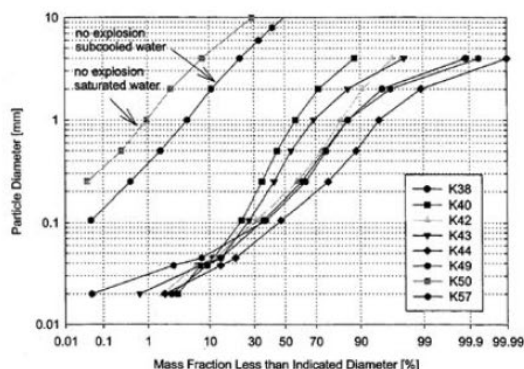


Figure 12 : Debris size in selected KROTOS alumina tests with steam explosion compared to debris size without steam explosion (top two curves)

図9 アルミナ試料の爆発時と非爆発時の回収粒子径の粒径分布の比較

右側の5本の線は爆発した時で、1mm以下の粒子が55％から92％を占めている。つまり、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、粗混合や微粒化の物理モデルを考え、定数等を調整して解析コードの精度を上げることになる。

表1（10ページ）に示した各種実験装置による実験結果から言えることは、水蒸気爆発の発生には、溶融物の組成と温度、水温、圧力、水深など多くのパラメータが関与しており、実機条件も事故の程度や進み具合によって非常に多岐にわたる可能性があり、一概に定められるものではない。酸化ウラン UO_2 の融点は 2760°C (3033K) 程度であるが、例えば、溶融過程をとっても、融点は時々刻々変化していく。すなわち、「燃料熔融」は 1500°C 以下で発生し約 $2000\sim 2200^\circ\text{C}$ 以上に達すると急速に進展する³⁶。また、ジルコニアとステンレス鋼の接触部では 1300°C から融解が始まることがわかっている。

溶融物の組成も、ほぼすべてがジルコニアの場合や、酸化ウランが多く含まれる場合、さらに部材である鉄鋼材料などが含まれる場合などが考えられる。融点も組成によって大きく異なり、過熱度³⁷も組成の変化に応じて大きくなっていく可能性がある。つまり、あらかじめ設定した溶融物による数回の実験結果だけから水蒸気爆発現象全体の結論を導き出すのは非常に危険なことであるといえる。

³⁵ B.R. Sehgal, P. Piluso, (Editors), SARNET LECTURE NOTES ON NUCLEAR REACTOR SEVERE ACCIDENT PHANOMENOLOGY, SARNET-SPREAD-118 Lecture notes on Nuclear Reactor Severe Accident Phenomenology September 2008, p.VI-180.

³⁶ 倉田正輝, 炉心溶融, エネルギーレビュー, 2015-9, p.12.

³⁷ 溶融物温度から融点の値を引いた温度。単位は $^\circ\text{C}$ またはK（ケルビン）。

表1の(3)トロイ(TROI)実験の結果については3.3で説明する。また、(4)コテルス(COTELS)実験は、旧原子力発電技術機構が行ったものであるが、実質は、東芝から出向していた技術者が行ったものである。「原発製造メーカー社員という利害関係者が自社製品の販売に不利となるような結果がすべて公表されるか」という疑念を持たざるを得ない。仮にそうだとすれば、資料的価値は少ないと言わざるを得ない。

なお、コテルス(COTELS)実験では溶融物の温度を測定しておらず、しかも1点を除きすべてがサブクール度の低い水温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がわかってきた条件によるものである。また、SERENA計画でも、COTELSの結果は解析対象に選択されていない。

3.3 トロイ(TROI)実験について

トロイ(TROI)実験は、韓国原子力研究所(KAERI)によって、1997年以来行われている「燃料と水の相互作用(TROI)の研究」と名付けられた実験的FCI研究プログラムである。この研究プログラムの目的は、「韓国の次世代原子炉(KNGR)の压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。(原文:The object of the research is to resolve the generic safety issue of ex-vessel steam explosion for Korean Next Generation Reactor(KNGR) and to propose an appropriate severe accident management(SAM) strategy. It would also contribute to the understanding of the effect of the material property on the conversion efficiency of steam explosion, which is the essential and high-priority research topic for the FCI community.)」³⁸とされている。この目的を達成するために、非常に精度の高い実験を行っている。しかるに、日本原電が2019年1月31日付の準備書面(10)の257ページで、トロイ(TROI)実験について、以下のように主張している。

すなわち、トロイ(TROI)試験では「融点大きく上回る加熱」としているほか、温度測定の理解に多くの誤りがある。さらに「SERENA計画では、(中略)外部トリガーを伴わない水蒸気爆発の発生が示され」ていないなどとしている。しかし、セレナ(SERENA)計画では、トリガーを加えない試験は行われておらず、「自発的な水蒸気爆発は生じていない」とは言えないと考える。原告側の主張を全く理解していない。本論では、これらの誤りを指摘するとともに、あらためて過酷事故時の水蒸気爆発の危険性を述べる。

3.3.1 トロイ(TROI)-13の温度測定について

トロイ(TROI)実験の核燃料溶融物の温度については、幾つか議論があり検討がなされている。原著論文³⁹には、トロイ(TROI)-13は「2600K」とある。しかし、実験の試料の組成では、液相線(リキダス)温度が2800Kとされており⁴⁰、2600Kという値に疑義があったことは事実である。その後、SERENA

³⁸I. K. Park et al., Steam Explosion Experiments in the "Test for Real cOrium Interaction with water (TROI)" Program, the 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, paper#1925, p.1. (2001).

³⁹J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B. T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, pp. 783-795 (October 2003)の p.784.

⁴⁰永瀬文久, 溶融燃料の形態及び特性, 原子力学会 2012 年春の年会 (2012), p. 15.

プロジェクトで測定データの検討解析が行われ、「 $\sim 3300\text{K}$ 」⁴¹としている。ただ、図 10（原著論文の Fig.17）の「TROI-13-CHINO」の測定結果を見ると、5100sec 付近で 3500K であった値が、小刻みに振動しながら 2600K へ低下している。この温度の低下は「通気口から大量のガスが出た」⁴²ためと推定されている。ガスの詳細が明確でないが、温度降下はガスのためではなく、ルツボ⁴³の側面または底面、あるいはそれらの接続部分に生じた亀裂による外気の流入など炉のトラブルによるものと推定される（ルツボ側面の冷却水の関与の可能性もあるかもしれないが、断定は困難である。いずれにしてもトロイ（TROI）-13 のときのみ発生した物理現象だと思われる）。

ルツボは、試料投入時に底部の酸化ジルコニウム性の板を破壊するため、実験後回収することはできないようだ。そのため、加熱時に微細な亀裂等ができて確認はできない。亀裂が生じることによって、外気が流入すればルツボから「大量のガスが出た」ように見えることは十分考えられる。しかし、「ガスが出たため、正しく測定できなかった。加熱は継続しているので温度が低下するのはおかしい」のだとすると、次の点の説明が難しいと考える。

第 1 点は、他の実験の時には、このようなガスの噴出が観察されないのは奇異である。同じ成分の試料で、同じように加熱していれば、トロイ

（TROI）-13 以外の実験においても、このようなガスの噴出と温度変化が現れなければならないはずである。

第 2 点は、測定に用いている 2 色放射温度計は、2 種の波長を用いているので、原理的に測定器と

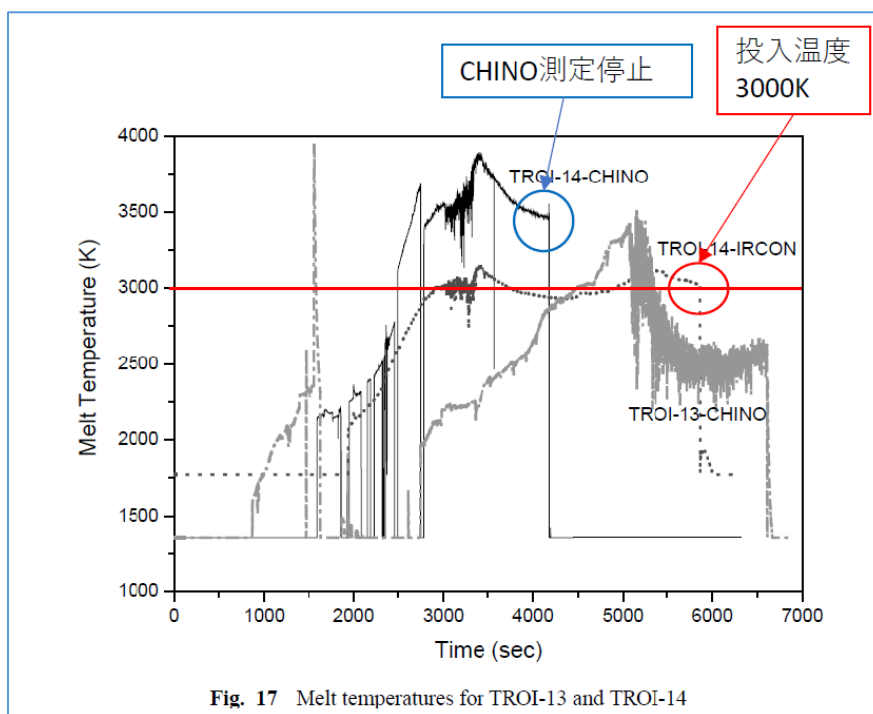


図 10 TROI-13 と TROI-14 の溶融物温度測定記録⁴⁴

⁴¹ NEA/CSNI/R(2007)11, OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA Final Report - December 2006, P.49.

⁴² J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B.T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, p. 783–795 (October 2003), p.793.

⁴³ 試料を融解するためのセラミックス製容器。

⁴⁴ J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B.T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, p. 783–795 (October 2003). の p.794.

被測定面の間に介在するガスやガラスなどの影響を受けないのである。仮にガスが影響するとしたら、測定に用いた一つの波長の測定にのみ影響するというものだが、かなり近接した波長を用いていることから、片方の測定値にのみ影響を及ぼすとは考えられない。繰り返しになるが、「ガスの影響」を語るのであれば、どのようなガスがどのようなメカニズムで測定に使用したどちらの波長に影響するかを示してほしいものである。

以上、二つの理由でトロイ (TROI) -13 の指示値は、外気の流入の影響で表面温度が低下したもので、指示値が不正確というより、装置上のトラブルによるとすべきであろう。実際の溶融物の温度は、不明であるが、セレナ (SERENA) では「 $\sim 3300\text{K}$ 」(3300K 程度の意味)とした。妥当なところかと思われる。

図 10 を見ると、「TROI-13-CHINO」の測定値は、表示が振動しているが、時間 6800sec 付近では 2600K 付近であることが分かる。そこで、この値をトロイ (TROI) -13 の Melt Temperature として文献の表 1 のように 2,600K としたものと思われる。

3.3.2 トロイ (TROI) -14 の温度測定について

日本原電は、自発的な水蒸気爆発の発生が確認されたトロイ (TROI) -14 の温度について、試料投入時の溶融物温度はチノー (CHINO) 社製温度計の測定最高温度である「4000K 近く」と、イルコン

(IRCON) 社製温度計による測定最高温度の「3200K 程度」の両者を示し⁴⁵、「3773K であったとしている」。この結論は誤りと考えられ、トロイ (TROI) -14 の溶解炉から水槽への落下時の溶融物温度は、イルコン (IRCON) 社温度計の測定値の 3000K と判断できる。3000K であったことは、図 10 (原著論文の Fig.17) の温度記録 (赤丸で囲んだ投入温度 3000K) などから見ても、信頼できるものである。以下にその理由をデータを時系列に追いながら示してみよう。

次に、TROI-14-CHINO と TROI-14-IRCON の測定値の解釈について記述する。

図 11 は、CHINO と IRCON の測定過程を比較したものである⁴⁶。MELTEMP1 が CHNO, MELTEMP2 が IRCON である。

①TROI-14-CHINO の測定値は、およそ 1800 $\sim$ 2500sec では TROI-14-IRCON の測定値より 200K 程度高い数値を示しながら上昇している。

②ところが、TROI-14-CHINO の測定値は、2500sec 付近で約 2500K からいったん下がったのち、3200K までステップ状に上昇している。このようなデータの変動は、実際の温度を示したものではない。

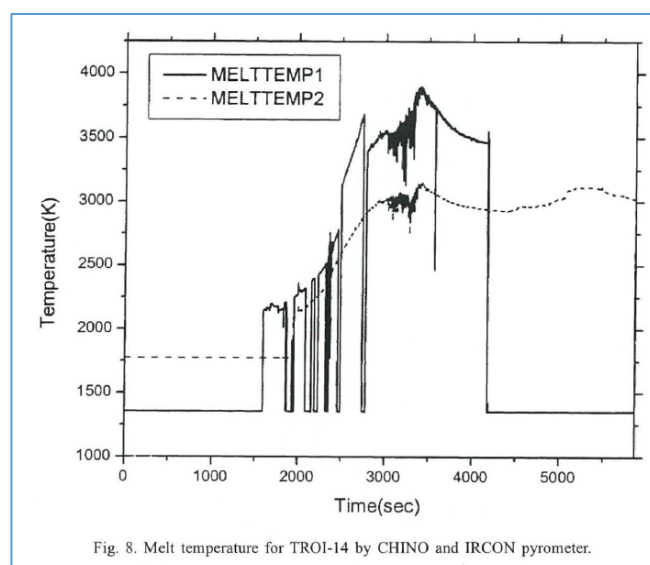


図 11 TROI-14 の二つの温度計の指示値

⁴⁵東北電力株式会社ほか、重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (第 5 部 MAAP) 添付 2 熔融炉心と冷却材の相互作用について、2015 年 10 月, p.5-2-14

⁴⁶J.H. Song*, I.K. Park, Y.S. Shin, J.H. Kim, S.W. Hong, B.T. Min, H.D. Kim, Fuel coolant interaction experiments in TROI using a UO_2/ZrO_2 mixture, Nuclear Engineering and Design 222 (May 2003) 1–15. の p.9.

③その後 2700sec には 3700K を記録している。その後、測定値が 300K 程度減じている。2800sec 付近の約 3400K の指示値がその結果である。しかし、この指示値も、試料が溶融開始前の値としては大きすぎる。

④3000sec 付近で測定曲線の上昇が停止して、測定値が上下に変動している。この測定値から 3000sec 付近で試料の溶融が開始しされ、3400sec で溶融が終了していると推測される。この間の温度上昇が小さくなるのは融解潜熱のためである。この期間の、TROI-14-CHINO と TROI-14-IRCON の測定記録は、500K ほどずれているが、その傾向は非常によく一致している。このことは、両者の測定値の基準値が 500K ずれていたためであると推定される。

⑤4200sec 付近で TROI-14-CHINO の測定値は測定開始時の値まで急低下している。これは CHINO 社の温度計による測定が中止されたことを示している。

⑥図 10 に示されているように 5800sec 付近で TROI-14-IRCON の測定値が急減して、測定開始前の指示値となっている。溶融物が水槽に落下されて試料がなくなったためである。この時の TROI-14 温度は、IRCON 社の温度計による測定が示しているとおり 3000K である。

⑦電力会社文書には「TROI-14-IRCON 3500K 程度」としているものもあるが、この数値は加熱中の最高温度であり、投入時の温度は 3000K である。温度を高く見せようとする意図がうかがえる。

⑧CHINO 社の温度計による測定範囲は 1000～3100℃ (1273～3373K) である。3100℃ (3373K) 以上の測定を行うためには何らかの調整(校正)が必要と思われる。CHINO 社の温度計による TROI-14 の測定は、この調整のミスによるものと思われる。

3.3.3 日本原電のトロイ (TROI) -13,14 の温度測定解釈の誤り

トロイ (TROI) -13, 14 の溶融物温度に対する説明に、日本原電は、2003 年 5 月に発表された Song et al. の文献 (丙 C21) ⁴⁷ (論文 A と呼ぶ) を引用している。しかし、トロイ (TROI) 実験に関しては、同じ著者らによる同じ 2003 年 10 月発行の文献 ⁴⁸ (論文 B と呼ぶ) もある。しかし、日本原電はこの論文 (論文 B) を無視している。無視した論文 B は、論文 A より後 (あと) に発行されている。表 2 に両論文の投稿から発表までの時期を示した。

トロイ (TROI) -13,14 の温度に関しては、日本原電は新しい方の文献 (論文 B) を引用すべきである。新しい文献 (論文 B) を無視して古い方の文献 (論文 A) を引用した理由は、自発的に水蒸気爆発が発生したトロイ (TROI) -13 とトロイ (TROI) -14 の溶融物の温度に関する記述が、日本原電にとって好都合なためであると推定される。すなわち電力会社による文書 ⁴⁹ には、トロイ (TROI) -13 は「3500K 程度以上」とあるが、論文 B では「3500K 近くであろう」とあり、「以上」とは書いていない。また、同じ文書で、トロイ (TROI) -14 は、「最高温度 (4000K, 3200K) を示しており、計測の不確かさが大きい」とあるが、論文 B では、最高温度がチノー社の温度計では 3800K、IRCON 社の温度計では 3200K と

⁴⁷ J.H. Song, I.K. Park, Y.S. Shin, J.H. Kim, S.W. Hong, B.T. Min, H.D. Kim, Fuel coolant interaction experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nuclear Engineering and Design 222 (May 2003) 1–15.

⁴⁸ J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B.T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, p. 783–795 (October 2003).

⁴⁹ 東北電力株式会社ほか、重大事故対策の有効性評価に関わるシビアアクシデント解析コード (第 5 部 MAAP) 添付 2 溶融炉心と冷却材の相互作用について、2015 年 6 月。p.5-2-13.

なったとあり、「以降の実験では IRCON の放射温度計を使うことにした」（原文：So, we decided to use the IRCON pyrometer in the later experiments.）と明確に記述してある³⁰。すなわちトロイ（TROI）-14 の溶融物温度には一定の信頼度があることを示しており、日本原電が言う「溶融物温度が高い場合」には該当しないことは明らかである。図 10 に示したように、トロイ（TROI）-14 は投入温度 3000K で自発的な水蒸気爆発が発生したことは明白である。

表 2 2003 年に報告された TROI 論文の作成経緯

	論文 A	論文 B
受領	2002.01.14	2003.03.07
改訂版受領	2002.08.29	2003.06.17
受理	2002.11.15	同上
発表	2003.05.	2003.10.

論文 A Received 14 January 2002; received in revised form 29 August 2002; accepted 15 November 2002

論文 B Received March 7, 2003 and accepted in revised form June 17, 2003

このように図 10, 11 を検討すると、TROI-13-CHINO と TROI-14-IRCON の加熱過程の指示値が正しいように思われる。なぜなら、両者とも、加熱過程で融解時に融解潜熱のため、温度上昇が停止する温度がほぼ等しいからである。TROI-14-IRCON の約 3000sec のところと、TROI-13-CHINO の 4500sec 付近の指示値が、両者とも約 2900K を示しており、この値は試料の固相線（ソリダス）温度である。なお、日本原電も、固相線を 2900K としている³¹。トロイ（TROI）-14 については、5800sec の時点の温度を溶融物の温度「3000K」とするべきである。指示値の解釈と投入時の溶融物温度の読み取りの 2 点に誤りがあると思われる。

3.4 層状系での水蒸気爆発

浅い水深においても激しい水蒸気爆発は観察されている。水中で高温液が水平方向に層状に広がった状態で起こる水蒸気爆発で、層状系水蒸気爆発³²と呼ばれている。自発的、または、なんらかの外部トリガーによって起こる。

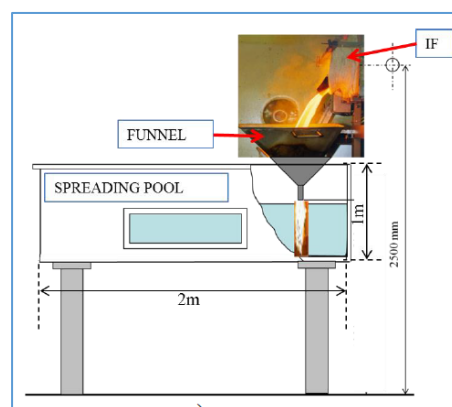


図 12 PULiMS 実験の実験装置

³⁰J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B.T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, p. 783–795 (October 2003).の p.793 から 794.

³¹東北電力株式会社ほか、重大事故対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第 5 部 MAAP）添付 2 熔融炉心と冷却材の相互作用について、2015 年 10 月、p.5-2-17

³²高温溶融物のプールに冷却材が注入され、溶融物が水中でプール底面に広がるような、溶融物と水の接触モード。

図 12 に示したのは PULiMS 実験⁵³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、高温の模擬溶融炉心が水のプールに注入された後に、「注入後の固化したデブリ層の最終厚さを予測できるモデルとコードの検証に必要な参照実験データを提供すること」が、この研究の目的であった。（原文：The goal of this work is to provide reference experimental data necessary for validation of models and codes capable of predicting terminal thickness of the solidified debris bed after pouring.）⁵⁴ 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い。

しかし、2012 年の P. Kudinov et al.⁵⁵の報告では 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 2 回、2014 年の報告⁵⁶では PULiMS 装置でさらに 1 回、縦長の水槽の SES (Steam Explosion in Stratified melt-coolant configuration)装置で 2 回の爆発が発生している。

図 13 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 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、他の例では、投入はじめに爆発が起こっている。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ある。

たとえば、

(1)25K 程度の比較的低サブクール度⁵⁷の水温(大気圧では 75°C)の状態で自発的な爆発が発生していること。

庄司ら⁵⁸の溶融すずを用いた実験によると、サブクール度 20K（図 14 のグラフの水温 $T_f=80^{\circ}\text{C}$ に相当）では、自発的水蒸気爆発は観察されなかった。ところが、サブクール度 30K では低い確率ではあるが爆発が観察されている。25K というサブクール度は、発生する確率ではかなり小さいが、自発的水蒸気

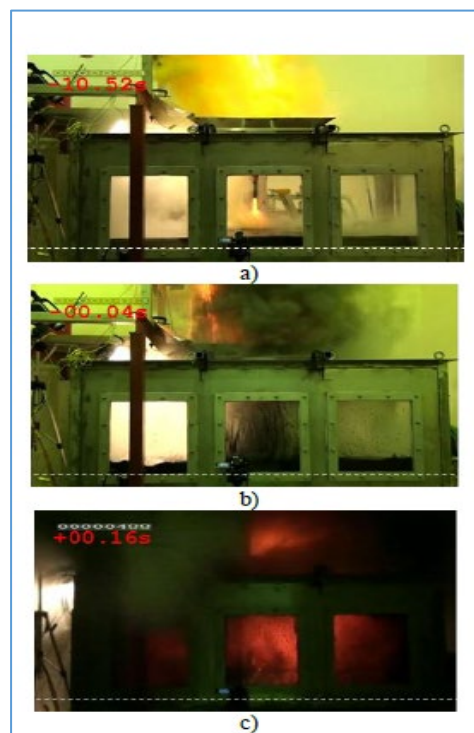


図 13 PULiMS 実験における水蒸気爆発

⁵³ PULiMS は、Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading（溶融液体の注入と水面下の広がり）の頭文字をとったもの。

⁵⁴ 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.2/11.

⁵⁵ 同上 p.9/11. (<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:678317/FULLTEXT01.pdf>)

⁵⁶ Pavel Kudinov, Dmitry Grishchenko, Alexander Konovalenko, Aram Karbojian, and Sevostian Bechta, Investigation of Steam Explosion in Stratified Melt-Coolant Configuration, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10) NUTHOS10-1316 Okinawa, Japan, December 14-18, 2014, p.7/16.

⁵⁷ 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、 $\Delta T_{\text{sub}} = T_s - T$ である。例えば、大気圧下 75°C の水のサブクール度は 25°C である。

⁵⁸ 庄司正弘・高木二郎，水中落下溶融す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）44 巻 433 号（1982-9），p.1770.

爆発が発生することもある温度といえる。

(2)PULiMS 実験では浅い水深のプールで（わずか 20cm）爆発が起こっていること。

これまでの爆発モデルは、例えば、図 15 のように溶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。

(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 % と高いこと⁹⁾。（後述するように TROI 実験では 0.3～0.6% 程度である）。

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。

繰り返しになるが、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点もある。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、実際の溶融炉心と異なるから起こったもので、原子炉事故時には、層状系での水蒸気爆発は起こらないということとはできない。

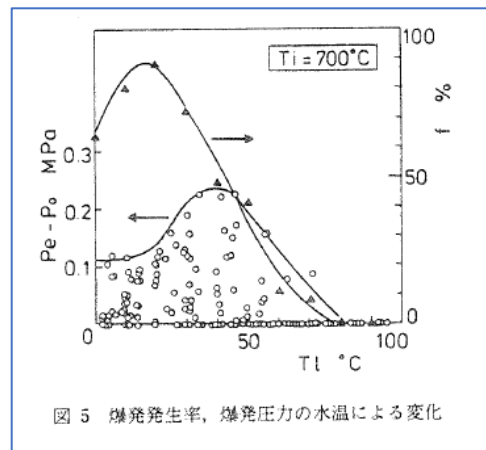


図 14 水温と自発的水蒸気爆発発生確率

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 & 2¹⁰⁾, オスカーシャム Oskarshamn 3, Forsmark 3）では、DEFOR 実験¹¹⁾など結果を通じて、深い水深（7～11m）による水張り方式を取っている。フィンランドの PWR 型原発は、新設炉についてはコアキャッチャー、既設炉についても IVR で対応している¹²⁾。

⁹⁾ Pavel Kudinov, Dmitry Grishchenko, Alexander Konovalenko, Aram Karbojian, and Sevostian Bechta, Investigation of Steam Explosion in Stratified Melt-Coolant Configuration, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10) NUTHOS10-1316 Okinawa, Japan, December 14-18, 2014, p.7/16.

¹⁰⁾ 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）

¹¹⁾ 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した実験のこと。

¹²⁾ 【特別編集版】欧州最大級！新型原発が本格稼働 北の地で見た「原子力」利用の今
(<https://www.youtube.com/watch?v=O4va69WYwZc>)

深い水深による水蒸気爆発対策の根拠は、水深が浅いと溶融物が水槽底部に到達したときに自発的水蒸気爆発が起こることを踏まえている⁶⁴。実際、水深が67cmと浅いトロイ（TROI）15までの実験⁶⁴では高い確率で自発的水蒸気爆発が発生している。一方、水深が深い場合は、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。さらに、スウェーデンでは、PULiMS実験での、予期せぬ層状系での水蒸気爆発を目の当たりにして、層状系の実験解析を精力的に行っているように思われる。

トリガーの解釈によって、水深を浅く水張する日本と、逆に深くしたスウェーデンやフィンランドと言うように、まったく反対の対策となったことは、水蒸気爆発に対する理解が統一されていないためであるともいえる。

3.5 セレナ（SERENA）計画について —その実施と結果—

次に、セレナ（SERENA）計画について記述する。セレナ（SERENA）計画の目的は、3.1に記述した、それ以前に実施された3種の実験とは目的が異なる。セレナ（SERENA）計画はOECDが実施した水蒸気爆発に関する国際プロジェクトである。5ページにすでに書いたように、SERENAとはSteam Explosion Resolution for Nuclear Applications（訳：原子力発電所（核エネルギー応用施設）における水蒸気爆発の解明）のことで、具体的には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ものである。

セレナ（SERENA）計画の実施期間は2002年1月から2012年11月まで（NEA/CSNI/R（2014）15,p.7.では、2001年からとなっている）。予算は2.59百万ユーロ(EUR)で、日本円に換算すると約3億6千3百万円（1ユーロ＝140円で計算）となる。参加国は10か国（カナダ、フィンランド、フランス、ドイツ、日本、韓国、スロベニア、スウェーデン、スイス、米国）であった⁶⁵。

3.5.1 実施主体

本計画はOECDの原子力機関（NEA；Nuclear Energy Agency）のCSNI(Committee on the Safety of Nuclear Installations；原子力安全委員会)が主催して実施したものである。

3.5.2 実施に至った経緯

⁶⁴ Pavel Kudinov; Aram Karbojian; Weimin Ma; Mikhail Davydov; Truc-Nam Dinh, A Study of Ex-Vessel Debris Formation in a LWR Severe Accident, Proceedings of ICAPP 2007 Nice, France, May 13-18, 2007 Paper 7512. (<https://www.researchgate.net/publication/280719733>)

⁶⁴ J. H. SONG, S. W. HONG, J. H. KIM, Y. J. CHANG, Y. S. SHIN, B. T. MIN and H. D. KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of Nuclear Science and Technology, 40 (10): p.783-795 (2003).の p.784 Table 1.

⁶⁵ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_25786/steam-explosion-resolution-for-nuclear-applications-serena-project

上記の原子力安全委員会（CSNI）の SESAR / FAP (Senior Group Experts on Nuclear Safety Research and Programme / Facilities and Programmes；原子力安全研究上級専門家グループ／研究施設と研究計画)⁶⁶が、世界的に見て FCI⁶⁷（Fuel-Coolant Interactions；燃料－冷却材相互作用）研究の重要性を低下させることにつながる FARO 施設の閉鎖等、研究が停滞することに対し懸念を表明したことに端を発している。

専門家グループは、FCI には依然として不確実性が存在していることを指摘していたが、具体的なことはあげていないことから、実際の研究計画は実務に携わる研究者たちが立案、提案したと思われる。2000 年 10 月の会議で、専門家グループが FCI の残されている研究課題⁶⁸を評価した後、CSNI の勧告に従って、2001 年に FCI に関する研究の実施の提案が採用される見通しとなり、2001 年 12 月に OECD/NEA/CSNI のセレナ計画の実施が承認された。

3.5.3 セレナ（SERENA）計画の目的

セレナ計画の目的は 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である。このことは、原発のリスク管理上に必要な FCI の激しさのレベルの理解をもたらすことになる。事故時に水蒸気爆発が発生した場合、どの程度の規模の爆発となるのか把握することをめざしたものである。

セレナ（SERENA）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が目的ではない。セレナ（SERENA）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。セレナ（SERENA）1 では実験は行われておらず、セレナ（SERENA）2 で初めてトロイ（TROI）とクロトス（KROTOS）装置を用いてそれぞれ 6 回、計 12 回の外部トリガーに実験を行った。これらの実験から、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。すなわち、現象をモデル化する際、不確定な部分を減らすためである。たとえば、溶融物の成分の違い、酸化の影響の程度、発生する水素の影響、ボイド率⁶⁹の影響、などについてである。2

⁶⁶ SESAR (Senior Group of Experts on Nuclear Safety Research) は、CSNI が 1992 年に組織した。グループでは、安全研究が有すべき機能と研究施設について検討を開始した。そして、研究の必要性があるにも拘らず、単独の国や機関では維持することが困難な施設を国際社会で共同運営する方向について検討した。2001 年に報告書を刊行している。

(<http://www.nea.fr/html/nsd/reports/nea3144-research.pdf>).

⁶⁷ FCI…Fuel-Coolant Interactions；燃料－冷却材相互作用」のことで、水蒸気爆発を含む溶融燃料と冷却材の熱的相互作用のことである。

⁶⁸ 「FCI の残された研究課題」の具体的な点は、主に解析コードの精度向上及び爆発の大きさの定量化であろう。特に溶融物の過熱度（融点以上の温度）、共晶か非共晶による溶融物組成の影響、空間幾何形状効果を含む水蒸気爆発の大きさへの影響に関する知見を拡充することを目的に実験が実施された。

⁶⁹ ボイド率… 単位体積の混相流体中に各相が占める体積割合を、それぞれの相のボイド率という。気液二相流では一般に気相の体積割合を単にボイド率と呼び、液相の体積割合をホールドアップという。

（機械工学辞典）

種類の装置を使ったのは、主に水槽の形状（3次元と1次元）が爆発の激しさ（プロパゲーション機構の持続の有無）に及ぼす影響を確認するためである。

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。トリガーの大きさなどはここでは全く問題ではない。

セレナ（SERENA）計画では、自発的な水蒸気爆発の発生を否定することは最初から目的としてない。むしろ放棄していると言ってもよい。溶融金属やマグマなどの高温溶融物が、実際に自発的な水蒸気爆発を起こすことは周知の事実（前提）であるからである。セレナ（SERENA）計画は、むしろ、どの程度の爆発が起こるかを、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。しかし、結局、把握できたとは言えず、その意味ではセレナ（SERENA）計画は、当初の目的を十分には達成できなかったのではないかと理解している。

3.5.4 セレナ（SERENA）計画の実施手法

フェーズ1は、2002年1月に開始された。

フェーズ1では、既存の実験データ（ファロ(FARO)のL-14, L-28, L-33, クロトス(KROTOS)のK-44およびトロイ(TROI)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), ②JASMINE⁷⁰⁾(developed by JNES), ③JEMI-IDEMO (developed by IKE), ④TEXAS-V (developed by UW), ⑤TRACER-II (developed by KMU)である⁷¹⁾）に入力して、解析を行い、実験結果と比較された。コテルス（COTELS）の実験データは解析対象とはされなかった。現実の原子炉压力容器から流出して（メルトスルー）、炉外で発生する水蒸気爆発の解析も行われた。

爆発実験については、L-33のほかにK-44とTROI-13を選んで解析した⁷²⁾。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。これは以下の5つの作業項目に分かれている。

（1）原子炉内のFCI（燃料－冷却材相互作用）に関連する条件の特定（計算に必要な、物性値や幾何形状などの境界条件などのすり合わせ）

（2）ジェット⁷³⁾の崩壊と、水蒸気爆発の初期状態である粗混合(coarse mixing)（あるいは予混合(premixing)とも呼ばれる）を計算するためのさまざまな計算コードの選択

（3）爆発段階を計算するためのさまざまな計算コードの比較

（4）原子炉への適用とその計算

（5）計算結果のまとめと導かれる事項

⁷⁰⁾ジャスミン（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。

⁷¹⁾ NEA/CSNI/R(2014)15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions, February 2015.

⁷²⁾ NEA/CSNI/R(2007)11, OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA Final Report - December 2006, p.29.

⁷³⁾ 溶融した炉心が、柱状の液体となって冷却水プールに落下あるいは噴流となって突入する。

説明の図15は、"Kiyofumi MORIYAMA, Yu MARUYAMA and Hideo NAKAMURA, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014、" のものである。

ここで、(2)のジェットとは、図15に示したような高温溶融物の噴流のことをさしている。また、粗混合または予混合(Pre-mxing)とは、「高温融体が、低沸点液体中に落下した場合に、瞬時に膜沸騰蒸気膜に包まれ、低沸点液体から隔離されている高温融体の分散、混合状態」のことであり、「どの程度保持されるかにより、水蒸気爆発の規模が左右される」⁷⁴ことになる点で、重要な過程である。粗混合状態で膜沸騰状態が維持されない場合は、溶融物が、順次激しい沸騰を継続して固化するだけで、水蒸気爆発とはならない。すなわち、激しい水蒸気爆発となるためには、爆発に寄与する高温溶融物の熱エネルギーを瞬時に（視覚的には同時に）に水に伝える必要がある。熱エネルギーは高温液融体の量に比例する。したがって、水蒸気爆発の激しさは、粗混合状態の高温液体の質量に因るのである。

プロジェクトでは、「特に、粗混合の最初の状態で溶融物の先端が容器底部に接触した際に、しばしば発生する自発的な水蒸気爆発の粗混合過程の崩壊機構の解明も目指した。（原文：The break-up mechanisms were also investigated, particularly in the first phase of the premixing up to melt front-bottom contact, where spontaneous steam explosions often trigger in the experiments.）」⁷⁵。しかし、必ずしも実際に発生する水蒸気爆発が再現できているわけではないことを確認しておく必要もある。計算コードは、実際の自発的な水蒸気爆発をモデル化したものではない。例えば、実際の水蒸気爆発では、細粒化される粒子に分布があるのに対し、計算コードでは、ジェットから派生した液滴のみが、外部圧力波で一定の大きさの粒子（例えば、直径0.05mm）に細粒化されるという単純な細粒化モデルに基づいてつくられており、実際とは異なる。

フェーズ2では、実験的検討、解析的検討、実機への適用検討の3個の作業を行った。特に、(1)粗混合と細粒化過程におけるボイドの形成過程、(2)溶融物の組成と、粗混合と細粒化過程、その後の水蒸気爆発の激しさとの物理的な関係を把握する事をめざした。

3.5.5 セレナ（SERENA）計画で得られた結果

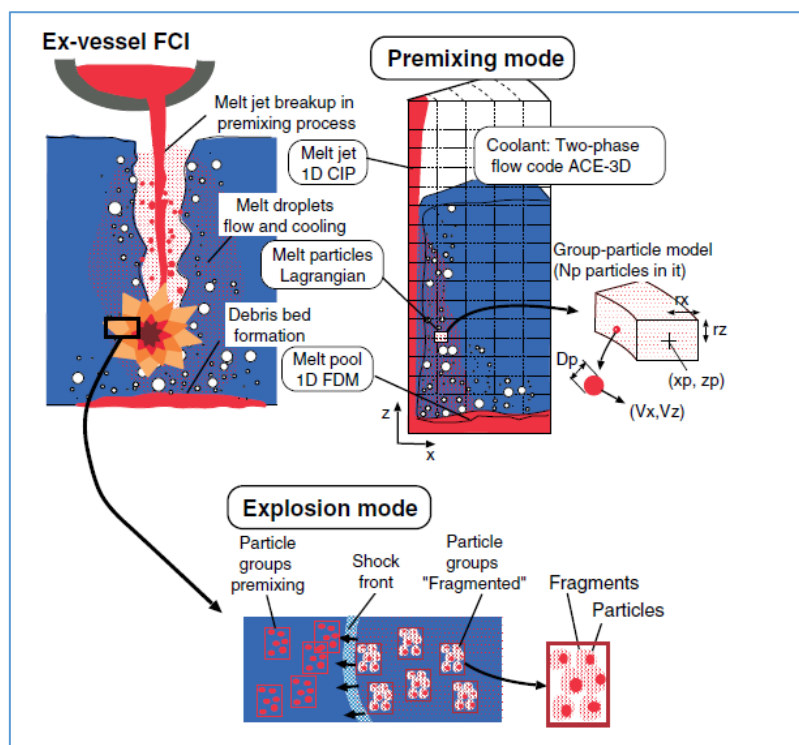


図15 ジャスミン（JASMINE）における粗混合のモデル⁷⁰

⁷⁴成合英樹, シビアアクシデントの伝熱流動現象における素過程に関する研究－急速相変化と界面挙動－, JAERI-Tech 2002-009, p.3.

⁷⁵NEA/CSNI/R(2007)11, OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA Final Report - December 2006, p.7.

実験的検討で得られた結果の一つは、①水蒸気爆発のエネルギー変換効率(Steam explosion efficiency ratio(%))⁷⁶が～0.6%と低い値であったことである。

さらに、②解析的検討では、細粒化の挙動と水蒸気泡（ボイド）の挙動が、水蒸気爆発に関与する高温溶融物の量を決定する重要な要素であることが分かった。また、③高温溶融物が、水中で冷却されることで生じる、粒子表面の固相である殻（シェル）の凝固効果を導入することが解析コードのモデルの改善に重要であること、などが判った。

実機への適用検討では、実験で得られた粗混合や細粒化過程の知見を、計算モデルに反映することによって、解析コード間のバラツキを以前より減少させることができた。

実験では、変換率が低いことが明らかになったものの、フェーズ1の結論では、「炉外水蒸気爆発時の計算されたすべての負荷は、キャビティ⁷⁷の壁面の許容値以上となった。（報告書原文：For ex-vessel steam explosion all the calculated loads, even low, were above the capacity of a typical cavity walls.）」ことがわかった⁷⁸。これを受けて、フェーズ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。

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の発生する水蒸気爆発となるというものであった。

重要な点なので、具体的な数値を示してみる。「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⁷⁹は、加圧水型で底部で150kPa・s、側壁面で125kPa・sとなり、沸騰水型ではそれぞれ110kPa・sと90kPa・sとなった。なお、キャビティの壁に及ぼす力積は100kPa・s以下でなければいけない（報告書原文：Reactor case calculation with FCI codes, performed for PWRs and BWRs ex-vessel generic configuration, have shown impulses of 150 kPa・s at bottom and 125 kPa・s at wall for PWRs and 110 kPa・s at bottom and 90 kPa・s at wall for BWRs. For impulses to remain on the safe (not too conservative) side, the level of dynamic load to the cavity wall needs be lower than 100 kPa・s.)」⁸⁰とある。すなわち、代表的な計算モデルにおいて、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。

セレナ（SERENA）計画の報告書にあるこの結論を得た解析コードの中には、日本のジャスミン（JASMINE）コードも含まれている。ジャスミン（JASMINE）コードの目的は実機における水蒸気爆発の負荷の評価である。

⁷⁶溶融物の保有する熱エネルギーが、水の運動エネルギーに変換される割合である。

⁷⁷キャビティとは原子炉容器の真下にある空間のことで、ペデスタル内側の原子炉下部キャビティともいう。

⁷⁸NEA/CSNI/R(2007)11, OECD RESEARCH PROGRAMME ON FUEL-COOLANT INTERACTION STEAM EXPLOSION RESOLUTION FOR NUCLEAR APPLICATIONS - SERENA Final Report - December 2006, p.8.

⁷⁹力積 $N \cdot s$ とは、物体に作用する力 N と作用する時間 s の積を表わす。セレナ（SERENA）の報告書では、単位面積当たりの力積 $Pa \cdot s$ を用いている。

⁸⁰NEA/CSNI/R(2017)15, Status Report on Ex-Vessel Steam Explosion, (2018-3), p.12.

日本原電は、東海第二では、ジャスミン（JASMINE）コードなどによる解析で、「S E（筆者注：Steam Explosion のこと）時のペデスタルに発生する応力やひずみは判断基準を満足し、S E後においても変位の増大はないことから、ペデスタルに要求されるRPV（筆者注：Reactor Pressure Vessel 原子炉圧力容器のこと）支持機能及びデブリ保持機能が損なわれないことを確認した。したがって、S Eの発生を想定した場合であっても、格納容器の健全性は維持される」⁸¹としている。しかし、計算に用いた条件はすべて隠されており、確認できない。解析結果は解析条件によって大きく変わる。たとえば、圧力容器からのメルト放出口直径ひとつとっても、日本原電は実機条件を5cm～15cmとしている⁸²が、これは明らかに過小評価であろう。なぜならば、森山らの解析⁸³では、ジェット直径をベースケースで0.5m、図16に示すように、セレナ（SERENA）計画でも放出口直径は0.5m、メルト温度2950Kとして解析することを定めている⁸⁴。セレナ（SERENA）プロジェクトの結論とは大きく異なっている。その理由を示すべきであろう。

図17は、ジャスミン（JASMINE）コードのBWRの解析モデルである。ペデスタル領域で水蒸気爆発が生じた場合と、圧力抑制プールで生じた場合について解析を行っている。日本原電は両者について解析したのだろうか。おそらく、水深を1mとして（森山らは2mとしている）、ペデスタル領域でのジャスミン（JASMINE）のベースケース⁸⁵の条件でしか解析を行っていないと推定される。だとしたなら、検討は不十分と言わざるを得ない。

この項の最後に、セレナ(SERENA)計画とそれまでに行われた水蒸気爆発実験の時期を表にしたものを示す。この表3の示すことは、セレナ(SERENA)計画がファロ（FARO）、クロトス（KROTOS）実験の

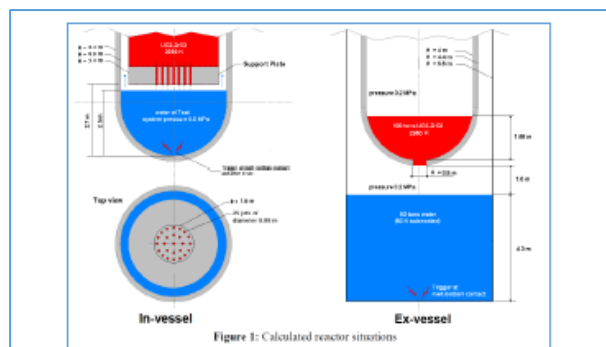


図16 SERENA計画での炉内および炉外水蒸気爆発の計算条件

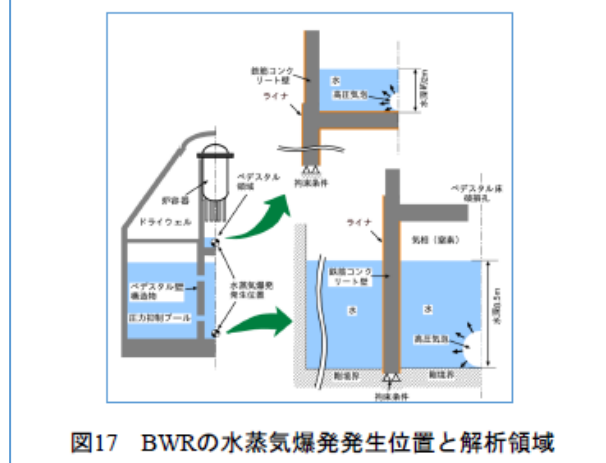


図17 BWRの水蒸気爆発発生位置と解析領域

⁸¹ 日本原子力発電株式会社，東海第二発電所 ペデスタルでの物理現象発生 に対する対応方針（添付資料），2017年6月 添付 12-5 p.235. (https://www.japc.co.jp/plant/tokai/shinsa/pdf/20170620_2.pdf)

⁸² 東北電力株式会社ほか，重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第5部 MAAP）添付2 熔融炉心と冷却材の相互作用について、2015年10月 p.5-2-17.

⁸³ 森山清史・ほか4名，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，JAEA-Research 2007-072，p.11.

⁸⁴ D. Magallon et al., FCI Phenomena Uncertainties Impacting Predictability of Dynamic Loading of Reactor Structures (SERENA programme), Workshop on Evaluation of Uncertainties in Relation to Severe Accidents and Level 2 Probabilistic Safety Analysis Hotel Aquabella, Aix-en-Provence, France, (November 7-9, 2005), p.9/12.

⁸⁵ ベースケースとは、初期・境界条件（初期圧力/温度など）や粗混合パラメータ（融体粒子径など）7個のうち代表的と思われる値をとるケース。

結果を受けて行われたものであるということである。仮に、日本原電が主張するように、実機事故時には水蒸気爆発は極めて起こりにくいことが1999年に終了したファロ（FARO）、クロトス（KROTOS）実験によって明らかになったのであれば、2001年からセレナ（SERENA）計画を実施する理由がない。自発的水蒸気爆発の発生が確認された2001年から溶融燃料を相当試料で実験が開始され、自発的水蒸気爆発の発生が確認されたトロイ（TROI）実験の結果も加味して、「水蒸気爆発は起こり得る。発生時にはどのような爆発となるのか」を解析する必要に迫られて、セレナ（SERENA）計画を実施したと理解すべきである。

3.6 アルファ（ALPHA）実験とジャスミン（JASIMINE）コードの関係

日本だけに限って言えば1992年までに大規模水蒸気爆発実験（アルファ（ALPHA）-STX実験）は終了

表3 各種水蒸気爆発実験・研究計画の実施年

プロジェクト名／実験装置	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
原研	ALPHA				JASMINE-pre※1			JASMINE-pro v.2※2		
FARO										
KROTOS										
TROI										
COTELS								1999?		
蒸気爆発の動力学※3										

※1 蒸気爆発の「粗混合」過程を扱うJASMINEコード

※2 蒸気爆発の「伝播」過程を扱うJASMINEコード

※3 科研費重点領域研究

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
原研				JASMINE v.3						
FARO										
KROTOS										
TROI※4										
SERENA I										
SERENA II										

※4 prototypal corium material since 2001

	2010	2011	2012	2013	2015	2016	2017	2018	2019	2020
TROI							TROI-82			
SERENA I										
SERENA II										

	2021	2022	2023
TROI	継続中		

している。得られた結論は、原発での事故時には自発的水蒸気爆発が起こりうるというものであった(図18)。これを受けて、日本原子力研究所では、水蒸気爆発解析コードの開発することに研究方針を定めた。そのようにして開発されたのがジャスミン(JASMINE)コードである。つまり、ジャスミン(JASMINE)コードの目的は実機における水蒸気爆発の負荷の評価である。

本来、大規模水蒸気爆発実験は解析コードの検証用のデータを得ることが目的であるが、ジャスミン(JASMINE)コードの能力が満足できる段階に到達するのに時間を要した。そのため、アルファ(ALPHA)-STX実験のデータを解析コードの検証データとして十分には利用できなかった。コードの開発は1994年からはじめ、1995年に粗混合用コードであるジャスミン(JASMINE)-preを作成し(筆者注：

preは予混合premixingの意味)、1997年から伝播・拡大コードのジャスミン

(JASMINE)-proの開発を開始し(筆者注：proは伝播(propagation)の意

味)、1999年には両方のコードを統一して、水蒸気爆発の全過程を計算できるようになった(表3参照)。その後改良を重ねてVer.3を完成さ

せ、セレナ(SERENA)計画の一翼を担った。

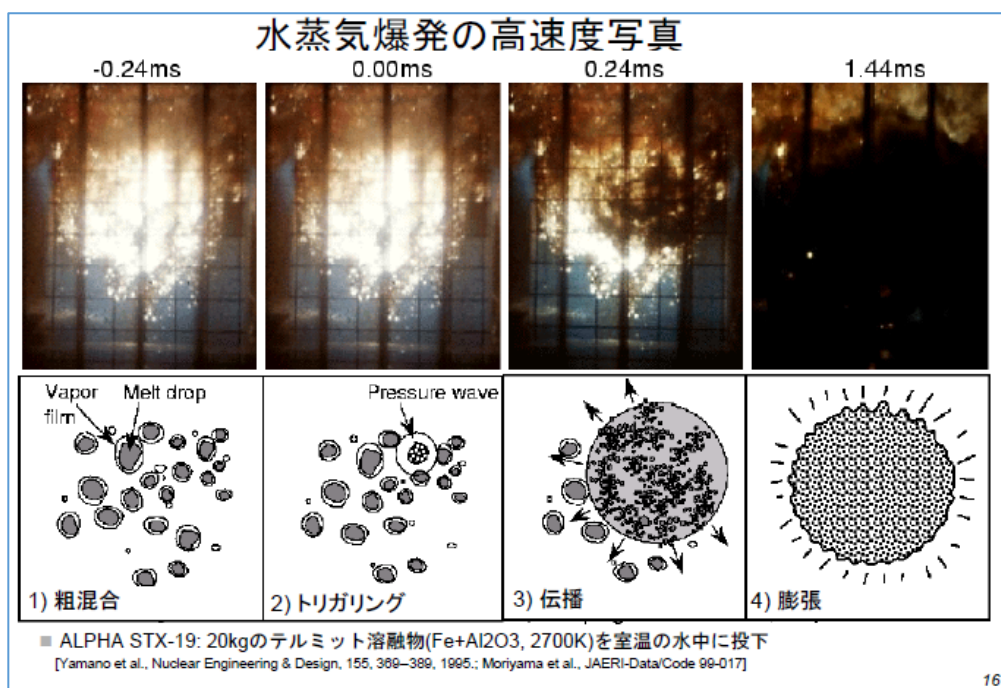


図18 アルファ(ALPHA)-STX実験における自発的水蒸気爆発⁸⁶⁾

4. 規制委員会の審査とセレナ(SERENA)報告書の扱い

改正原子炉等規制法では「最新の知見を技術基準に取り入れ」それに基づいて規制を実施することになっている⁸⁷⁾。しかし、原子力規制委員会による東海第二原発の審査において、セレナ(SERENA)プロジェクトの結果が参照された痕跡は認められない。

セレナ(SERENA)計画では、炉心溶融事故時には「水蒸気爆発が発生することを前提」にしているのに対し、日本原電及び規制委員会の規制方針は、「水蒸気爆発はきわめて発生しにくく」、事実上起こらないとしていることが前提となっている。

規制委員会の審査では、ファロ(FARO)、クロトス(KROTOS)実験など酸化ウランを主成分とする溶融物実験の結果から水蒸気爆発発生の有無を判断しているだけで、溶融物組成による水蒸気爆発発生

⁸⁶⁾Yamano et al., Nuclear Engineering & Design, 155, 369-389, 1995.; Moriyama et al., JAERI-Data/Code 99-017

⁸⁷⁾原子力委員会, 「平成29年版 原子力白書」HTML版

<https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2018/1-2.htm>

のしやすさの相違などは考慮されていない。例えば、トロイ (TROI) -4, 5, 15 では自発的な水蒸気爆発が確認されている。この時の溶融物はジルコニア (ZrO_2) である。ジルコニアはコリウム(UO_2ZrO_2 の 7.3~8.2 混合物)と比べて密度が小さく、比熱が大きいこともあってか、自発的な水蒸気爆発が発生している。アルミナとコリウムの中間的な結果を示す。トロイ (TROI) 実験では、2001 年の論文ですでに「 ZrO_2 と水の系では、冷却材のサブクール度がそれほど大きくなくても、自発的な水蒸気爆発を引き起こした (原文: The ZrO_2 /Water system induced spontaneous steam explosion, even though the subcooling of coolant was not very high.)」⁸⁾と結論付けている。なお、クロトス (KROTOS) の実験でアルミナは自発的に水蒸気爆発を生じやすいことがわかっている。

トリガーは水蒸気爆発発生のための条件の一つである。水蒸気爆発発生のためには、①膜沸騰状態での粗混合、②膜沸騰蒸気膜を破壊 (あるいは崩壊) するためのトリガー、③高温溶融物の細粒化 (微粒化ともいう)、④現象の拡大伝播の過程が必要となる。

このうち自発的に発生する水蒸気爆発のトリガーについては、溶融物の先端が水槽底部に到達したときに発生する⁹⁾ことが多いことが観察されている。水槽底部では、蒸気膜中の水蒸気が凝縮して、水蒸気が水に戻り水蒸気膜が消滅する。このため、水槽底部と溶融物間に少量の水が残存するなどして、水槽底部との間で突沸 (自発核生成による沸騰) が生じるであろう。この際の蒸気泡の体積膨張がトリガーになると考えられている。

しかし、それに止まらず、底部に到達する前にも、自発的に爆発することがある。この原因については後述するように諸説あり、スズや鉛などの比較的低融点の金属の場合、膜沸騰から核沸騰に遷移する際に、金属がまだ液体であるため、液液接触が生じて爆発に至るという説、あるいは、銅などの高融点の金属の場合、溶融金属から針状のフィラメントが水中に伸びることによって、局所的な蒸気膜の崩壊が起こり、全体に広がって大規模な水蒸気爆発に至るという説等がある。多くは、実験的エビデンスを元に提案されたトリガーモデルであり、多様なトリガーがあることを示している。

なお、溶融アルミニウムは水蒸気爆発事故をしばしば起こしているが、実験室規模で自発的な水蒸気爆発を発生させたという報告は、寡聞にして知らない。これまでは、水槽底部の性質が大量のアルミとの間に水を囲い込む場合のみ、自発的な爆発が生じると考えられてきた。しかし、洪水によって岡山県総社市で大規模なアルミ溶解炉の水蒸気爆発事故が起こったように、まだ確認されていないトリガーが存在することは確実になっている。溶融物に水が流れ込んだものか、あるいは溶解炉に鉄材やパイプなどの金属類や、石など鉱物類などの水以外のものが飛び込み、アルミと水の間の蒸気膜を破壊するような作用をした可能性も否定できない。

このように、かなり頻繁に発生する金属工場での水蒸気爆発についてさえ、水との接触の可能性の有無までは明らかになっているものの、爆発発生のトリガーに関してはほとんど分かっていないというのが実状である。さらに、自然界ではマグマ水蒸気噴火と言われる現象が確認されているが、実験室規模

⁸⁾ I. K. Park, Y. J. Chang, Y. S. Shin, C. H. Kim, B. T. Min, S. W. Hong, J. H. Song and H. D. Kim, Steam Explosion Experiments in the "Test for Real cOrium Interaction with water (TROI) Program, Transactions, SMiRT 16(2001), p.8.

⁹⁾ 例えば、森山清史, 丸山結, 中村秀夫, 溶融シリコンの水蒸気爆発に関する研究, JAERI-Research 2002-021, p.8(2002).

で溶融マグマと水のマグマ水蒸気爆発を再現したものはない。ことほど左様に、実際の現象は再現が難しいのである。

したがって、実験室規模での数回の実験結果から実機でのトリガーの有無や、爆発発生の有無を断定することは難しいと思われる。

セレナ（SERENA）計画では、水蒸気爆発の格納容器破損への影響について、解析コードによって定量化を試みている。これに対し、規制委員会のシビアアクシデント規制方針では、セレナ（SERENA）計画と考え方を根本的に異にしているため、水蒸気爆発の発生と、その時の発生負荷と原発構造物の耐久性に関する検討を不問にして、キャビテイに水を張って冷却することを認めているものと言える。

5. 水蒸気爆発におけるトリガーの重要性

5.1 トリガーの分類

Buriggs⁹⁰によって報告されているように、1980年のOECDの専門家会議で、水蒸気爆発が発生するために必要な4段階について合意された。この中でトリガー段階に関しては、「自発的または外部圧力パルスによる膜沸騰の不安定化」（原文：Destabilisation of film boiling either spontaneously or from an external pressure pulse）というように、外部トリガーとしては圧力変動のみを具体的な要因として挙げた。このためか、原子力の分野では、トリガーは外部圧力波しか想定していないように思われる。

しかしながら、外部トリガーによる水蒸気爆発はもちろん確認されているが、溶融金属による水蒸気爆発事故やマグマ水蒸気爆発などでは、外部トリガーなしに自発的に発生することが多い。このような水蒸気爆発でトリガーに関しては、外部圧力波の存在が必要条件とは考えられない。

日本原電は、「これまでの各種実験結果によっても、＜中略＞外部からの強制的なトリガーを与えない場合には水蒸気爆発は発生せず」、「本件発電所の実機条件では、このような（KROTOS試験の

表4 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）	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 2B3. 水の強制流動

⁹⁰ A.J.Briggs, Steam Explosion and Reactor Safety, CSNI Report No.74, p.7(1982).
(<https://www.oecd-nea.org/docs/pdf/csni82-74>)

トリガーのこと：高島注）圧力外乱となる要因は考えられず」⁹⁾、仮に炉心熔融が起こって水中に落下しても、水蒸気爆発が発生するとは考えられない旨の主張をしている。本当だろうか？ 水蒸気爆発の研究は、1950年代の後半から始められて、現在も実験的研究、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。

トリガーに関しては、トリガーはOECDの合意にもあるようにA.自発的トリガー、B.外部トリガーとに分類される。外部トリガーによる「膜沸騰の不安定化」は、(1)圧力急変による場合、(2)2液体の相対速度(速度差)による場合、(3)冷却材温度の急変(低下)による場合、が考えられる。

(1)、(2)は「力学的要因」、(3)は水蒸気膜内の水蒸気の凝縮を促すもので、「熱的要因」と分類できる。結局、自発的トリガー、外部トリガーについて、それぞれ力学的要因、熱的要因で、個々のトリガー事項が分類できる。各マトリクスとも複数の事項が考えられる。全て網羅できたわけではないが、実験的に確認できたものをあてはめて、その多様性を明らかにして分類を試みた。分類の結果を表4にまとめた。

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。日本原電など電力事業者各社が言うように、「水蒸気爆発を発生させる外部トリガーが存在しない」と断定することはできない。

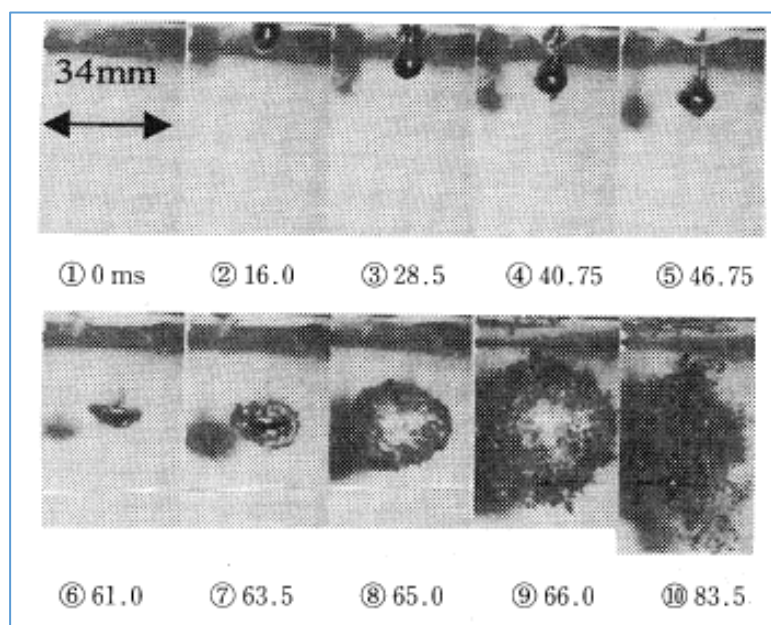
以下に、それぞれのトリガーの概要を説明する。あわせて、それらのトリガーの文献例を示す。

5.2 自発的トリガーの説明

5.2.1 自発的トリガーのうちの熱的要因の説明

・1A1凝縮（溶融物温度低下に伴う水蒸気凝縮）

溶融すず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。代表例として、高島の研究⁹⁾をあげる。図19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、溶融金属液滴が水面に到達した時間を0msとしている。金属液滴が膜沸騰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しながら、液滴底部か、あるいは笠状液滴の縁部で蒸気膜の一部が崩壊し始める(トリガー)。蒸気爆発が開始していることが見て取れる。これは溶融物先端(底部や縁



⁹⁾ 日本原子力発電株式会社 準備書面(10), pp.255-256. 図19 自発的トリガーによる爆発例

⁹²⁾ 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.

部)の温度低下に伴い、水温が常温程度であることから凝縮の作用もあり、蒸気膜の維持ができなくなったことによると推定される。

・ 1A2 遷移沸騰⁹³

米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)の D.Swift らは、溶融金属と溶融ナトリウムの実験によって、ナトリウムの膜沸騰から核沸騰⁹⁴に遷移するときに蒸気爆発が発生することを見出した。このことから、遷移沸騰領域での、ナトリウム蒸気泡の急成長・急消滅がトリガーとなると考え、violent boiling モデルを提案した⁹⁵。

低温液が水の実験でも、融点がおおよそ 800°C以下の金属（スズ、鉛、ウッドメタルなど）では、膜沸騰から核沸騰に遷移する時に、爆発が生じることがある。遷移沸騰モデルは、このような金属の水蒸気爆発の発生を説明するのに適している。

・ 1A3 微量水の囲い込み・閉じ込め

溶融燃料を想定した高融点溶融物の自発的水蒸気爆発は、高温液ジェットの先端が水槽底部に達した時に、発生することが多い。溶融物と水槽底の間に、微量の水が囲い込まれるか、あるいは閉じ込められると、過熱（沸点以上の温度まで加熱される）され、自発核生成による急蒸発となる。この際に発生する圧力波が、周囲の蒸気膜を連鎖的に破壊するトリガーとなると考えら

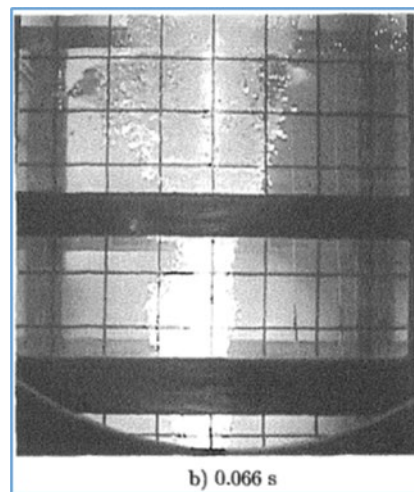


図 20 自発的トリガー例 (1A3)

れる。Magallon⁹⁶も同様の見解を示している。このメカニズムは浅い水深でも起こり得る。極く浅い水深で起こるベーストリガー型の水蒸気爆発のトリガーもこのようなメカニズムによると思われる。

⁹³ 遷移沸騰…「限界熱流束」と「極小熱流束」との間の高温物質表面温度領域における沸騰。「限界熱流束」は、最も移動する熱量の密度が大きい核沸騰の上限温度の熱流束に相当する。また、「極小熱流束」は、膜沸騰の下限温度時の熱流束に相当する。膜沸騰が、高温液表面の温度降下によって遷移沸騰に達した時、急蒸発となり水蒸気爆発になるというもの。膜沸騰から遷移沸騰になる最小膜沸騰温度 T_M は、水温 T_c によって異なり、水の飽和温度（大気圧では 100°C）を T_{sat} とすると

$$\Delta T_M = 101 + 8 \Delta T_{sub} \quad (\text{Dhir and Purohit の式})$$

（文献：V.h.Dhir and G.P.Purohit, Nucl. Engng. Des., 47(1978), p.49.）

と求まる。ここで、 $\Delta T_M = T_M - T_{sat}$ 、 $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_c$ であるから、水温 $T_c = 20^\circ\text{C}$ の時は、膜沸騰から遷移沸騰に遷移するときの高温溶融物の温度は最小膜沸騰温度 T_M とすると、841°Cとかなり高い温度になる。この状態で液体であれば、液液接触となり、水蒸気爆発が発生すると考えることができる。

⁹⁴ 核沸騰…加熱面と直接に接する液体が気泡生成を伴いながら沸騰する形態（機械工学辞典，日本機械学会）。

⁹⁵ S.G.Bankoff et al., Liquid-Liquid Surface Impaction Annual Progress Reportt, Report No.COD-2512-9, p.1 (1976).

⁹⁶ B.R. Sehgal, P. Piluso, (Editors), Rapport CEA-R-6194 (SARNET LECTURE NOTES ON NUCLEAR REACTOR SEVERE ACCIDENT PHANOMENOLOGY), 2008, Commissariat l'nergie Atomique France. Chapter VI Steam Explosion in Light Water Reactors (D. Magallon), p.VI-173.

図 20 は、日本原子力研究所（現 日本原子力開発研究機構）の森山ら⁹⁷による、溶融シリコンと水の自発的水蒸気爆発の写真例である。Song ら⁹⁸は、溶融炉心相当溶融物を用いたトロイ（TROI）実験で自発的水蒸気爆発の発生を報告している。この時の水蒸気爆発もこのタイプのトリガーと思われる。

5.2.2 自発的トリガーのうちの力学的要因の説明

・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）

2 種類の不安定現象について説明する。一つは①レーリー・テイラー不安定(Rayleigh–Taylor instability)あるいはレイリー・テイラー不安定 (Rayleigh–Taylor instability) で、蒸気膜のような密度の小さい流体(図 21 では緑色の層)の上に水などの、より密度の大きい流体（図 21 では青色部分〈水など〉）があり、垂直方向（y 方向）に加速度（重力など）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。

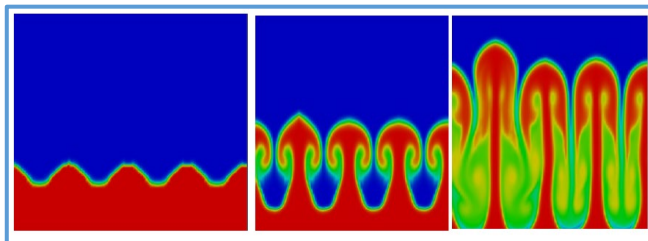


図21 レーリー・テイラー不安定（蒸気膜上の水など）

図 21⁹⁹で、界面の不安定が大きくなると、水（青色の部分）と高温溶融物（下方の赤色の部分）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。

もう一つの不安定現象は、②ケルビン・ヘルムホルツ不安定性（Kelvin–Helmholtz instability）で、密度の異なる流体が、お互いに異なる速度で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 22¹⁰⁰が説明図である（赤い部分が高温融体に、青い部分が水）。

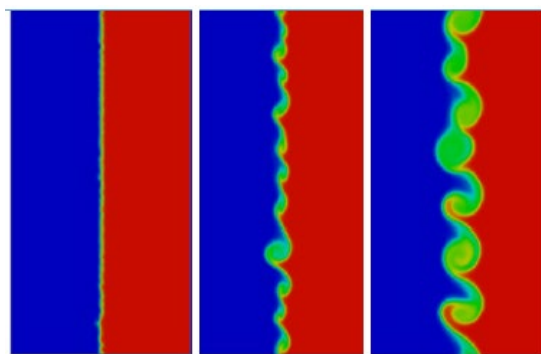


図22 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性

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。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。

実機の事故時のように、高温液体が低温液に流入する系では、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、やはり低温液は突沸を生じて水蒸気爆発のトリガーとなり得る。

⁹⁷森山清史・丸山結・中村秀夫，溶融シリコンの水蒸気爆発に関する研究，JAERI-Research 2002-021,p.9.

⁹⁸ Jin Ho SONG , Seong Wan HONG , Jong Hwan KIM , Young Jo CHANG , Yong, Seung SHIN , Beong Tae MIN & Hee Dong KIM, Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 10, p. 783–795 (October 2003).

⁹⁹密度差に起因する流体不安定性（<http://case.advancesoft.jp/FrontFlowred/KH-RT-instability/index.html> の上下反転）

¹⁰⁰速度差に起因する流体不安定性（同上を半時計方向に 90 度回転）

2018年7月の西日本豪雨の際に、岡山県総社市アルミニウム溶解工場で爆発事故が起きた。アルミニウム溶解炉に、洪水の水が流入したことで発生したと考えられる。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。

さらに、自然界では、外部トリガーは必要としないマグマ水蒸気爆発が発生している。火山地形の1つであるマール(maar)¹⁰¹は、火山学会のHPでは以下のように説明されている。

すなわち、「マグマが地下水と急激に反応すると、水蒸気マグマ爆発と呼ばれる、激しい爆発が起こります。マグマと水の接触の割合によって、その爆発力は連続的に変化しますが、その中でも激しい爆発が起こったときに作られる火山地形がマールです。爆発力が強いために大きな火口が作られますが、噴出物は広い範囲にまき散らされるので火口の周りにはごくわずかの堆積物しか残しません。地下から上昇してきたマグマと地下水が接触して爆発が起こるので、その爆発は地下水面（地下水の上面）よりも下で起こります（つまり火口の底は地下水面より低い）。そのため、噴火が終わると火口は速やかに地下水で満たされます」。「マールの形成には、マグマと水の接触の割合が関係していますから、どこの火山でも見られるという火山地形ではありません。指宿地域は日本でマールが多く見られる地域として有名ですが、この他に秋田県男鹿半島の一の目潟や二の目潟、伊豆大島の波浮港などが代表的なマールの例としてよく知られています。地下水の豊富な海岸付近に比較的多いようです。(9/1/97)井村隆介（鹿児島大・理）」¹⁰²。このようなマグマ水蒸気爆発噴火は、自発的に生じるものである。

5.3 外的トリガーの説明

5.3.1 外的トリガーのうちの熱的要因の説明

・1B1. 水の成層化

水中に急激な温度勾配を設けることによって、水槽中の水を、下層を低温、上層を高温に成層化する。上層中を膜沸騰で通過する高温溶解物が、下層の低温水部分に到達するときに、蒸気膜を形成する蒸気が凝縮して蒸気膜が消滅するとともに、凝縮パルスが発生して、高温液内に微量の水滴が潜り込むような現象を起こすことが考えられる。成層を人為的に用意した場合は外的トリガーに因る水蒸気爆発に分類するが、自然に形成された成層部に落下するときは自発的水蒸気爆発と分類すべきであろう。

庄司ら¹⁰³は、実験と解析により、このような凝縮時に圧力パルスが発生して、水蒸気爆発のトリガーに成りうることを明らかにした。

・1B2. 塩類添加

電力中央研究所の新井ら¹⁰⁴は、アモルファス（非晶質）金属粉末製造には、高温状態で蒸気膜を崩壊させる必要があることから、20wt%という高濃度の食塩水を低温液に用いて溶解金属の急冷実験を行い、80℃という高温の食塩水中でも水蒸気爆発が起こって金属粉末が生じることや、高温固体を用いた

¹⁰¹ 高島武雄・飯田嘉宏，蒸気爆発の科学，裳華房 1998 年，p.124.

¹⁰² 日本火山学会 HP(www.kazan.or.jp/J/QA/topic/topic13.html)

¹⁰³ 庄司正弘・高木二郎・川永慶治・田中尚文，急激な温度こう配をつけた水中で生じる小規模蒸気爆発の研究（冷却液サブクール効果についての検討），日本機械学会論文集B編，1986年 52 巻 479 号 pp. 2633-2839.

¹⁰⁴ 新井崇洋・古谷正裕，塩類添加による蒸気膜崩壊および蒸気爆発の促進効果，Thermal Science & Engineering Vol.15 No.3(2007),pp.91-100.

実験から、高い温度で膜沸騰が崩壊することなどを明らかにした。

本方法は、塩類を添加することで膜沸騰蒸気膜の厚さが薄くなること-utilizedもので、自発的水蒸気爆発の発生を促進するという点で、自発的トリガーとの分類も考えられるが、水に塩類を添加するというアクティブな方法なので、外的トリガーに分類したものである。

・1B3. 低温液強制注入

高温の溶融物中に、金属製細管を沈め、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.¹⁰⁵⁾によって行われた。

図 23 に実験装置の構造を示す。荷重計(図 23 中の FORCE TRANSDUCER)の上の石英つぼ(QUARTZ CRUCIBLE)に入れた溶融塩や UO_2 を、誘導コイルに(INDUCTION COIL)によって外部から通電加熱して融解する。融解の後、上部から金属製注入細管(INJECTION TUBE)を、溶融塩や UO_2 液面下に沈め、あらかじめ用意してあった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。

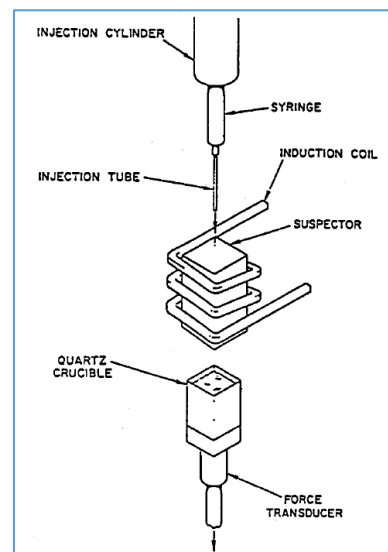


図 23 外発的トリガー例（水注入）

5.3.2 外的トリガーのうちの力学的要因の説明

・2B1. 圧力波の付与（微量液体貫入、スポール破壊）

水蒸気爆発を強制的に起こすために古くから広く用いられてきた方法である。圧力波の発生方法には、少量の火薬によるもの、水中細線放電（エキスプローデングワイヤ、ブラストキャップなどと呼ぶ）によるもの、高圧ガスの放出によるものなどがある。

図 24 は、Nelson et al.¹⁰⁶⁾が用いたエキスプローデングワイヤ(図 24 中の EXPLODING WIRE. 水中で短い金属細線に、大電力を瞬時に加えて放電させる装置)によってトリガーさせる場合の実験装置を示す。図では、鉄の棒の先端部がレーザー(CO_2 LASER BEAM)で加熱され、線香花火の最後のような酸化鉄液滴

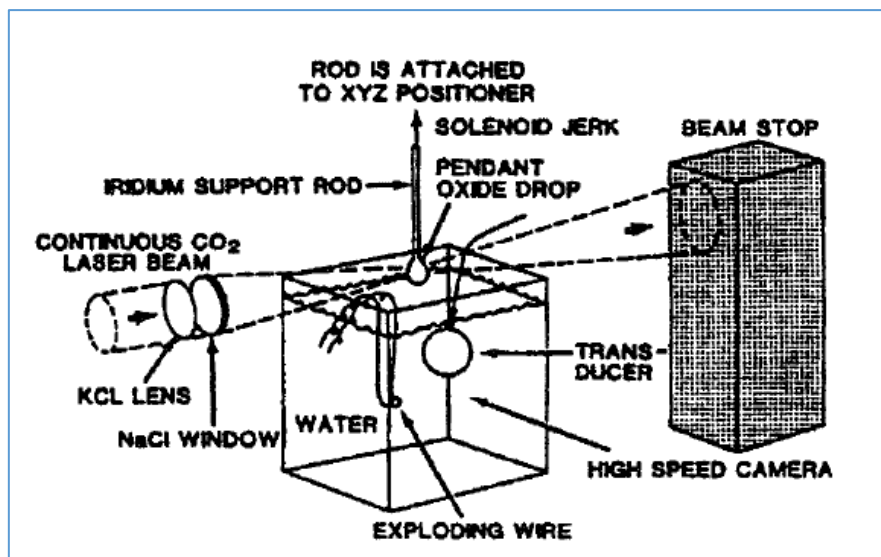


図 24 圧力波でトリガーされる水蒸気爆発実験装置

¹⁰⁵ Armstrong, D.R., Goldfuss, G.T., and Gebner, R.H., Explosive Interaction of Molten UO_2 and Liquid Sodium, ANL/RAS 75-4, Argonne Natl. Lab., (1975). (<https://www.osti.gov/biblio/7353646>)

¹⁰⁶ G. Berthoud, Vapor Explosions, Annu. Rev. Fluid Mech., 2000.32:573-611 の p.585.

(原典は Nelson LS, Duda PM, Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO_2 laser, NUREG/CR-2295, SAND 81-1346 R3, Sandia Natl. Lab., 1981. P.30.)

(PENDANT OXIDE DROP)状態になっている。このあと液滴を支えるイリジウム棒(IRIDIUM SUPPORT ROD)を、ソレノイドで急上昇させて(SOLENOID JERK)液滴を水中に落下させる。

温度が約 2230K の高温液滴は、膜沸騰状態で水中を沈降する。液滴が、エキスプローデングワイヤの位置に来た時に、液滴側面に水中放電による外部圧力波を加えトリガーとする。

高温液の細粒化のモデルは、いくつか提案されている。そのうちの 하나가、液滴の反対側境界面での反射による「スボール応力」¹⁰⁷と言われるの引張応力が発生して、液滴が細粒化するというモデルである。このような現象がトリガーとなり、大規模な爆発現象に至る。

他のモデルとしては、「ジェット貫入モデル」というキムとコラデーニ (Kim and Corradini) ¹⁰⁸のモデルがある。図 25 はその説明図である。このモデルは、圧力波によって低温液(水)と蒸気が不安定化され、「高温液表面を貫入して内部に取り込まれた水は、高温液液滴を破壊しながら急蒸発する(原文: The water that has penetrated under the melt surface evaporates rapidly breaking the droplet. ¹⁰⁹)」というものである。このモデルは実験的には確認されていない。

次に、高圧ガスによる圧力波付与の方法の説明を行う。

図 26 は、高圧ガスの放出によるクロトス (KROTOS) の実験装置である ¹¹⁰。水槽底部にトリガー装置が設けられている。高温溶融物を落下させ、予混合状態の時に水蒸気爆発をトリガーするためにガス圧を解放する。容積が 15～30 cm³ のガス室は、最大 150 bar (約 150 気圧) の圧力まで充填できる。ガス室は厚さが 0.1～0.2mm 金属製の膜 (ラブチャードスク) で閉じられている。空気圧で作動する装置で膜を切断

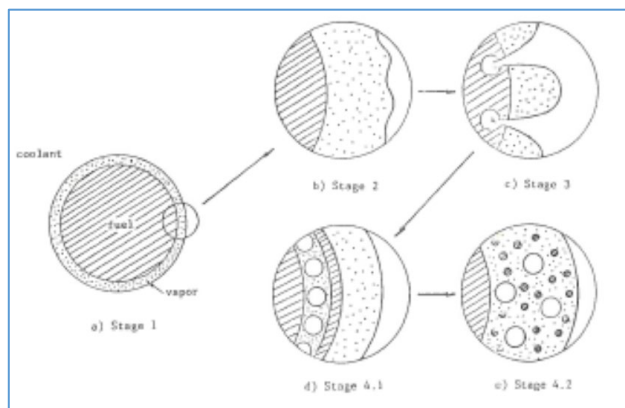


図 25 ジェット貫入モデル模式図

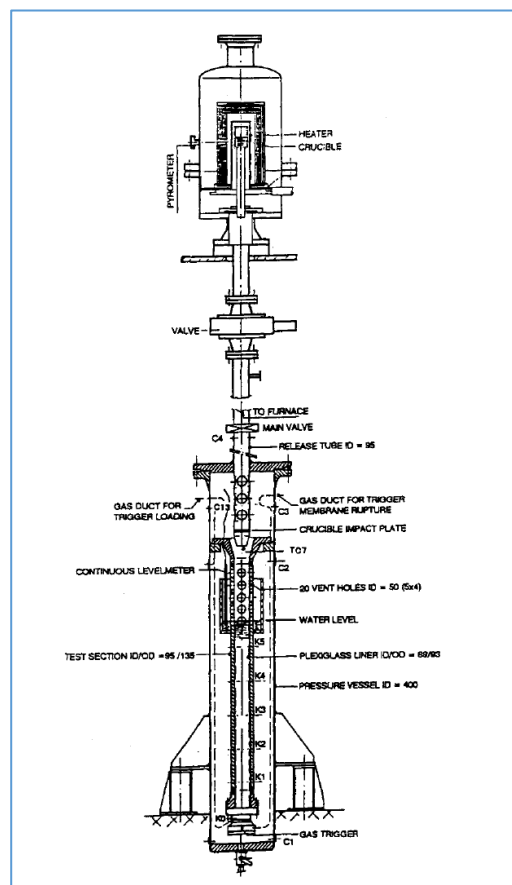


図 26 クロトスのトリガー装置

¹⁰⁷ スボール応力 (破壊) …ホプキンソン効果とも言われ、圧縮応力波が自由端で反射する際、入力応力波と重なり引張応力となって作用する応力を言う。衝撃波によって体内の結石を破碎する治療に応用されている。

¹⁰⁸ Kim, B. and Corradini, M.L., Modeling of Small-Scale Droplet Fuel /Coolant Interactions, Nucl.Sci.Eng., Vol.98, pp.16-28(1988).

¹⁰⁹ Vaclav Tyrpekl, Material effect in the fuel – coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Doctoral Thesis Université de Strasbourg, 2012, p.41 and p.42.

¹¹⁰ H.S.Park, R.Chapman and M.L.Corradini, Vapor Explosions in a One-Dimensionnal Large Scale Geometry with Simulant Melts, NUREG/CR-6623 P.42.(1999).

することによって、高温溶融物、水、水蒸気からなる粗混合領域に、垂直上方に圧力パルスを伝播させ、水蒸気爆発を発生させるトリガーとする。

・2B2 異物の侵入

加熱融解した溶融塩（硝酸リチウム LiNO_3 ）の液滴と、エタノールによる飯田・高島ら¹¹¹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。高温溶融物にとっては、金属針と言う異物が侵入してきた事態になる。

図27は、エタノール中を沈降する高温の溶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¹¹²。④で液滴の蒸気膜が崩壊しており、針に接触という事象がトリガーとなって、蒸気爆発に至る過程が確認できる。

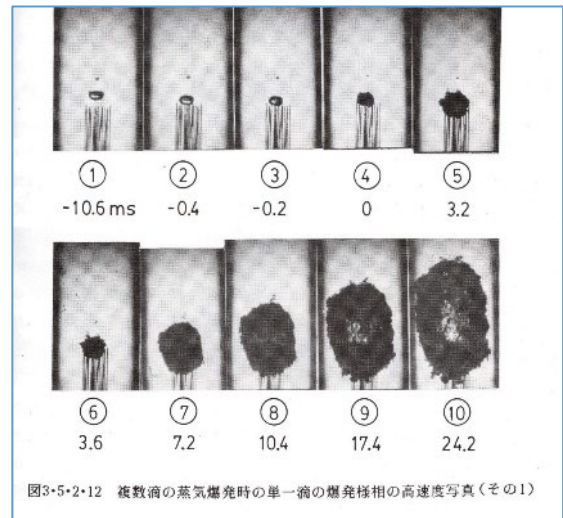


図3・5・2・12 複数滴の蒸気爆発時の単一滴の爆発様相の高速度写真(その1)

図27 異物の侵入によるトリガー

5.4 実機で考えられるトリガー

炉心溶融事故が発生して、圧力容器底部が溶融して穴が開き溶融物が、水プールに落下した際、水蒸気爆発が発生するときに考えられるトリガーについて述べる。水深が浅い場合と深い場合、さらに水深によらない場合について、代表的なトリガーについてひとつずつ説明する。

(1) 水深が比較的浅い場合…実機相当溶融物を使用したトロイ (TROI) 実験に於いて、自発的な水蒸気爆発の発生が確認されている。この時の写真等が掲載された報告が見当たらないが、経過時間などから、溶融物先端が水槽底部に到達したときに発生するとしている。この実験での水深は67cmであった。

一方、森山ら¹¹³の溶融シリコンと水による実験でも、同様のトリガー事象での水蒸気爆発が発生することが報告されている。

図28は高速度撮影の写真から水蒸気爆発開始前後のフレームを示したものである。溶融シリコン

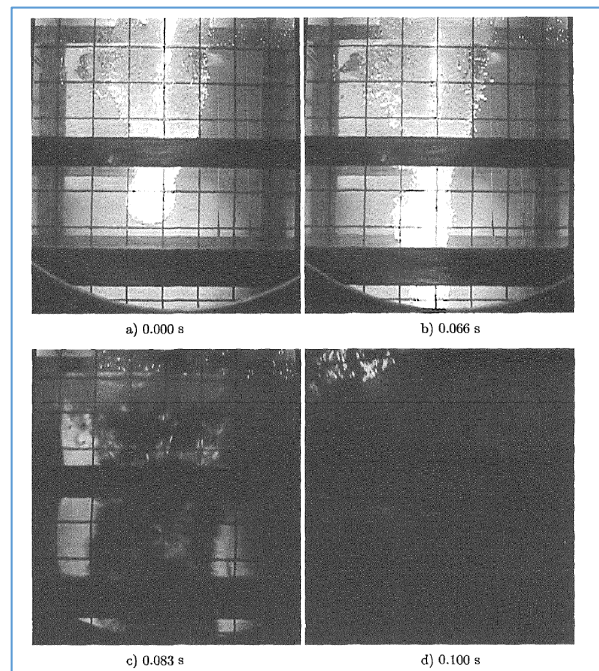


図 3.1: SSE6 実験で見られた水蒸気爆発 (デジタルビデオ 60field/s、シャッター速度 1/2000 s) : 溶融物が水槽の底に敷かれたステンレス板に接触した際にトリガリングが生じ、衝撃波及び相互作用領域が上方に伝播した。

図28 溶融シリコンの水蒸気爆発

¹¹¹ 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.

¹¹² 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.

¹¹³ 森山清史・丸山結・中村秀夫, 溶融シリコンの水蒸気爆発に関する研究, JAERI-Research 2002-021, P.9.

が水槽底部に到達して（写真b），蒸気膜が消滅して，局所的な溶融シリコンと水の接触によって水蒸気爆発が発生したものであろう．水深は0.9mである．

（2）水深が深い場合…図29¹⁴は，高温溶融物（青色部分）が水（黄色部分）面に落下・突入する場合の形状のシミュレーション例である．先端部で液液接触が起こり，水蒸気爆発がトリガーされる場合を考える．レーリー・テラー不安定（図21参照）によって先端部が波打つことで，図30¹⁵のような液液接触状態となると思われる．急速熱移動の結果の蒸気発生に伴う圧力波で先端部にかく乱状態が発生し，大規模蒸気爆発の開始点となることが想定できる．この場合も自発的な水蒸気爆発の発生となる．外部から不安定を助長する要因があれば，外的要因による発生という分類も可能であろうが，そのことは重要なことではない．

（3）水深によらない場合…図27に示したような異物の侵入モードが考えられる．仮に，コリウムが粗混合することなくペDESTALや格納容器キャビテイの底部に層状に拡がって膜沸騰を生じているときに，上部から金属やコンクリートの塊や，パイプや棒状の金属片が落下してくる可能性は十分に考えられる．これらの物体が，溶融物に到達あるいは侵入したときに，水蒸気爆発が発生する可能性が考えられるというものである．

6. 原発のシビアアクシデント対策

原発のシビアアクシデント対策として重要な点は，万一，シビアアクシデントが発生しても，放射性物質が外部に放出されるのを防止できる対策としなければならないことである．最終的には，第5の障壁と称する格納容器が，放射性物質を閉じ込める機能を維持しなければならない．したがって，水蒸気爆発が起こった際も，格納容器の破損を防止する必要がある．新規制基準では，このような対策を，格納容器破壊防止対策としている．

水蒸気爆発は，格納容器破壊モードの一つであるため，水蒸気爆発対策は，格納容器破壊防止対策の一つとして，必須の要件とされなければならない．なお，水蒸気爆発は複雑な物理現象のため，不確かさの大きい破損モードであることに留意される必要がある．

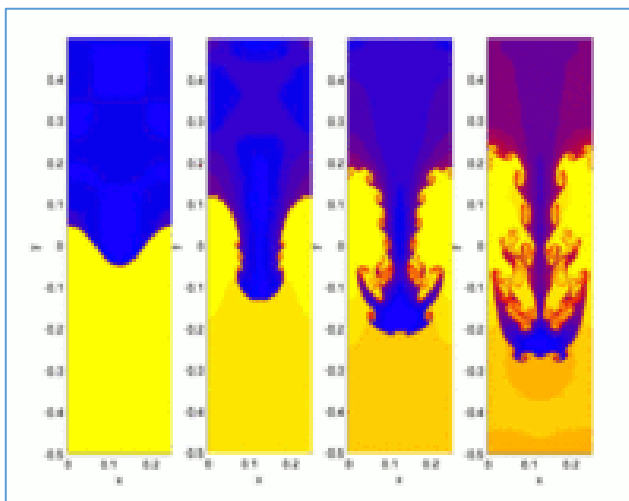


図29 溶融液体の水突入時シミュレーション例

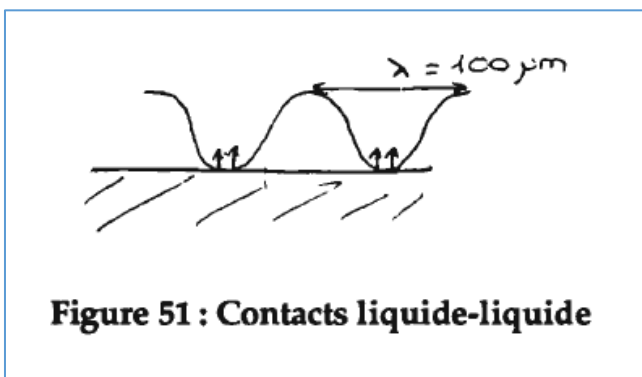


図30 溶融物先端での液液直接接触によるトリガーの想像図

¹⁴ Shengtai Li, Hui Li, Parallel AMR Code for Compressible MHD or HD Equations, Mathematical Modeling and Analysis, Los Alamos National Laboratory. (ロスアラモス国立研究所のHP)

¹⁵ S Battail-Claret, Severe accident in pressurized water reactors: molten fuel-coolant interaction, Universite De Paris-Sud These (1993)p.143.

6.1 過酷事故対策としての水蒸気爆発対策

有効とされる水蒸気爆発対策は、原発の型式によって限定される。主な対策は、①コアキャッチャーの設置、②炉内保持冷却（IVR: In-vessel Retention）設備の設置、のどちらかである。

図 31 にコアキャッチャーの概念図¹¹⁶を示す。コアキャッチャーは、耐熱性の材料で作られた皿状の容器で、溶融・落下した炉心（コア）を受け止め、溶融炉心と格納容器下部のコンクリートとの反応（MCCI）を防ぐとともに、流出した溶融物を拡げることで面積を稼ぎ冷却を図る設備である。この図は、2009 年に発行された企業の雑誌に掲載されたもので、この時点ですでにコアキャッチャーの設置が組み込まれていた。このような過酷事故対策では、事故時にも格納容器の健全性を確保するために、耐熱層

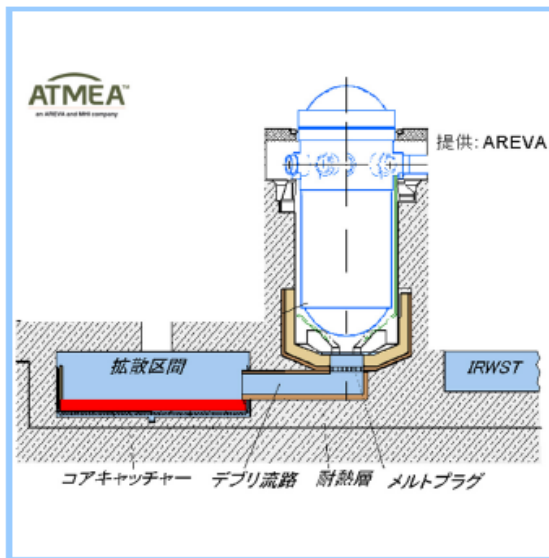


図 31 コアキャッチャーの概念図

と給水系を有する面積の大きい空間を設けている。仮に、2011 年 3 月時点で福島第一発電所の

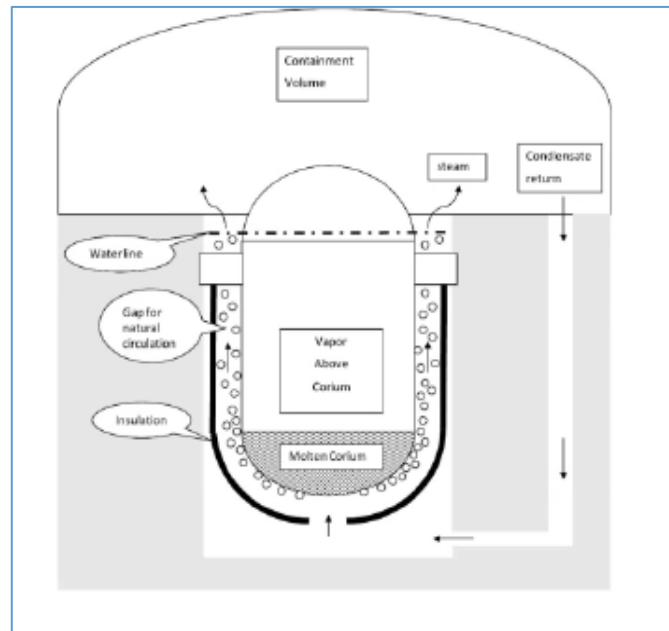


図 32 IVR (In-vessel Retention) の概念図

4 基の原発にコアキャッチャーが設置されていたならば、今日問題となっているデブリの取り出しや汚染水の発生・処理、ペDESTALのコンクリートの損傷などの問題は発生していなかったであろう。

次に、図 32 に IVR の概念図¹¹⁷を示す。IVR は、1979 年のスリーマイル島原発事故を受けて、T.G. Theofanous（テオファーンネス）ら¹¹⁸によって 1990 年代末ごろに提案された方法である。炉心溶融後、原子炉圧力容器が破損する前に、キャビティを冠水させ、原子炉容器の外側から炉内の溶融炉心を、沸騰熱伝達によって冷却する方式である。圧力容器底部に、制御棒が設置されている沸騰水型原発（BWR）で

¹¹⁶ 田淵浩三・ほか 4 名、1100MWe 級最新 3 ループ PWR プラント ATMWA1™ の概念と特徴、三菱重工技術報 Vol.46 No.4(2009),p.14. (<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/464/464009.pdf>)

¹¹⁷ G. Dewitt, et al., Experimental study of critical heat flux with alumina-water nanofluids in downward-facing channels for in-vessel retention applications, Nuclear Engineering and Technology, Vol 45, Issue 3, p.335(2013). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S173857331530019X>)

¹¹⁸ T.G. Theofanous, et al., In-Vessel Coolability and Retention of A Core Melt, DOE/ID 10460, 1996. (https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/006/29006120.pdf)または T.G. Theofanous and S. Syri, "The coolability limits of a reactor pressure vessel lower head," NURETH-7, Saratoga Springs, NY, September 10-15, 1995, NUREG/CP-0142, Vol. 1,627-647. [see also Nuc1. Engng. Des. 169,59-76 (1997).]

は、構造上、IVRの採用は難しいので、コアキャッチャーが設置される。欧米の原発のうち、米国や韓国¹⁹ではIVR、欧州ではコアキャッチャーの設置が主流のようである。

6.2 水蒸気爆発対策の有効性

コアキャッチャーの設置や、炉内保持冷却（IVR）設備の設置は、水蒸気爆発を防ぐことを目的としている。しかし、コアキャッチャー方式でも、溶融炉心が流出した後は、下方から水を供給し、上部から冷却水を注いで冷却を促進することが想定されており、水蒸気爆発を完全に防ぐことができるという保証はない。また、IVRでは、圧力容器外側表面の熱伝達率を大きくできない場合（除熱速度が不十分の場合）は、圧力容器が溶解して、溶融燃料と冷却水の接触に至る可能性もあり、この方法でも水蒸気爆発を完全に防ぐことができるという保証はない。事程左様に完全に水蒸気爆発を防ぐことは困難なのである。

6.3 東海第二原子力発電所の水蒸気爆発対策

他方、日本の原発では、コアキャッチャーの設置も、炉内保持冷却（IVR）設備の設置のどちらの方法も採用されていない。

BWRのMark-II型である東海第二発電所について言うならば、図33に示したように、圧力容器下部のコンクリート製床の面積は狭く、溶融した炉心を広げて冷却するコアキャッチャーの設置がそもそもできない（床の下に大量の水を湛えているサブプレッションチェンバーがあることも理由の一つである）。

このため、東海第二原発の過酷事故対策は、炉心溶融物質－コンクリート相互作用(MCCI)²⁰を避けることを念頭に置いた、低水位の水張りによる炉心溶融物の冷却という方法にとどまっている。日本原発は、「水蒸気爆発の発生する可能性は極めて小さい」²¹という希望的観測を根拠に、コアキャッチャー設置による格納容器破損防止対策を行わず、水を溜めた圧力容器直下の床の水槽に落下させて冷却（水張冷却）するという方法を採用している。

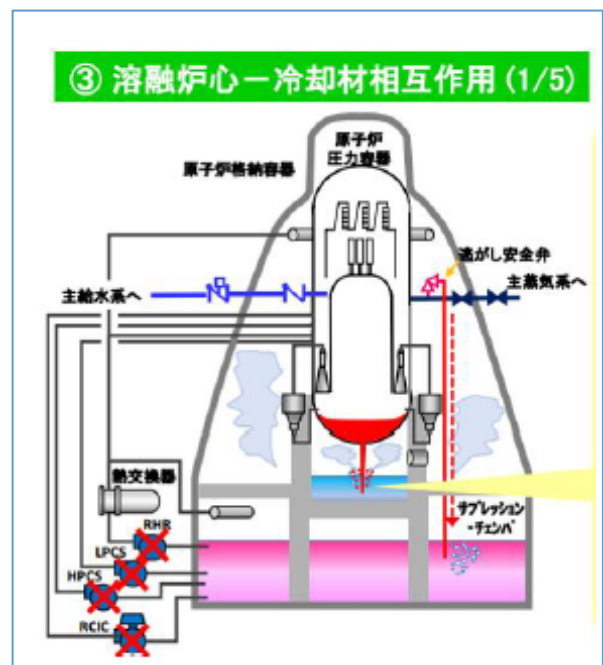


図33 Mark-II型の原発

¹⁹ K. L. Yong, J. Cho, and J. J. Lee, Application of IVR Strategy in Korea, Technical Meeting on Phenomenology and Technologies Relevant to In-Vessel Melt Retention and Ex-Vessel Corium Cooling 17–21 October 2016, Shanghai, China. (https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/51/089/51089920.pdf?r=1)

²⁰ MCCI… Molten Core-Concrete Interaction のこと。炉心溶融物質による熱的な影響などによって原子炉圧力容器が破損すると、炉心溶融物質は格納容器底部のコンクリート上に移動し、コンクリートと相互作用を起こして、コンクリートを侵食する。

²¹ 日本原子力発電株式会社、東海第二発電所 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）、p.58(2022年2月21日)。

(https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/gentai/anzen/nuclear/anzen/documents/220221_20wt_kijousiryoku9.pdf)

ところが、この安価で安易な対策は、逆に水蒸気爆発発生危険を招来するおそれがある。電力事業者は、水蒸気爆発が発生した場合の影響評価を行い、「JASMINE コードによる水蒸気爆発の不確かさ解析結果では、流体の運動エネルギーは最大でも 200MJ 程度となっている」¹²として、大きな爆発には至らないであろうと結論づけている。

しかし、電力事業者が行なった上記解析で得られた数値は、ジャスミン (JASMINE) コードの計算結果のベースケースに過ぎない。森山らの解析では、粗混合量が多い場合、流体の運動エネルギーは 472MJ になるとされている¹³。水張による冷却は、事故がベースケースと同じ程度の条件になるという根拠の薄い希望的観測に基づいた解釈による水蒸気爆発対策と思われるが、本方法の有効性が実験によって実証されているわけではなく、真の過酷事故対策とは言えない代物である。東海第二原発において、ジャスミン (JASMINE) コードの計算結果のベースケースを超える、激しい水蒸気爆発が発生すれば、格納容器の破損が免れない可能性は高いのである。

なお、水張冷却方式は、炉心溶融物質－コンクリート相互作用 (MCCI) を防ぐことを優先した方法と思われるが、コアキャッチャー (ドライキャビティ方式) や、炉内保持冷却 (IVR) も、溶融炉心を閉じ込め、冷却するとともに MCCI も回避するということになっている。水張冷却方式は、MCCI を防ぐために選択した優れた方法とはいえない。それどころか、水張冷却方式であっても、堆積した溶融物の厚さにより溶融物の熱伝導率が小さい場合には、除熱量以上の崩壊熱によって底部の温度が上昇してコンクリートと反応を生じることが十分に予想される。MCCI を完全に防ぐことはできず、結局、「2 兎追う者は 1 兎も得ず」の結果に至る危険性がある。

わが国の規制では水張冷却方式は、浅い水深にしていれば、仮に水蒸気爆発が発生しても格納容器の健全性は維持されるという考えに基づいていると思われる。TROI 実験の結果からも明らかなように、水深の浅いほうが自発的な水蒸気爆発は発生しやすくなるが、爆発に関与する溶融物の量が少なくなるため、爆発は弱くなるという考え方であろう。ただし、層状系では高い変換率となり、層状系水蒸気爆発が発生するときは、水深が浅いと言っても必ずしも爆発が弱くなるともいえない。

日本原電は、「水蒸気爆発は極めて起こりにくい」(実際には起こらない) から「水蒸気爆発対策は必要ない」と主張しながら、実際は、「爆発は起こるかもしれないが、ペDESTAL を破壊するほどではないだろう」ということで、浅い水深の水張方式を選んでいる。弱い爆発で済むという根拠はなく、水蒸気爆発の危険性を軽視していると言うほかない。

7. 水蒸気爆発対策の海外の対応

¹² 東北電力株式会社ほか、重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (第 5 部 MAAP) 添付 2 溶融炉心と冷却材の相互作用について、2015 年 6 月, p.5-2-7.

¹³ 森山清史・ほか 4 名、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, JAEA-Research 2007-072, p.12.

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¹²⁴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。すなわち「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である」(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にじませている。

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(原文: provide reactor cavity floor space to enhance debris spreading, 訳: デブリ拡散を促進のための原子炉キャビティの床面積を確保)¹²⁵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)」¹²⁶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. 訳、下線は筆者)と、装置の具体名は記していないが、事実上、コアキャッチャーの設置を要求している。

8. 次期原子炉の水蒸気爆発対策

セレナプロジェクトの結論を受けてかどうかは定かではないが、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

「・既設炉では、ウェットキャビティ方式により溶融炉心を冷却

・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」¹²⁷としている。

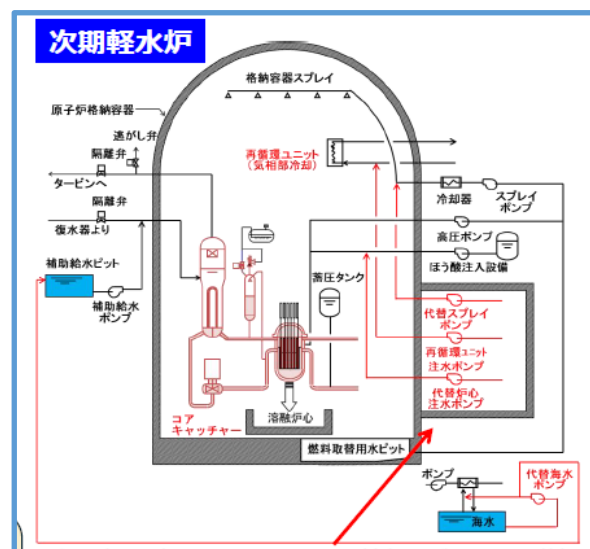
¹²⁴ IAEA-TECDOC-1791, CONSIDERATIONS ON THE APPLICATION OF THE IAEA SAFETY REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2016, p.61.

¹²⁵ NRC SECY-93-087, p.13. (米国原子力規制委員会(NRC: United States Nuclear Regulatory Commission)のコミッションペーパー)

¹²⁶ Decree No. 2007-534 “Decree Authorising the Creation of the “Flamanville 3”, Basic Nuclear Installation (10 April 2007), p.6.

¹²⁷ 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」～より安全・合理的な設計を目指して～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))

そして図 34 のように「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」¹⁸したとして、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 27・28）。



9. おわりに

本意見書では、水蒸気爆発について説明して、東海第二原発の水蒸気爆発対策の問題点について意見を記述した。さらに、水蒸気爆発のさまざまなトリガーを分類して、その多様性についても確認、検証した。

東海第二原発の水蒸気爆発対策の問題はいくつか指摘したが、その一つは、原子力規制委員会による東海第二原発の設置変更許可の審査過程でセレナ（SERENA）計画の成果（知見）は参照されていないことである。日本原電はセレナ（SERENA）プロジェクトをそれまでに行われた他機関の結果の一つとしてしか扱っていない。しかし、セレナ（SERENA）計画は、ファロ(FARO)実験やクロトス(KROTOS)実験の結果を受けて行われたもので、得られた成果（知見）については、水蒸気爆発が発生した場合は、原子炉キャビティを損傷し、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可能性が無視できないというものであった。当然、東海第二原発の設置変更許可にあたっては、セレナ（SERENA）計画の成果は検討されなければならない内容のものであった。

セレナ（SERENA）計画の結果をまとめると、以下のようになる。2002年1月から約10年間にわたって、実施されたセレナ（SERENA）プロジェクトフェーズ1とフェーズ2の2段階の検討の結果、

(1) フェーズ1では、解析コード間のバラツキを減少させることができたものの、キャビティの壁面の許容値以上の負荷がかかる（原文：For exvessel steam explosion all the calculated loads, even low, were above the capacity of a typical cavity walls.）¹⁰ことがわかった。

(2) フェーズ2で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ことが確認された。もっとも新しい報告書で、次のように結論付けられている。すなわち、「すべての国ではないが、ほとんどの国では、主に未解決の不確実性に

¹⁸ 有田誠二(三菱重工), 同上「シンポジウム」, WG活動報告(2) 抽出された論点に対する次期軽水炉の設計方針, 2020.11.25. (www.aesi.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/symposium2020/lec2.pdf)

¹²⁹NEA/CSNI/R(2007)11, p.8.

より、炉外水蒸気爆発の考慮が未解決の問題のままである（原文：in most countries, if not all, the consideration of ex-vessel steam explosion remains an open issue, mainly due to unresolved uncertainties;）¹³⁾。

（３）セレナ（SERENA）プロジェクトは水蒸気爆発が発生しないという根拠はないとの認識の下で、発生した場合、格納容器が損傷するかという問題意識の下で、プロジェクトを実施した。

原子力規制委員会は東海第二原発の設置変更許可の審査過程において、セレナ（SERENA）プロジェクトによって得られたこれらの結果を検討しておらず、その審査には欠落がある。その結果、東海第二原発において根本的な水蒸気爆発対策が為されていないことを述べた。

原子力規制委員会の規制方針はセレナの考え方と対立し、MCCI対策を優先し水蒸気爆発の発生とその時の発生負荷と原発構造物の耐久性に関する検討を不問に付し、キャビティに水を張って冷却するという安易で安価な方法を認めた。この結果、水蒸気爆発の危険を招来することが否定できなくなった。

本意見書では、実機事故時にはトリガーとなる圧力発生源がないという事業者の主張に対して、自発的に発生する場合も含めて、トリガーを分類して、その多様性について述べた。また、水蒸気爆発の発生には、トリガーの要因だけでなく、溶融物の組成と温度、水温、圧力、水深など多くのパラメータが関与している。実機条件でも、事故の程度や進み具合は非常に多岐にわたる可能性があり、これらのパラメータが一概に定められるものではない。トリガー要因の有無もその一つの要因に過ぎない。しかし、これまで検討してきたように、トリガーは多様であり、トリガーになり得る要因は多岐にわたる。たとえば、福島第一原発事故で起こった水素爆発の圧力波なども、外部トリガーの原因となりうると考えられる。また、事故進展の途中段階での構造物の落下や飛散なども、トリガーの要因となり得る。

また、本意見書では触れなかったが、高温溶融物の組成も事故の進展によって変化していく可能性がある。酸化ウラン UO_2 の融点は 2760°C (3033K) 程度であるが、「燃料熔融」は、 1500°C 以下で発生し約 $2000\sim 2200^\circ\text{C}$ 以上に達すると急速に進展する¹⁴⁾。また、ジルコニアとステンレス鋼の接触部では 1300°C から融解が始まることがわかっている。

このように、溶融物の組成ひとつとっても、ほぼすべてがジルコニアの場合や、酸化ウランが多く含まれる場合、さらに部材である鉄鋼材料などが含まれる場合など多岐にわたるケースが考えられる。融点も組成によって大きく異なり、過熱度も組成の変化に応じて大きくなっていく可能性がある。つまり、あらかじめ設定した溶融物による数回の実験結果だけから、水蒸気爆発現象全体の結論を導き出すのは非常に危険なことであるといえる。

最後に、「原発が存在する限り、原発の爆発の可能性は残る。原発が爆発したときの壊滅的な被害に鑑みると、そのリスクは受け入れられない。人的な誤り（ヒューマンエラー）、および自然災害に対する脆弱性に基づく原発爆発のリスクが存在することは明白である」ことを警告して、意見書の筆をおく。

¹³⁾ NEA/CSNI/R(2017)15, March 2018 NEA (2017), SERENA REPORT, Status Report on Ex-Vessel Steam Explosion, (2017)15, p.4.

([http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2017\)15&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2017)15&docLanguage=En))

¹⁴⁾ 倉田正輝，炉心溶融，エネルギーレビュー，2015-9，p.12.

【経歴】

1987年～1999年3月

横浜国立大学工学部助手として、「実験」や「演習」の教育と、液—液直接接触伝熱現象に関する研究に従事した。穏やかな液—液直接接触伝熱現象は、直接接触式蒸発器設計の基礎研究のための現象となり、激しい現象は蒸気爆発現象となる。この間 1990 年に工学博士の学位を取得した。

1999年4月～2012年3月

国立高専機構小山高専機械工学科の准教授，教授として「伝熱工学」などの教育と，熱工学に関する研究に従事した。