

平成24年(ワ)第430号 川内原発差止請求事件  
平成24年(ワ)第811号 川内原発差止請求事件  
平成25年(ワ)第180号 川内原発差止請求事件  
平成25年(ワ)第521号 川内原発差止請求事件  
平成26年(ワ)第163号 川内原発差止請求事件  
平成26年(ワ)第605号 川内原発差止請求事件  
平成27年(ワ)第638号 川内原発差止請求事件  
平成27年(ワ)第847号 川内原発差止請求事件  
平成28年(ワ)第456号 川内原発差止等請求事件  
平成29年(ワ)第402号 川内原発差止等請求事件

原告ら準備書面55

—被告九州電力の準備書面13に対する反論—

(水蒸気爆発の具体的危険性に関して)

2018(平成30)年5月14日

鹿児島地方裁判所 民事1部 御中

原告ら訴訟代理人弁護士

森

雅

美



同

板

井

優



同

後

藤

好

成



同

白

鳥

努



## 第1 はじめに

### 1 本準備書面の内容

- (1) 原告らは、雑誌「科学」に掲載された高島武雄氏（以下「高島氏」という。）及び後藤政志氏の共同執筆に係る「原子炉格納容器内の水蒸気爆発の危険性」（甲A92）という論考に基づき、準備書面35において、原子炉格納容器内における水蒸気爆発の具体的危険性について、主張、立証をした。
- (2) これに対し、被告九州電力は、平成29年8月29日付け準備書面13・p52以下において、「水蒸気爆発が発生するおそれはない」と反論している。
- (3) そこで、本準備書面では、高島氏作成に係る「九州電力の準備書面13の水蒸気爆発に関する記述に対する反論」という意見書（甲B218）及び滝谷氏の意見書（甲B217）の水蒸気爆発の危険性に関する「第6」の部分に基づいて、被告九州電力による上記(2)の主張に対し、反論する。

## 第2 本書面の主張の概要

### 1 被告九州電力の反論は、自発的な水蒸気爆発が観察された TROI 実験には全く触れないなど、極めて恣意的なものであること

被告九州電力の準備書面13は、水蒸気爆発に関しては、核燃料溶融物を使用したこれまでの実験結果を根拠として、「原告らの主張するような水蒸気爆発の危険はない」と結論付けているが、自発的な水蒸気爆発が観察された TROI 実験には全く触れていないなど、極めて恣意的に結論を導いていると言わざるを得ないものである。

具体的にいえば、炉心溶融事故（メルtdown）時に、溶融炉心を、水張りした原子炉キャビティに落下させて冷却する際に、水蒸気爆発発生の可能性は否定できないことと、格納容器の健全性が脅かされることについてである。

### 2 1978年当時、水蒸気爆発に対する有効な対策はなかったこと（日本原子力研究所の報告書の指摘・甲A178）

そもそも、わが国では、1979年の炉心溶融を起こしたアメリカのスリーマイル島原発事故（TMI事故）を受けて、1982年に、日本原子力研究所（当時）において、「炉心損傷に関する研究の現状と課題」という報告書（甲A178）がとりまとめられた。

本報告書は、「炉心損傷事故における各事象、研究の現状」について調査し、その「調査、検討の結果を、炉心損傷事故シーケンス、炉心崩壊・融体

挙動、FPの挙動、水素の発生・爆発、水蒸気爆発、格納容器の健全性に分けて、独自の解析評価の結果をまとめたものである」(甲A178の1枚目)。

本報告書は、その中の「6. 水蒸気爆発」の「6. 4 研究テーマ」において、「(A) 優先度が高いもの」として「水蒸気爆発炉内実験」を挙げて、「現在、水蒸気爆発の解析において最も不足している知見の1つは、実炉で水蒸気爆発が生ずる場合の初期条件および境界条件に関する知見である。即ち、炉心が溶融・落下し冷却水と混合する過程およびその場合の環境条件に関するデータが極めて少ない。」(甲A178・p132～3)と指摘して、水蒸気爆発についての炉内実験・研究の必要性が強調されており、この時点において、水蒸気爆発に対する有効な対策はなかったことが分かる。

### 3 COTELS 実験の結果が報告された後の2002年に、「原子炉キャビティ区画室において水蒸気爆発が発生する可能性は、事故シーケンスによっては大きいことが示唆された」という報告書(甲A179)が出されていること

上記2から20年後の2002年になって、(財)原子力発電技術機構原子力安全解析所(当時)は、「シビアアクシデント時構造バウンダリ健全性評価に関する報告書」(甲A179)をまとめた。

本報告書の目的については、川内原発のような「PWRプラントの炉心損傷後のアクシデントマネジメント策には、消火系を用いて格納容器内注水を行う手段がある。このような事故シーケンスでは、原子炉容器破損時前に原子炉キャビティ内が水張りされた状態になり、原子炉容器破損が生じて、炉心溶融物が原子炉キャビティに放出されると、高温の炉心溶融物と水とによって、大量の水蒸気及び水素の急速な生成、急激な圧力上昇や水蒸気爆発の発生等の相互作用を起こすことが考えられる」として、「本作業は、水蒸気爆発に伴う衝撃波が水中を伝ばし、コンクリート構造物への荷重として作用することにより、この構造物が動的構造応答する状況を模擬した解析を実施して、原子炉容器を支持するコンクリート構造物の健全性を確認することを目的とする」(甲A179・i頁)と述べている。

そして、本報告書は、その解析結果について、「要旨」欄においては、「これらの評価から、実機PWRプラントのシビアアクシデント時に原子炉キャビティ区画室において、自発的な水蒸気爆発が発生する事故シーケンスがあることが分かった。」(甲A179・i頁。下線は原告ら訴訟代理人)と述べ、さらに、「3. 4 実炉の水蒸気爆発発生の可能性」という項目においては、「以上に述べるように、PWR4ループPCCV原子炉施設の原子炉キャビティ区画室において水蒸気爆発が発生する可能性は、事故シーケンス

によっては大きいことが示唆された。」（甲A179の「3-6」頁。下線は原告ら訴訟代理人）と報告している。

留意しなければならないのは、本報告は、後述する（財）原子力発電技術機構（当時）が1994年に実施したCOTELS実験の結果が報告された後の2002年に出されたものであるという点である（甲B218・p1）。

4 今日まで、「過酷事故によって溶融炉心が水プールに落下して冷却されても、水蒸気爆発は発生しない」ということは証明されていないこと

その後、2011年の福島第一原発事故を経て、過酷事故に対する対策が新規制基準に求められることになったが、しかし、今日に至るまで、「過酷事故によって溶融炉心が水プールに落下して冷却されても、水蒸気爆発は発生しない」ということは、証明されていない（甲B218・p1）。

### 第3 被告九州電力による、核燃料溶融物を使用した3つの実験結果の恣意的な取り扱いについて

#### 1 被告九州電力の主張

被告九州電力は、その準備書面13・p52～3において、「水蒸気爆発に関しては、これまで実機において想定される溶融物（二酸化ウラン（燃料ペレット）とジルコニウム（燃料被覆管）の混合溶融物）を用いた実験として、COTELS、FARO、KROTOSが行われており、延べ30回に及ぶ溶融物の水プールへの落下実験が実施されている。これらの落下実験のうち、KROTOSの実験において3回水蒸気爆発が発生しただけであり、これ以外の実験では、水蒸気爆発は発生していない。……上記実験結果から、水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さいと考えられる」と主張している。

しかし、この被告九州電力の主張は、次に述べるように、核燃料溶融物を使用した4つの実験結果について、自己に有利なように、極めて恣意的な取り扱いをしたものである。

#### 2 TROI実験を完全に無視していること

最も看過できない問題点は、核燃料溶融物を使用した実験には、被告九州電力が準備書面13で示した3つの実験のほかに、最も新しい実験として、韓国原子力研究所が実施したTROI実験があるにもかかわらず、これが完全に無視されている点である。

即ち、原告らは、その準備書面35・p9以下において、TROI実験では、自発的な水蒸気爆発も、外部トリガーを与えた際の水蒸気爆発も、それぞれ複数回確認されていることを指摘しているにもかかわらず、被告九州電力準備書面13には、このTROI実験に関する記述は、一切、ない。

滝谷氏が、今般の意見書（甲B217・p9）において、「九州電力は、

水蒸気爆発が外部トリガーなしでは生じなかった COTELS、FARO、KROTOS の 3 実験のみを取り上げ、原告準備書面 35（新規制基準の過酷事故対策は労働安全衛生規則に違反していること）で論じた、外部トリガーなしで水蒸気爆発が生じた TROI の実験には全く言及しておりません（原告準備書面 35・9 頁以下）。このことは、関連する様々な研究事例のうちから自己の主張に有利となる事例のみを恣意的に選択していることを示すものであり、原告らの主張に対する科学的反論には全くなっております。」（下線は原告ら訴訟代理人）と指摘されているのは、けだし、当然のことである。

なお、この TROI 実験については、後に項目を改めて詳述する。

### 3 FARO 実験の結果について（FARO 実験の番号 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にもかかわらず、被告九州電力は、番号 L-33 は「爆発していない」としていること）

#### (1) 被告九州電力の主張

被告九州電力は、その準備書面 13・p 53 の注 50 において、FARO 実験について、「計 12 回の実験を行ったが水蒸気爆発は発生していない」と断定している。

#### (2) 12 回のうち 8 回の実験は、水蒸気爆発が起こらないことを印象付けるために行われた疑いがあること

FARO 実験は、全部で 12 回の実験のうち、実に 8 回は、サブクール度（ $\Delta T_{\text{sub}}$  サブクール度：過冷度。飽和温度（沸点）と液体温度の差）が、0 から 2 K（ケルビン：絶対温度(K)の単位。摂氏温度(°C)に 273.15 を足した値となるが、温度差としてはどちらの値も等しい。）で行われている（なお、飽和の意味は、沸点では熱を加えても温度が上昇しない、すなわち、温度が飽和した状態となることを意味している。）。

即ち、加圧水型原子炉（PWR）を所有する電力会社が作成した資料の中の「表 3-4 FARO 試験の主要な試験条件及び試験結果」（甲 A 181 の「5-2-12」）をみると、FARO の 12 回の実験のうち、

サブクール度が 0 K であるものが 4 回（L-06、L-14、L-20、L-24）、

サブクール度が 1 K であるものが 3 回（L-19、L-27、L-28）、

サブクール度が 2 K であるものが 1 回（L-11）、

となっており、0～2 K だけで 8 回も行っており、それら以外の 4 回は、サブクール度が 1.2 K（L-08）、サブクール度が 9.7 K（L-29）、サブクール度が 10.4 K（L-31）、サブクール度が 12.4 K（L-33）を、それぞれ 1 回ずつしか行っていない。

水蒸気爆発発生に関するこれまでの知見は、水温が飽和温度又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、もしくは極めて起こりにくいというものである。

その理由は、低サブクール度の条件では、膜沸騰蒸気膜内の水蒸気が凝縮しにくくなるからであり、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（甲B218・p2）。

従って、水蒸気爆発が発生しないことが十分確認されている条件の下での実験を、わざわざ8回も繰り返し行う理由が分からない。

高島氏が指摘されているように、これは、「水蒸気爆発が起こらないことを印象付けるために行われたと言わざるを得ない」（甲B218・p2）。

(3) FARO 実験の番号 L-33 では水蒸気爆発が発生しているとみる方が自然であること

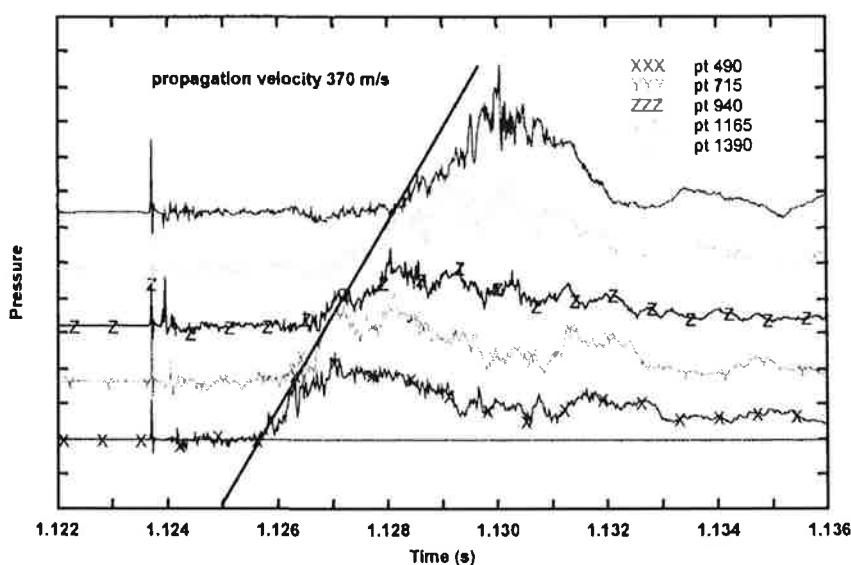


図1 FARO 実験 L-33 で観察された圧力波

（図の縦軸は、圧力と、水槽底からの距離をも表している。圧力としての一目盛りは 2.5MPa であり、距離として一目盛りは 250mm である。なお、図の中の斜線は、5 個の圧力計の圧力波の立ち上がり点をつないだものである。従って、この斜線の傾きは、爆発現象の伝播速度を表すことになる。）

2001 年に報告された FARO 実験に関する論文（甲B218・p2の注8参照）によれば、残る4回の実験のうち、実験番号 L-33 の結果については、前頁の図1に示すように、①発生圧力が 10MPa を超えていることや、②圧力波が、下方（水槽底部）から上方（水面）に向かって成長しながら伝播していることから（甲B218・p2の注8の論文は、「最大圧

力は容器底から 1390mm の位置で 10.6MPa となり、底部から上方に向かつての伝播速度が 370m/s と推測される」と述べている。甲 B 2 1 8 ・ p 3 の注 9 参照。)、水蒸気爆発が発生したとみなすのが自然である (なお、下記の図の左上部分に「Propagation velocity 370m/s」(伝播速度 370m/s) と書いてある。))。

本実験結果に関する前述の論文(甲 B 2 1 8 ・ p 2 の注 8 の論文)では、タイトルで「ENERGETIC EVENT (激しい現象)」と述べ、本文中では、「mild explosions (弱い爆発)」と述べており、弱いながらも「爆発」と表示している (甲 B 2 1 8 ・ p 3)。

さらに、高島氏によれば、「2002 年から開始された、過酷事故 (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る SERENA 計画では、TROI 実験の TROI-13 (核燃料溶融物の CORIUM 使用) や、KTROTOS 実験の KTROTOS-44 ( $Al_2O_3$  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、解析コードと比較検討を行っている」(甲 B 2 1 8 ・ p 3 ~ 4)。

- (4) 加圧水型原子炉 (PWR) を所有する電力会社の資料 (甲 A 1 8 1) が、実験番号 L-33 を「爆発していない」としていることは誤りであること

以上の通りであることから、FARO 実験の番号 L-33 では、水蒸気爆発が発生しているとみるのが自然であり、被告九州電力と同様に、加圧水型原子炉 (PWR) を所有する電力会社の資料 (甲 A 1 8 0) において、「いずれの FARO 実験においても、高圧条件、低圧条件ともに、水蒸気爆発の発生は観測されなかった」(甲 A 1 8 0 の「3.2-5」) とされ、また、「表 3.1-1 FARO 実験条件及び結果一覧」(甲 A 1 8 0 の「3.2-12」) でも、「水蒸気爆発」を、全ての実験につき「なし」としていることは誤りであり、不当である (甲 A 1 8 1 の「5-2-3」及び「5-2-12」) の同様の記載も誤りである。))。

#### 4 COTELS 実験には致命的欠陥があること

- (1) 水蒸気爆発に関する論文・報告書において、高温液体の温度が不明というのは考えられず、COTELS 実験の致命的な欠陥と言えること

前述の加圧水型原子炉 (PWR) を所有する電力会社 4 社の資料 (甲 A 1 8 1) の中の「表 3-5 COTELS 試験の主要な試験条件及び試験結果」(甲 A 1 8 1 の「5-2-12」) を見ると、高温溶融物の温度の記載 (項目) がない。同じ頁の上段にある「表 3-4 FARO 試験の主要な試験条件及び試験結果」では「溶融物温度 (K)」という項目があり、いずれの試験ケースにもその記載がなされているのと対照すれば、一目瞭然である。

電力会社4社の資料(甲A181)の、このCOTELS試験に関する「表3-5」については、その出典が参考文献の[7]に明記されているが(甲A181の「5-2-36」)、その報告書(甲A182)にも、もとより熔融物温度の記載はない(甲A182・p3参照)。

また、高温熔融物の温度を測定したかどうかについても、記述がない。

したがって、高温物質が十分に融解した液体になっていたかどうか、分からないのであって、「実験結果の報告としては、極めて不十分なものである」(甲B218・p4)。即ち、およそ水蒸気爆発に関する論文・報告書において、高温液体の温度が不明というのは考えられないのであって、これは、COTELS実験の致命的な欠陥である(甲B218・p4)。

(2) 被告九州電力は、COTELS実験の8回の熔融物温度が全て「3050K」となっている表を提出していること

ところが、適合審査会合に提出された被告九州電力等の資料(甲A180の「3.2-13」)には、「表3.1-4」として、8回の実験時の熔融物温度が全て「3050K」という同じ数値となっているものが存在する(下記の表の「熔融物温度」欄)。

これは、先に見た、FARO実験に関する「表3-4 FARO試験の主要な試験条件及び試験結果」では、12回の試験ケースの「熔融物温度(K)」が、2823Kから3273Kまでバラバラであったのと極めて対照的であるととともに、実験データとして極めて不自然である。

表 3.1 4 COTELS 実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO <sub>2</sub> 割合 %	熔融物質量 kg	熔融物温度 K	蒸気圧力 MPa	水深 m	◆ブール度 K	水蒸気爆発
A-1	0.55	56.30	3050	0.20	0.4	0	-
A-4	0.55	27.00	3050	0.30	0.4	8	-
A-5	0.55	55.40	3050	0.25	0.4	12	-
A-6	0.55	53.10	3050	0.21	0.4	21	-
A-8	0.55	47.70	3050	0.45	0.4	24	-
A-9	0.55	57.10	3050	0.21	0.9	0	-
A-10	0.55	55.00	3050	0.47	0.4	21	-
A-11	0.55	53.00	3050	0.27	0.8	56	-

◆ いずれも UO<sub>2</sub>: 50wt%, Zr: 25wt%, ZrO<sub>2</sub>: 5wt%, SS 15wt% の混合物

しかし、このように、COTELS実験の8回全てが「3050K」という同じ数値が掲載されている原著の論文(出典)は全く明示されておらず、確認のしようがなく(甲B218・p4)、信憑性に多大な疑問が残る。



## 5 KROTOS 実験について

- (1) KROTOS 実験は、核燃料溶融物の水蒸気爆発の発生の有無を明らかにすることを目的とするものではないこと

被告九州電力の準備書面 13 では、核燃料溶融物のコリウムを用いた KROTOS 実験では、外部トリガー（外乱）を加えたときのみ爆発が生じ、自発的な水蒸気爆発は観察されないとしているが、この結果は、この装置の実験目的から当然に予想された結果といえる。

何故ならば、KROTOS 実験の最大の特徴は、水槽が細長いパイプ状であるというところであり、あたかもトンネルにおけるガス爆発事故に相当するような 1次元の系を再現したもの、すなわち、1次元系の水蒸気爆発を再現しようとした実験装置であり、このような特徴を有する KROTOS 実験は、高温液を 1次元状の水槽に分散配置して、下方から高压ガスの解放という方法でトリガーを加え、熱的デトネーションが起こるかを調べるのが主たる目的であって、核燃料溶融物の水蒸気爆発の発生の有無を明らかにすることを目的とするものではないからである（「デトネーション」とは、燃焼層が可燃混合気中を音速以上の衝撃波を維持して伝播していくような燃焼様式であり、日本語では「爆燃」又は「爆轟（ハクゴウ）」と呼んでいる。

「熱的デトネーションモデル」は、蒸気爆発が重大な事象として顕在化する必要条件の 1つとして、局所的な膜沸騰蒸気膜の崩壊領域が、音速を上回る速度で周囲の領域に拡大・伝播すること、さらに現象をエスカレートさせる何らかのメカニズムが存在していると考えられることに基づいている。燃焼のデトネーションでは、燃焼熱が衝撃波を維持・増幅するエネルギー源になっているのに対し、熱的デトネーションでは、高温液から低温液へ移動する熱が、衝撃波を維持・増幅するエネルギー源になると考えている。）。

そのため、KROTOS 実験における、直径が 95mm、水深が約 1000mm の水槽という実験装置の形状は、およそ実機の条件（水深が数メートル、直径が 10メートル以上）とはかけ離れている（甲 B 218・p 5）。

- (2) KROTOS 実験で自発的な水蒸気爆発が起こらなかった理由として、水槽の容量が非常に小さいことも理由の一つと考えられること

さらに、KROTOS 実験において、自発的な水蒸気爆発が起こらなかった理由としては、水槽の容量が非常に小さいことが理由の一つであると推定される（甲 B 218・p 5）。

資料等によれば、KROTOS 実験の水槽は内径 95mm、水深 1078mm とあるので、水量は 9 リットルに満たない量であるが、このような水槽に 2800K から 3000K 程度の物質を 2kg から 5kg 投入するということは、溶融物の熱エ

エネルギーの4、5%が水に伝わることで、水温が飽和温度付近まで急上昇する計算になる。

つまり、KROTOS 実験では、初期状態を常温程度（高サブクール度）の水としてあっても、膜沸騰で沈降中に水温が上昇して低サブクール度となり、水蒸気爆発が起こりにくい条件を作り出していると考えられるのであり、水量が少ないため、投入後の水温が上昇して、自発的な水蒸気爆発が抑制され、水蒸気爆発が起こらなくなっている可能性がある（甲B218・p5）。

さすがに、KROTOS 実験の水槽の内径では実機の状況とかけ離れすぎていると考えられたのか、SERENA プロジェクトの実験では、水槽の内径を200mmに変更している。

なお、水量については、投入する高温物質の比熱容量（質量×比熱）と水の比熱容量（水量×比熱）の兼ね合いであり、特に基準があるわけではないが、水量が少なすぎると、水温の上昇が無視できなくなり、水蒸気爆発が起こりにくくなる方向へ条件が変わってくるのが想定される。

そこで、このことを事前に確認する必要があると考えるが、被告九州電力等の電力会社は、そのことを示す文献は示していない。

### (3) FARO 実験と KROTOS 実験は、同じ機関が実施した、目的が異なる実験であること

ところで、先の FARO 実験と、この KROTOS 実験とは、同じ機関が実施した実験である。

ただ、上記(1)でみたように、両者は、実験の目的が異なっている。

それにもかかわらず、これら2つの実験を別の実験としてカウントすることによって、被告九州電力が、「水蒸気爆発に関しては、これまで実験において想定される溶融物(二酸化ウラン(燃料ペレット)とジルコニウム(燃料被覆管)の混合溶融物)を用いた実験として、COTELS、FARO、KROTOSが行われており、延べ30回に及ぶ溶融物の水プールへの落下実験が実施されている。これらの落下実験のうち、KROTOS の実験において3回水蒸気爆発が発生しただけであり、これ以外の実験では、水蒸気爆発は発生していない。」（被告九州電力準備書面13・p52～3。下線は原告ら訴訟代理人）と主張することは、あたかも、「多くの実験で水蒸気爆発が発生しなかった」という誤った結論を印象付けようとするものではなからうか。

## 6 実験条件の設定や実験のスケール等に関する問題点について

### (1) 不当な実験条件の設定（水蒸気爆発が起きない条件下での実験を多く行っていること）

上記3(2)で述べたように、これまでの研究によって、①融点に近い温度では、すぐに固化して、水蒸気爆発が起こらないことや、②水温が沸点（飽和温度、サブクール度ゼロ）でも、水蒸気爆発は起こらないことが、よく知られている。

被告九州電力がその準備書面13で挙げた3つの実験は、今まで述べてきたように、その多くが、水蒸気爆発を起こさない条件を満たすような条件設定の下に、実験を行っている（甲B218・p5）。

## (2) 実験のスケールの過小性

「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」（甲A183・p10）の「表1 水蒸気爆発解析の入力条件」において、「初期・境界条件」の「融体総量（kg）」が「250,000」とされているように、実機では、核燃料溶融物の総量が250トン程度までとなると見積もられている。

ところが、被告九州電力などが示した実験は、最大のものでも200kgに達せず、実機のスケールには遠く及ばないものとなっている。

飛翔物の設計などに用いる模型実験は、スケール則が確立された流体力学の数理に基づくものであるが、水蒸気爆発の発生やその規模を評価する数理は、いまだ確立していないのが現状である。

従って、小規模の実験の結果が、そのまま、実機規模の結果の推定に使用できるという根拠も全くない（甲B218・p5=6）。

## (3) 核燃料溶融物の組成について

最後に、核燃料溶融物の組成の相違が、水蒸気爆発の発生や、爆発規模に及ぼす影響については、未だ明らかにはなっていない。

水素などの不凝縮性ガスの発生の有無や程度と爆発発生との関係、ジルコニア以外の物質の影響なども、未だ明らかにはなっていない。

## 7 まとめ

以上の通りであることから、被告九州電力が、3つの実験結果を踏まえて、「水蒸気爆発が発生するおそれはない」と安易に結論付けていること、断定していることには、全く科学的合理性はない。

そして、このことは、被告九州電力が完全に無視している TROI 実験の解析結果をみれば、より一層明らかとなる。

## 第4 自発的な水蒸気爆発が複数回観察された TROI 実験結果を、被告九州電力が完全に無視していることについて

### 1 TROI 実験とは何か

TROI 実験というのは、韓国原子力研究所が開発した、水蒸気爆発実験のための装置による一連の実験を言う。

一連の核燃料溶融物を使用した実験装置としては、もっとも新しいものがあり、OECD（経済協力開発機構）が実施している SERENA プロジェクトにおいても、KROTOS 実験とともに採用されている実験装置である。

## 2 TROI 実験の結果について（6回の実験中、5回で水蒸気爆発を発生していること）

次に、TROI 実験の結果について述べる。

これまでに行われた TROI 実験の結果は、高島氏が確認した範囲では、TROI-37 までであるが（甲 B 2 1 8・p 6）が、このうち、自発的な水蒸気爆発が観察された結果のみを、次の表 1 に示した（なお、この他にさらに、外部トリガーを加えて水蒸気爆発を観察した結果も多数ある。）。

表 1 自発的な水蒸気爆発の発生が確認された実験の主な条件

		実験番号			
		TROI-10	TROI-12	TROI-13	TROI-14
溶融物 条件	組成 (wt%)	二酸化ウ ラン(70)、 ジルコニ ア(30)	二酸化ウ ラン(70)、 ジルコニア (30)	二酸化ウラ ン(69)、ジル コニア(30)、 ジルコニウ ム(1)	二酸化ウラ ン(69)、ジ ルコニア (30)、ジルコ ニウム(1)
	温度(K)	>3373	3800	2600*	3000
	落下重量 (kg)	8.7	8.4	7.735	6.545
水槽条 件	内径(m)	0.6	0.6	0.6	0.6
	水深(m)	0.67	0.67	0.67	0.67
	水の重量 (kg)	189	189	189	189
	水温/サ ブクール 度(K)	298/75	293/80	292/81	285/88
系圧力(MPa)		0.117	0.11	0.108	0.105

(注：TROI-13 の温度については、本文で解説する。)

次の表2（甲A184・p13）は、SERENAプロジェクトで行われた実験結果（TS-1からTS-6）を示したものである。

これを見れば、実験の6回中5回で水蒸気爆発を発生していることが分かる（表2の下から2行目の「Steam Explosion」（水蒸気爆発）の欄において、「SE」とあるのが「水蒸気爆発が起きた」という意味である。）。

表2 SERENA プロジェクトで行われた実験結果（TS-1 から TS-6）

Table 2. Main results of experimental tests - KROTOS and TROI-SERENA Phase-2 (\*: rapid instrumentation failed for ES-5)

Test ID	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5	TS-6	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4	ES-5	ES-6
Delivered Meli Mass (kg)	15.4	12.5	15.0	14.3	17.0	9.3	2.4	3.9	0.8	2.0	1.7	1.7
Melt Temperature (K)	3030	3083	3107	3011	2980	3010	3080	3140	2850	2680	2894	2893
Melt Superheat (K)	145	228	272	171	140	250	100	180	-	58	84	182
Melt Composition (wt%) UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Zr U Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> FP	73.42/8.8     	88.03/2.0     	71.62/9.0     	81.01/9.0     	76.01/6.3 5.0 0.7   	73.33/8.5   4.9 3.3  	70.63/9.0     	70.63/9.0     	70.63/9.0     	80.03/2.0     	80.11/1.4 8.5    	73.62/5.4     
Water Depth (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Water Temperature (K)	301	304	307	303	307	308	302	304	302	325	307	340
Sub-cooling (K)	115.0	81.7	85.1	54.0	57.7	58.0	118	80	-	82	87	54
System Pressure (MPa)	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	-	0.2	0.2	0.2
Fall Distance (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	-	0.8	0.8	0.8
Jet Diameter (mm)	50	50	50	50	50	50	15	10	10	10	10	10
Triggering Time after Release (ms)	250	815	815	1040	1080	1050	651	802	-	851	1127	1547
Location of Meli Landing Edge at Trigger Time (m)	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	-0.4	0.5	0.0	-	0.0	0.0	0.0
Void at Triggering (vol %)	4	3	2	14.24	13.34	4.10	8.7	27	1	8	18	12
Max. Pressure (MPa)	17	10	12	20	7	25	34.7	23.3	-	44.7	27	0.4
Injection (ms)	5640	>6000	>6000	>6000	4880	>6000	584	745	-	808	27	0
Steam Explosion	SE	SE	SE	SE	Steam Spine	SE	SE	SE	-	SE	Non-glit event	Localized SE
Conversion Ratio (%)	0.12	0.28	0.22	0.35	0.30	0.68	0.10	0.18	-	0.16	-	0

### 3 温度測定の見直し

#### (1) TROI-13 の温度について

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。前頁の表1では、TROI-13の温度は「2600K」としている。

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（甲A185・p15）、「2600K」という値に疑義があったことは事実である（融点の混合物を加熱した際、混合物が溶けはじめる温度と、融けきる温度に幅があるものがある。ある成分比で混合物が融けきる温度を「リキダス温度」と呼び、リキダス温度をつないだ線を「液相線」と言う。）

その後、測定データの検討解析が行われ、「 $\sim 3300\text{K}$ 」とすることで合意が得られたと理解されるが、ただ、やはり自発的な水蒸気爆発の発生が確認された TROI-14 の温度は、あらたに 2 種類の温度計を導入して、慎重に検討しており、 $3000\text{K}$  であったことは、次の図 3 の温度記録などから見ても信頼できるものである (甲 B 2 1 8・p 8)。

(2) TROI-13 と TROI-14 の溶融物温度測定記録について

次の図 3 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 付近で中央値は  $2600\text{K}$  付近であることが分かる。

そこで、この値を、TROI-13 の Melt Temperature として、先の表 1 のように、「 $2600\text{K}$ 」としたものと思われる (甲 B 2 1 8・p 8)。

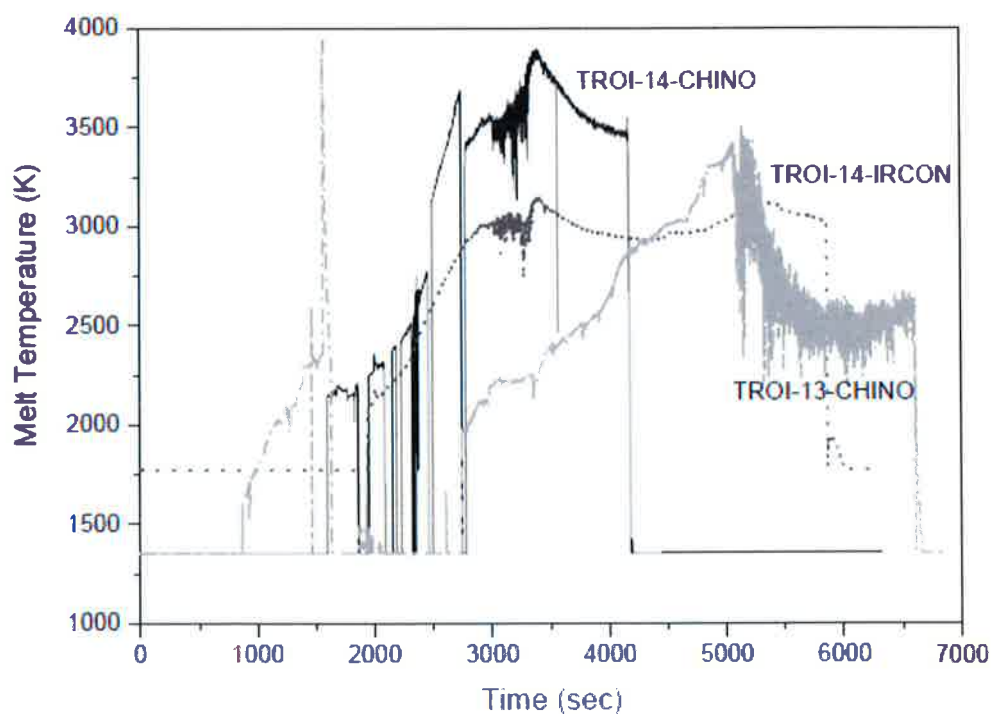


Fig. 17 Melt temperatures for TROI-13 and TROI-14

図 3 TROI-13 と TROI-14 の溶融物温度測定記録

次に、TROI-14 の実験では、CHINO と IRCON の二つの温度計を同時に用いて測定をしたものと推定される (CHINO と IRCON の両者とも、2 つの波長の放射エネルギーの強さを測定して、表面温度を求めると同じ原理に基づいた温度計であるが、計測する波長が少し違うことや、測定できる最高温度が異なるなどの相違がある。)

その過程を、図3において、TROI-13の結果と同じグラフに重ねて示しているが、それによると、CHINOの測定値のかたが、IRCONの測定値より約600K高い。

4200secで、CHINOの測定はやめている（文献によると、「TROI-14の最高温度はチノでは約3800Kとあるが、補正式で過大に見積もっているので、IRCONの最高値3200Kの方が正しいと判断した」ということである。）。

IRCONの測定は続けて、5800sec付近で水に投入したと思われる。

この値を、TROI-14のMelt Temperatureとして、表1のように、「3000K」としたものと思われる（甲B218・p8～9）。

### (3) TROI-13-CHINOと、TROI-14-IRCONの加熱過程の指示値が正しいと解されること

図3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解される（甲B218・p9）。

なぜなら、両者とも、加熱過程で融解時に融解潜熱のため、温度上昇が現れないと思われる温度がほぼ等しいからである（なお、「融解潜熱」について説明すると、例えばマイナス20℃ぐらいの氷を解かす場合（加熱過程で融解時）、0℃までは温度が上昇するが、しかし、0℃で溶け始めてから、氷と水の共存状態が終了して、全て水になるまで温度は0℃のまま上昇しない。加えている熱が全て氷の融解のために使用されるためである。この熱を「潜熱」と言うが、それは温度の上昇として表に出てこないからである。核燃料模擬物質を加熱融解するときも、これと同じことが起こると考えられている。）。

それは、TROI-14-IRCONの約3000secのところと、TROI-13-CHINOの4500sec付近のことであるが、その指示値が、両者とも、約3000Kと液相線温度より100Kほど高いが、この程度の誤差はありうるとと思われる（甲B218・p9）。

## 4 自発的な水蒸気爆発が複数回観察されたことが、TROI実験結果の最も重要な教訓であること

### (1) 電力各社や原子力規制委員会の見解

BWRを保有する電力各社や、原子力規制委員会は、TROI実験において、自発的な水蒸気爆発が発生した条件は、実機とはかけ離れているという見解である。

### (2) 自発的な水蒸気爆発が複数回観察されたことが、TROI実験結果の最も重要な教訓であり、被告九州電力がこれを無視することは許されないこと

しかし、1979年のTMI事故では、溶融した45%の炉心(62トン)の外側

温度は融点に達しておらず、絶対温度で 2000K 程度であったにもかかわらず、炉心内部は 3100K まで達したと見積もられている。

仮に、TMI 事故がさらに進展した場合は、最高温度がさらに上昇し、1000K 以上の温度分布を持つ 100 トンから 150 トンにもなろうという高温溶融物が圧力容器底部もろとも落下したことになる。

これは、水蒸気爆発に対しては、非常に厳しい条件である。

これらの事実から、TROI 実験の示すもっとも重要な教訓は、自発的な水蒸気爆発が複数回観察されたことである（甲 B 2 1 8 ・ p 9）。

この事実は、被告九州電力や他の電力会社が主張する、水蒸気爆発実験において、自発的な水蒸気爆発は観察されていないという主張を完全に覆すものであり、被告九州電力がこれを無視することは許されるものではない。

被告九州電力が TROI 実験の結果に全く触れていないことの問題点に関しては、滝谷氏も、「九州電力は、水蒸気爆発が外部トリガーなしでは生じなかった COTELS、FARO、KROTOS の 3 実験のみ取り上げ、原告らが準備書面 3 5（・・・）で論じた、外部トリガーなしで水蒸気爆発が生じた TROI の実験には何も言及しておりません（・・・）。このことは、関連する様々な研究事例のうちから自己の主張に有利となる事例のみを恣意的に選択していることを示すものであり、原告らの主張に対する科学的反論には全くなっておりません。・・・TROI の実験を重視して、水蒸気爆発が発生するおそれが十分にあることを、九州電力は真摯に認識すべきである」（甲 B 2 1 7 ・ p 9）。

## 第 5 水蒸気爆発発生の可能性と格納容器に与える影響について

### 1 原発メーカーが、福島第一原発事故以前の段階において、「事前水張りの実施例は海外では存在しない」（甲 A 1 8 6 ・ p 7）と報告していること

（株）東芝の佐藤崇氏の「世界標準と安全設計について～原子力エンジニアからの一提案」（甲 A 1 8 6）を見れば、原発メーカー（東芝）でさえ、福島第一原発事故以前の段階において、過酷事故時において、溶融炉心冷却のための水張りは、危険であり、採用できない、という認識を持っていたことが分かる。

即ち、（株）東芝の原子力エンジニアである佐藤崇氏は、福島第一原発事故の約半年前の 2010 年 9 月 17 日の日本原子力学会において、「EUR（欧州電力事業者要求仕様）は、IVR（炉内保持）もしくはコアキャッチャーを容認。事前水張りの実施例は海外では存在しない」（甲 A 1 8 6 ・ p 7。下線は原告ら訴訟代理人）とか、「水蒸気爆発防止一下部 DW（ドライウェル）への



事前水張りの禁止・不要化」(甲A186・p15)などを内容とする原子炉のモデルの提案が行っており、この時点で、「水張りによる冷却は出来ない」という認識を持っていたと理解することができる。

## 2 過酷事故時に、格納容器下部への事前水張りは自殺行為であること

それにもかかわらず、被告九州電力は、川内原発において、過酷事故時には、格納容器下部に注水して熔融炉心を落下冷却するとしているのであって、自殺行為というほかない。

この点に関しては、2007年から実施されている国際プロジェクトであるSERENAプログラムの実施責任者であるEuropean Commission Institute for Energy(欧州委員会エネルギー研究所)のDANIEL MAGALLON氏が、BAL RAJ SEHGAL編集のNUCLEAR SAFETY IN LIGHT WATER REACTORS Severe Accident Phenomenology(Elsevier Science Publishing Co Inc、2011)において、次のように述べている(以下の日本語訳及び下線は、高島氏による。甲B218・p11)。

「これまでの議論から、実機の中で水蒸気爆発がトリガーされるか、されないかを予測することは事実上不可能」、「水蒸気爆発を防ぐ対策を明確にすることは非常に困難」としている。すなわち、「膜沸騰状態にある熔融燃料と冷却材の混合物には、十分なエネルギーが供給されれば、水蒸気爆発が発生しうる。問題は、トリガーの大きさと、事故時の炉心熔融状態にその大きさのトリガーが生じうるかどうか」だが、「これまでの研究は、このような点について結論が出ておらず、そして、FCI(燃料-冷却材相互作用)の研究についての現状から言って、近い将来においてもこの分野での研究の進展はほとんど期待できない」ので、「水蒸気爆発発生リスクについては、FCIがあれば水蒸気爆発は必ず起きると考える(すなわち、トリガリングされる確率は1)、そして、周辺の構造は、水蒸気爆発に耐えられるように設計」すべきである。

## 3 川内原発には、欧州等で既に設置されているコアキャッチャーを格納容器内に設置するスペースがないこと

既に、欧州などでは、熔融炉心を格納容器内に設置したコアキャッチャー(甲A186・p7参照)に受けて、原子炉圧力容器から流出した熔融炉心を拡げて空冷(一部水冷)する対応をとっている。

ところが、既設の日本の原発(川内原発を含む)では、格納容器内に拡張型のコアキャッチャーを設置するスペースはなく、そこで、規制委員会も、電力会社に対して、その設置を求めているというのが実情である。

最近では、ルツボ内に設置した材料自身の溶融潜熱と蒸発潜熱によって、溶融炉心を冷却するアブレーション冷却技術を応用した、コンパクトなルツボ型コアキャッチャーも提案されているが、これも採用されるには至っていない。

これはおそらく発電コストを計算した結果のことであろうが（甲B218・p11）、規制委員会は、格納容器下部への事前水張りが自殺行為である以上、規制基準に、コアキャッチャーの設置を義務付けるべきである（なお、後付けは不可能と思われることから、実際には、「取り付け可能な装置を開発せよ」ということになろうか。）。

#### 4 水蒸気爆発のシミュレーションの必要性

##### (1) 被告九州電力がそれを行った形跡はないこと

電力会社が、水張り冷却を採用するのであれば、「水蒸気爆発が発生した際の格納容器などに与える応力または負荷、構造物が受けるひずみ」などの評価を行うべきであり、被告九州電力にそれを行った形跡がないことは極めて問題である。

##### (2) 被告九州電力や佐賀地裁の理解の誤り（森山らの論文（甲A183・p34）が「一様」としているのは、融体ジェットの「直径」ではなくて、**0.1～1.0m**の直径になる「確率」であること）

###### ア 被告九州電力や佐賀地裁の理解

被告九州電力は、「原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（第58回）におけるコメント回答」（甲A187・p33）において、前述の森山氏らの論文（甲A183）に関して、「炉外水蒸気爆発の可能性について、森山氏によるJASMINEに関する日本原子力学会誌論文（2006年）に対する事業者見解を示すこと」という「指摘事項」に対する「回答」として、「炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率について、JASMINEコードを用いて水蒸気爆発が発生したという条件における格納容器破損確率が評価されている。この評価では、恣意的なトリガリングの幅が大きく評価されていること、融体ジェット直径を0.1m～1mの一様分布として与えているため流体の運動エネルギーの幅が大きく評価されていること、フラジリティを簡易的な取扱いとしたこと条件付確率として6.8E-2（評価値）が算出されている。表1のとおり実機では、トリガリングとなりうる要素が無いこと、融体ジェットの口径が0.5m程度であること、原子炉容器遮蔽壁構造物以外の構造物で吸収できるエネルギーがあることから格納容器への脅威にはならないと考えられる。」（下線は原告ら訴訟代理人）と回答し、森山らの論文（甲A183）が、「融体ジェット直径分布として、0.1

～1.0mの一樣分布を与え、液体の運動エネルギーを大きく評価している」ことを問題視している。

また、玄海原発の再稼働禁止仮処分申立事件に対する佐賀地方裁判所の2018年3月20日付け決定でも、上記「回答」と全く同様に、「(森山らの論文は)融体ジェット直径分布として、0.1～1.0mの一樣分布を与え、液体の運動エネルギーを大きく評価しているところ、これらの評価想定は、実機での想定と異なる」(164頁)と述べて、被告九州電力の「回答」を追認した。

イ 森山らの論文が「一樣」としているのは、融体ジェットの「直径」ではなくて、**0.1～1.0mの直径になる「確率」**であること


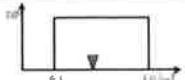
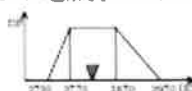
しかし、上記の被告九州電力らの見解・理解は誤っている(甲B218・p11)。

なぜならば、森山らの論文(甲A183・p34)において、一樣としているのは、融体ジェットの「直径」ではなくて、0.1～1.0mの直径になる「確率」だからである。

即ち、森山らの論文(甲A183・p34)では、計算に用いる初期条件の数値の一つとして、「融体ジェット初期直径(m)」の取りうる値を、確率分布関数として、次の表9の中の直方形のグラフとなることを説明している。

この表9の中の直方形のグラフの図は、横軸が直径であり、縦軸は確率を示したものである(計算の際の数値は、その都度、0.1～1.0mの範囲の数値を「さいころ」で設定するということである。)

表9 水蒸気爆発解析の入力条件 (PWR キャビティ)

初期・境界条件	キャビティ水位(m)	4.8
	初期圧力(MPa)	0.2
	初期水温(K)	332～389 (サブクール度 3～60) (※X1) 
	融体ジェット初期直径(m)	0.1～1.0 (※X2) 
	融体ジェット温度(K)	2720～2970 (過熱度 50～300) (※X3) 

(図の中での▼印は「代表ケースの値」とされている。甲A183・p34)

「融体ジェット初期直径 (m)」を「0.1～1.0」としていることの意味

は、森山らの論文の次頁（同 p 35）の表 10 の「X2」の欄を見れば分かるように、決して一様ではない。

即ち、圧力容器溶融底部穴から落下するコリウムのジェット径が、同じ確率で、0.1mから1mの間の数値になるということであって、ジェット径が空間に関して一様ということではなく（なお、時間に関しては「一定」という。）、落下後の時間経過や、落下中や水中での位置による直径の変化を表すものではない（甲 B 2 1 8・p 1 2）。

従って、被告九州電力及び佐賀地裁が「融体ジェット径分布として、0.1～1mの一様分布を与え、運動エネルギーを大きく評価している」としているのは意味不明であり、森山らの論文（甲 A 1 8 3）の内容を誤解しているものである。

なお、福島第一原発事故の際に、圧力容器下部には直径0.3m以上の穴が開いたことが、落下した燃料体の取手部分の存在から確認されており、森山らの論文の設定は極めて妥当な設定といえる。

## 第6 水蒸気爆発の危険性に関するまとめ

最後に、本書面で論じた水蒸気爆発の危険性の問題に関して、高島氏の意見書（甲 B 2 1 8）のまとめを紹介して終わることとする。

- ① これまでに実施された、核燃料溶融物を使用した各種実験では、自発的、外部トリガーを加えたもので水蒸気爆発の発生が確認されており、これらを踏まえると、水蒸気爆発発生危険がないとは言えない。被告九州電力の準備書面 13 の記述は妥当性を欠いている。
- ② 外部トリガーなしで自発的に水蒸気爆発が生じた TROI 実験を無視して、「水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さい」とする被告九州電力の主張は科学的妥当性を欠く。
- ③ 被告九州電力は、水蒸気爆発が発生した場合の検討を行っておらず、水蒸気爆発は発生しないと結論付けているに等しく、「極めて発生しにくい」と述べていることと矛盾する。
- ④ 水蒸気爆発研究の現状から、研究者が述べるように、水蒸気爆発発生リスクについては、FCI（燃料-冷却材相互作用）があれば水蒸気爆発は必ず起きると考え（すなわち、トリガリングされる確率は1）、構造は水蒸気爆発に耐えられるように設計すべきである。被告九州電力は、水蒸気爆発は発生しないものとしているが、少なくとも、水蒸気爆発発生を想定した構造解析を実施すべきである。

以上