平成２６年（行ウ）第１５２号　大間原子力発電所建設差止等請求事件

原　告　　函　　館　　市

被　告　　国　　外１名

準 備 書 面 （ ６ ４ ）

～高島意見書に基づく水蒸気爆発に係る主張～

２０２６（令和８）年１１月６日

東京地方裁判所民事第３部合Ａ①係　御中

原告訴訟代理人

弁護士　　河　　合　　弘　　之

ほか

目　　次

第１　本書面の位置づけ 3
第２　格納容器内の水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いと評価することができる国際的な実験や研究は存在しないこと 4
１　国際的な実験や研究の評価と設置許可基準規則３７条２項及びその解釈違反との関係 4
２　水蒸気爆発に係る実験、研究の評価 5
⑴　水蒸気爆発に係る各実験、研究から得られる知見 5
⑵　水蒸気爆発に係る実験、研究の目的及び実験結果 6
⑶　まとめ 20
３　むしろ、各種実験結果は、水蒸気爆発の発生可能性が低いとはいえないことを示していること 21
⑴　ファロ実験（❷）における水蒸気爆発の発生率 22
⑵　クロトス実験（❸）における水蒸気爆発の発生率 22
⑶　コテルス実験（❶）における水蒸気爆発の発生率 23
⑷　トロイ実験（❹）における水蒸気爆発の発生率 23
⑸　セレナ計画フェーズ２（❺）における水蒸気爆発の発生率 24
⑹　まとめ 25

第１　本書面の位置づけ

準備書面（６３）では、水蒸気爆発の危険に関して、設置許可基準規則３７条２項及びその解釈において、確率論的リスク評価の結果にかかわらず、格納容器破損モード[1]として必ず（例外なく）想定するとされているにもかかわらず、本件原発の設置変更許可申請においてはこれが想定されてないこと、したがって、本件原発は新規制基準に適合しないこと、これを看過して原規委が許可処分を行うとすれば同処分は違法であり差し止められるべきであること、民事訴訟としても、原告の存立維持権を侵害する具体的危険の存在が事実上推認されること等を主張した。

同書面第３・３項⑶では、被告会社が、２０２６（令和８）年９月１０日に行われた第１４３５回審査会合において、申請内容を一部修正し、炉心損傷等防止ガイドの本件注意規定[2]に沿った説明を行っているように見受けられることを示したうえで（甲Ｃ５３）、本件注意規定は、設置許可基準規則３７条２項（及びその解釈）に反し無効であること、従って、いかに本件注意規定に適合していたとしても、設置許可基準規則３７条２項（及びその解釈）に反することなどを主張した。

もっとも、この申請の修正部分（水蒸気爆発の可能性が極めて小さいとする評価）についても、科学的にみて適切な評価とはいい難い。この点に関し、原告は、熱工学の専門家である高島武雄氏に意見書を作成していただいたので（甲Ｃ54）、本書面では、同意見書に基づき、被告国及び被告会社の主張が、科学的にみても何ら根拠のないもの（安全を軽視するもの）であることを述べる。

---

[1] 炉心の著しい損傷に伴って発生し、格納容器の健全性を損なう恐れのある物理現象等、格納容器破損の原因となる現象。

[2] 炉心損傷等防止ガイド 3.2.3 項⑶の「（注）実ウラン溶融酸化物を用いた実験では、衝撃を伴う水蒸気爆発は発生していない。従って、水蒸気爆発の発生の可能性は極めて低いことを示すこと」との規定（乙Ａ５０・１６頁）。

第２　格納容器内の水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いと評価することができる国際的な実験や研究は存在しないこと

１　国際的な実験や研究の評価と設置許可基準規則３７条２項及びその解釈違反との関係

⑴　前述のとおり、本件注意規定は、設置許可基準規則３７条２項（及びその解釈）に反し無効であり、本件原発に係る申請内容がいかに本件注意規定に適合していたとしても、本件原発は、設置許可基準規則３７条２項（及びその解釈）に適合しないものである。

したがって、本件訴訟の結論を導くために、国際的な実験や研究の評価、水蒸気爆発の発生可能性が大きいのか小さいのかといった判断は、本来不要である。

⑵　これは、単に文理解釈の結果というだけでなく、実質的にも妥当である。

すなわち、被告国の指摘する国際的な実験や研究は、規則制定時点で存在しており、それらも踏まえて、頻度又は影響の観点（頻度が小さくても、発生時の影響が重大な場合には想定すべきということになる）から「必ず想定する格納容器破損モード」を定めた規則が制定されている（つまり、国際的な実験や研究の成果は、規則制定時に考慮済みである）。

したがって、再度、国際的な実験や研究の評価を行い、水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いという頻度を持ち出すことは、国際的な実験や研究について、矛盾した評価を行うに等しい。規則違反を正当化する理由には全くならない。

⑶　そうであるにもかかわらず、被告国は、「ある事象の発生可能性が極めて低いと科学的根拠をもって評価し、その評価結果が妥当であることが確認できれば、そのような事象について有効性評価の対象外とすること」は合理的であると主張し、科学的根拠として、「原子炉圧力容器外の水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いと評価することができる国際的な実験や研究が存在する」などと主張する（第２９準備書面・３９頁）。

具体的には、「原子炉圧力容器外溶融燃料‐冷却材相互作用による水蒸気爆発

の実験については、二酸化ウラン（UO_2）と酸化ジルコニウム（ZrO_2）の溶融燃料を模擬した実験であるCOTELS（❶）、FARO（❷）、KROTOS（❸）及びTROI（❹）などが知られているところ、これらの実験で得られたデータを整理し、実験条件と実機条件を比較すると、実機においても大規模な水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことが確認されている。また、OECD／NEA／CSNIのSERENA2（❺）で実施された、TROI‐VISU実験においても、外部トリガーを作用させなければ水蒸気爆発は発生しないことが確認されている」などと述べている（第２９準備書面・１１頁。❶ないし❺の番号は便宜上引用者が付した）。

そこで、あくまでも念のためではあるが、これらの評価が不当であることについて、高島意見書（甲Ｃ54）も踏まえつつ、以下、主張する。

２　水蒸気爆発に係る実験、研究の評価

⑴　水蒸気爆発に係る各実験、研究から得られる知見

ア　水蒸気爆発に係る実験や研究が、究明獲得途上のものであることは、被告国も認めている。すなわち、被告国も、「水蒸気爆発を含む溶融燃料‐冷却材相互作用は、原子炉格納容器破損に至る現象の一つと考えられ、調査、研究が続けられてきたところ、…（略）…水蒸気爆発も圧力スパイクもリスクの観点で解決済みとされるまでには至っておらず、特に水蒸気爆発については、世界的な実験や解析モデルの開発が行われている状況にある」と述べている（第２９準備書面・１０～１１頁）。

そのため、水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いという結論に結び付くような解明はなされていないのが現状である。

イ　現在の科学水準として、水蒸気爆発は、その発生には、溶融物の組成・温度、過熱度、粒状溶融物の形状、粗混合の分散状態、ボイド率、水温、水深、溶融物と水の接触状況等影響を与えるパラメータと現実の状況等が複雑に絡み合い、未だ発生機序は不確かであり、いつ、どのように水蒸気爆発が起こるという予測は

できない。

ウ　一般に、実験は、目的を設定し、そのための条件、設備を用意し、実験結果は目的に沿って何を測定し、何を確認できたかという評価がなされるものである。

被告国の指摘する水蒸気爆発に係る各実験の目的は異なり、各実験結果は目的との関係で評価、判断されるなければならない。以下、❶ないし❺を含む各実験の目的及び結果を述べ、各実験から格納容器内の水蒸気爆発の発生可能性は極めて低いと評価することはできないことを述べる。

⑵　水蒸気爆発に係る実験、研究の目的及び実験結果

水蒸気爆発に係る主な実験としては、１９９８（平成１０）年に始まったアルファ（ALPHA）試験以降、クロトス（KROTOS）試験（❸）、ファロ（FARO）試験（❷）、コテルス（COTELS）試験（❶）、トロイ（TROI）試験（❹）が行われた。２００２（平成１４）年１月から、セレナ（SERENA）計画（OECD/SERENA計画はシビアアクシデント時の水蒸気爆発現象を対象とした国際研究プログラムであり、各参加機関の解析手法の比較・検討を通じて、実機解析における有効性を評価することを目的としている）が行われ（❺）、同計画は、フェーズⅠ（SERENA-1）とフェーズⅡ（SERENA-2）に分かれて行われ、同計画のフェーズⅡにおいてトロイ（TROI）とクロトス（KROTOS）の装置を用いた実験が行われた。

これらのうち、❶ないし❹の実験の目的と概要の一覧については、図表１のとおりである。

表２　大規模実験の目的等

実験	実施主体	試料	溶融物重量(kg)	おもな目的	対応する主な実験番号	外部トリガー	結果	備考
FARO	JRC ISPRA	溶融燃料模擬物質	最大177ｋｇ	粗混合	L-1～L-28			
			39,92	自発的水蒸気爆発発生の有無	L-29～L-32	なし	爆発せず	
			100	水蒸気爆発発生の有無	L-33	あり	爆発アリ	
KROTOS	JRC ISPRA	アルミナ	1.4～1.7	拡大伝播	K38～K44,49,50,	ありorなし	両方	
		コリウム (UO_2:ZrO_2=80:20)	2.6～5.4		K32～	なし	爆発せず	
					K37,45,46,47,52,	あり	両方	
TROI	KAE(Korea Atomic Energy Res.Inst.)	純ジルコニア	最大17kg	自発的水蒸気爆発発生の有無	TROI-4,15	なし	一部爆発	*1
		共晶コリウム (UO2:ZrO2=70:30)		爆発の大きさ	TROI-13,14	なし，あり	一部自発爆発アリ	*2,*3
		鉄添加共晶コリウム		爆発の大きさ		あり		
COTELS	NUPEC	溶融燃料模擬物質	最大57.1ｋｇ	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水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水蒸気爆発に至るが,外部トリガーがなければ弱い圧力スパイクを持った。
*3外部トリガーが強力な水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溶融物に15%の金属成分を含む
*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

図表１　甲Ｃ５４・１８頁　表２　大規模実験の目的等

ア　アルファ（ALPHA）試験

(ｱ) アルファ試験の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54)・２０頁以下のとおりである。

この試験は、１９８８（昭和６３）年度から開始された事故時格納容器挙動試験計画の一環であり[3]、この計画は「シビアアクシデント時に格納容器に加わる熱負荷、圧力負荷を明らかにするとともに、格納容器からの漏えい（リーク）量と漏えい機構を明らかにすること」が目的とされている（甲Ｃ５５・１頁)。

(ｲ) このうち、溶融炉心冷却材相互作用試験では、鉄５８％と酸化アルミニウム４２％の混合物を溶かし、２７００K[4]（約２４２７℃）溶融物の１０kg及び２０kg

[3] 「ALPHA」とは、Assessment of Loads and Performance of Containment in a Hypothetical Accident の略である。

[4] K（ケルビン）は国際単位系（SI）における熱力学温度（絶対温度）の基本単位であり、絶対零度（約-273℃）を０K（０ケルビン）とする。

を水中に落下させた。１０kgを水中に落下させた場合には水蒸気爆発は起きなかったが、２０kgを落下させた場合には自発的水蒸気爆発が起こった（甲Ｃ５54頁）。原子炉実機では、数ｔから１０ｔの溶融物が落下する可能性があるため、この結果を直ちに実機へ外挿して評価することはできないが、１９９２（平成４）年まで続いた実験の中で、図表２のとおり、２３回中１４回（約６１％）の水蒸気爆発の発生が確認されている。

Table 1: Summary of ALPHA-STX0xx experiments

Run No.	Melt mass	Pressure	Cover gas	Water temp.	Water pool	Explosion	Water depth	Water mass	Comment
	(kg)	(MPa)		(K)		(Yes/No)	(cm)	(kg)	
STX002	20	0.1	Air	289	Steel	Yes	100	785	
STX003	20	0.1	Air	292	Steel	Yes	100	785	
STX005	20	0.1	Air	300	Acryl(L)	Yes	100	774	
STX009	20	0.1	N_2	289	Acryl(L)	Yes	100	774	
STX016	20	0.1	Air	295	Acryl(S)	Yes	90	174	
STX017	20	0.1	Air	286	Acryl(S)	Yes	90	174	
STX018	20	0.1	Air	283	Acryl(S)	Yes	90	174	
STX001	10	0.1	Air	293	Steel	No	100	785	
STX010	10	0.1	Air	297	Acryl(L)	Yes	100	774	
STX013	10	0.1	Air	284	Acryl(L)	No	100	774	
STX014	20	0.1	Air	372	Steel	No	100	816	Saturated water
STX008	20	1.6	N_2	288	Acryl(L)	No	100	774	Elevated pressure
STX012	20	1.6	N_2	290	Acryl(L)	No	100	774	Elevated pressure
STX015	20	1.0	N_2	282	Acryl(L)	No	100	774	Elevated pressure
STX025	20	0.5	Air	280	Acryl(M)	Yes	90	416	Elevated pressure
STX023	20	0.1	Air	285	Acryl(L')	Yes	30	358	Shallow pool
STX024	20	0.1	Air	280	Acryl(M)	Yes	80	318	CO_2 is dissolved
STX006	20	0.1	Air	298	Acryl(L)	No	100	774	Dispersion device
STX011	20	0.1	Air	290	Acryl(L)	Yes (Mild)	100	774	Dispersion device (locally broken)
STX019	20	0.1	Air	281	Acryl(M)	Yes	90	392	Dispersion device (broken?)
STX020	20	0.1	Air	281	Acryl(L)	No	100	774	Dispersion device
STX021	20	0.1	Air	281	Acryl(L)	Yes	90	697	Dispersion device (under water)
STX022	20	0.1	Air	286	Acryl(L)	No	80	620	Dispersion device

図表２　甲Ｃ５４・２２頁　表４　ALPHA 試験における STX025 までの実験結果

(ｳ) 被告国は、このように多数回の水蒸気爆発を生じた実験例があるにもかかわらず、第２９準備書面においてこれを挙げていない。考慮を怠ったのだとすれば、要考慮事項の不考慮である。

イ　ファロ（FARO）実験（❷）

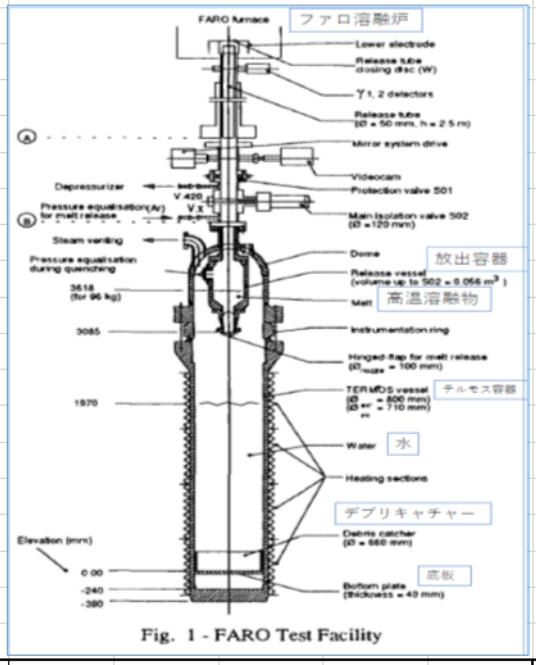
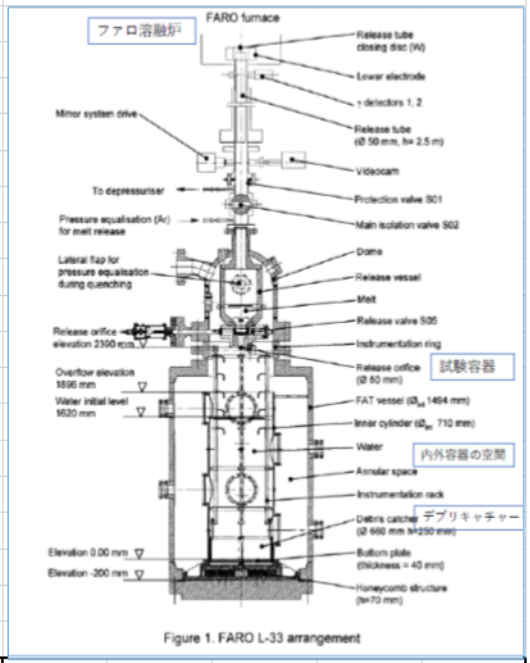
(ｱ) ファロ実験の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54)・２３頁以下のとおりである。

水蒸気爆発の挙動を調べるには、①トリガー[5]が掛かる前と、②トリガーが掛かった後の実験データが必要である。

(ｲ) ファロ実験で用いられた実験装置は二種類あり、図表３のとおりである。

[5] 「トリガー」とは、高温の溶融炉心と水（冷却材）が接して形成された膜沸騰状態から、爆発的な熱の移動や急激な体積膨張を引き起こす「きっかけ（刺激)」をいう。

表６　　2種類のFARO実験装置

	粗混合実験用装置					爆発実験用装置				
	 Fig. 1 - FARO Test Facility					 Figure 1. FARO L-33 arrangement				
試験ケース	L-06	L-08	L-11	L-14	L-19	L-29	L-31	L-33		
	L-20	L-24	L-27	L-28						
圧力	5	5.8	5	5	5	0.2	0.2	0.4		
(MPa)	2	0.5	0.5							
サブクール度(K)	0	12	2	0	1	97	104	124		
	0	0	1	1						
装置の特徴	内部観察不可，水槽加熱可，粗混合デブリ回収					内部観察可，二重構造水槽				

図表３　甲Ｃ54・２５頁　表６　２種類の FARO の実験装置

ファロ実験のうち、L-1 から L-28 までは、左側に示される実験装置で行われたが、この装置は、主に粗混合状態[6]を解明する目的の実験装置であり、①トリガーが掛かる前の実験データの取得を目的とした実験装置である。L-1 から L-28 までは、粗混合状態をモデル化するために、溶融物の冷却挙動（クエンチング）を解明するために行われたものである。このような実験目的のため、爆発の発生は考えられておらず、装置の水槽は一重であり、内部の観察もできない構造になっ

[6] 「粗混合状態」とは、高温の液体（溶融炉心）が、低温の液体（冷却材＝水）の中に落下・流入し、膜沸騰（蒸気の膜）に覆われた状態で比較的緩やかに混ざり合っている初期状態をいう（甲Ｃ54・６頁）。

ている。また、水蒸気爆発が起こらないような飽和温度に近い水の条件で行われた。したがって、この結果を根拠として、水蒸気爆発が発生しないというのは明確な誤りである。

(ｳ) これに対し、L-29、31 及び 33 の実験では、右側に示されるように、実験装置を二重構造にして水蒸気爆発の発生の有無の確認が行われた。L-29、31 及び 33 の３例は、水蒸気爆発の全過程、すなわち「粗混合過程」と「爆発過程」の両方の把握を目的としたものである。L-29 及び 31 は外部トリガーなしで自発的に水蒸気爆発が起きるかを確認し、L-33 では外部トリガーを加えて実験が行われた。

(ｴ) ファロ実験の結果は、図表４のとおりである。

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	溶融物温度(K)	圧力(MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
FARO	L-06	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	18	2923	5	0	0.87	No	No	-
	L-08	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	44	3023	5.8	12	1.00	No	No	-
	L-11	77wt.%UO_2-19wt.% ZrO_2-4wt.%Zr	151	2823	5	2	2.00	No	No	-
	L-14	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	125	3123	5	0	2.05	No	No	-
	L-19	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	157	3073	5	1	1.10	No	No	-
	L-20	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	96	3173	2	0	1.97	No	No	-
	L-24	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	177	3023	0.5	0	2.02	No	No	-
	L-27	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	117	3023	0.5	1	1.47	No	No	-
	L-28	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	175	3052	0.5	1	1.44	No	No	-
	L-29	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	39	3070	0.2	97	1.48	No	No	-
	L-31	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	92	2990	0.2	104	1.45	No	No	-
	L-33	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	100	3070	0.4	124	1.60	Yes	No	-

図表４　甲Ｃ54・２５頁　表５　FARO 実験の主な条件と結果

これを見ると、全てのケース（１２ケース）で水蒸気爆発が発生していないかのように見えるが、前述のとおり、このうち、Ｌ―１～Ｌ―２８の９ケースは実験の目的や装置が異なっており、水蒸気爆発が発生しなくて当然のものである。

他方、L-33 については、水蒸気爆発が発生していないかのように記載されているが、２００２（平成１４）年から開始されたセレナ計画においては、ファロ実

験の L-33 の結果を「爆発した場合」の例として挙げていること（甲Ｃ54・２７頁)、L-33 において水蒸気爆発が発生したという日本原子力開発機構等の報告書（甲Ｃ６２・２－２頁、甲Ｃ６３・２１頁）があることに照らせば、L-33 では水蒸気爆発が発生したと評価すべきである。

(ｵ) なお、図表４のうち、L-06 から L-28 までは、サブクール度[7]が０から１２Ｋという、飽和温度（沸点）との差がほとんどない状態で実施されているところ、先行研究等によって、そのような状態では水蒸気爆発は起こりにくいことが示されているため、このことからも、水蒸気爆発が起こらないような前提での実験であったことが分かる（甲Ｃ５６・１７７１頁)。

ウ　クロトス（KROTOS）実験（❸）

(ｱ) クロトス実験の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54)・２９頁以下のとおりである。

クロトス実験は、①トリガーが掛かる前、②トリガーが掛かった後の実験データのうちの、②トリガーが掛かった後の実験データの取得を目的とした実験である。水蒸気爆発の過程を明らかにするため、十分大きな外部トリガーを加えることを前提としている。

(ｲ) クロトス実験の結果は、図表５のとおりである。

[7] 「サブクール度」（過冷却度）とは、液体がその圧力における飽和温度（沸点）よりも、さらに何度低く冷却されているかを示す温度差のことである。サブクール度が低いということは、飽和温度（沸点）に近い状態であることを意味する。

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量(kg)	溶融物温度(K)	圧力(MPa)	サブクール度(K)	水深(m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
KROTOS	K38	Alumina	1.5	2665	0.1	79	1.11	No	Yes	1.45
	K40	Alumina	1.5	3073	0.1	83	1.11	No	Yes	0.9
	K41	Alumina	1.4	3073	0.1	5	1.11	No	No	-
	K42	Alumina	1.5	2465	0.1	80	1.11	No	Yes	1.9
	K43	Alumina	1.5	2625	0.21	100	1.11	No	Yes	1.3
	K44	Alumina	1.5	2673	0.1	10	1.11	Yes	Yes	2.6
	K49	Alumina	1.5	2688	0.37	120	1.11	No	Yes	2.2
	K50	Alumina	1.7	2473	0.1	13	1.11	No	No	-
	K51	Alumina	1.7	2748	0.1	5	1.11	No	No	-
	K32	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.0	3063	0.1	22	1.08	No	No	-
	K33	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.2	3063	0.1	75	1.08	No	No	-
	K35	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.1	3023	0.1	10	1.08	Yes	No	-
	K36	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.0	3025	0.1	79	1.08	Yes	No	-
	K37	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.2	3018	0.1	77	1.11	Yes	No	-
	K45	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.1	3106	0.1	4	1.14	Yes	No	-
	K46	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	5.4	3088	0.1	83	1.11	Yes	Yes	-
	K47	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	5.4	3023	0.1	82	1.11	Yes	No	-
	K52	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	2.6	3133	0.2	102	1.11	Yes	Yes	0.02
	K53	80wt.%UO_2-20wt.%ZrO_2	3.6	3129	0.36	122	1.11	Yes	Yes	0.05

図表５　甲Ｃ54・３０頁　表７　KROTOS 実験の主な条件と結果

アルミナ（Al_2O_3）を用いた９回の実験において、外部トリガーを与えた１回のうち１回で水蒸気爆発が発生している。外部トリガーを与えない８回のうち５回で水蒸気爆発が発生している。

二酸化ウラン（UO_2）と酸化ジルコニウム（ZrO_2）の混合物を用いた１０回の試験において、外部トリガーを与えた８回のうち３回で水蒸気爆発が発生している。外部トリガーを与えない２回のうち水蒸気爆発が発生したものはなかった。

(ｳ) クロトス実験は、種々のパラメータによる水蒸気爆発の発生の有無も含む、圧力波の測定を通して、爆発の激しさに関するデータを収集することを目的として行われている。詳細は、高島意見書（甲Ｃ54）・３１頁以下に記載されているが、要するに、爆発状況のデータを取得して、爆発状況を解明することが目的であり、水蒸気爆発が発生する可能性が小さいかという頻度に関する実験ではない。

エ　コテルス（COTELS）実験（❶）

(ｱ) コテルス実験の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54）・３５頁以下のとおり

である。

(ｲ) コテルス実験の結果は、図表６のとおりである。

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
COTELS	A1	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	56.3	0.20	0	0.4	No	No	-
	A4	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	27.0	0.30	8	0.4	No	No	-
	A5	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	55.4	0.25	12	0.4	No	No	-
	A6	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	53.1	0.21	21	0.4	No	No	-
	A8	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	47.7	0.45	24	0.4	No	No	-
	A9	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	57.1	0.21	0	0.9	No	No	-
	A10	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	55.0	0.47	21	0.4	No	No	-
	A11	55wt.%UO_2-25wt.%Zr-5wt.%ZrO_2-15wt.%SS	53.0	0.27	86	0.8	No	No	-

図表６　甲Ｃ54・３６頁　表８　COTELS 実験の主な条件と結果

コテルス実験では、８回の試験ケースで、いずれも水蒸気爆発が発生していないが、それは、次のような理由によるものと考えられる。

すなわち、コテルス実験では、溶融物の温度を測定せず、A11 の１回（８６Ｋ）を除き、すべてがサブクール度の低い水温（０～２４Ｋ）における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分かっていた条件によるものである。

実験に用いた溶融物の組成も、他の実験のものとはかなり異なり、二酸化ウラン、ジルコニウム、二酸化ジルコニウム及びステンレス鋼（SS）の混合物とされており、他の実験結果との比較は困難である。

(ｳ) なお、コテルス実験の結果は、OECD が行った SERENA 計画において解析の対象にされていない。それだけ比較が困難か、信頼性の乏しい結果という可能性が高い。

オ　トロイ（TROI）実験（❹）

(ｱ) トロイ実験の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54)・３６頁以下のとおりである。

トロイ実験の目的は、「韓国の次世代原子炉（KNGR）の圧力容器外水蒸気爆発の一般的な安全性の問題を解決し、適切な重大事故管理（SAM）戦略を提案することである。また、FCI 研究集団（コミュニティ）にとって不可欠かつ優先度の高い研究テーマである、水蒸気爆発の変換効率に対する材料特性の影響の理解にも貢献する」こととされる（甲５７・１頁)。

(ｲ) トロイ実験の結果は、図表７及び８のとおりである。

試験名	試験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
TROI	1	ZrO_2/Zr (99/1)	5	>3373	0.1	365	0.67	-	Steam Spike	-
	2	ZrO_2/Zr (99/1)	5.5	>3373	0.1	365	0.67	-	No	-
	3	ZrO_2/Zr (99/1)	4.88	>3373	0.1	323	0.67	-	No	-
	4	ZrO_2/Zr (99/1)	4.2	>3373	0.1	292	0.67	-	Yes	-
	5	ZrO_2/Zr (98.5/1.5)	2.9	3373	0.1	337	0.67	-	Yes	-
	9	UO_2/ZrO_2 (70/30)	4.3	3200	0.1	296	0.90	-	No	-
	10	UO_2/ZrO_2 (70/30)	8.7	3800	0.117	298	0.67	-	Yes	-
	11	UO_2/ZrO_2 (70/30)	9.2	>3800	0.111	296	0.67	-	No	-
	12	UO_2/ZrO_2 (70/30)	8.4	3800	0.11	293	0.67	-	Yes	-
	13	UO_2/ZrO_2 (70/30)	7.7	2600 (注1)	0.108	292	0.67	-	Yes	0.40%
	14	UO_2/ZrO_2 (70/30)	6.5	3000 (注2)	0.105	285	0.67	-	Yes	-
	17	UO_2/ZrO_2 (70/30)						-	No	-
	18	UO_2/ZrO_2 (78/22)	9.1					-	-	-
	21	UO_2/ZrO_2 (80/20)	17.0	3000	0.110	298	1.30	No	No	-
	22	UO_2/ZrO_2 (80/20)	17.0	2900	0.110	297	1.30	No	No	-
	23	UO_2/ZrO_2 (80/20)	17.0	3600	0.110	293	1.30	No	No	-
	24	ZrO_2	9.5	3600	0.110	288	0.67	No	Yes	-
	25	UO_2/ZrO_2 (70/30)	15.0	3500	0.110	287	0.67	No	Steam Spike	-
	26	UO_2/ZrO_2 (80/20)	17.0	3300	0.106	283	0.67	No	Steam Spike	-

(注1) 参考文献[16]によれば温度計測に問題があり，実際には3500K程度以上と推測されている。
(注2) 参考文献[16]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており，計測の不確かさが大きいとされている。

図表７　甲Ｃ54・３８頁　表９　TROI 実験の主な条件と結果（1/2）

試験名	試験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
TROI	29	UO_2/ZrO_2 (50/50)	11.5					-	No	-
	32	UO_2/ZrO_2 (87/13)						-	No	-
	34	UO_2/ZrO_2 (70/30)	10.5	~3000		341	0.67	Yes	Yes	0.63
	35	UO_2/ZrO_2 (70/30)	8	~3000	0.110	334	1.30	Yes	Yes	0.21
	36	UO_2/ZrO_2 (70/30)	5.3	~3000		305	0.95	Yes	Yes	0.50
	37	UO_2/ZrO_2 (78/22)	8.1	~3000	0.104	313	0.95	Yes	Yes	0.01
	38	UO_2/ZrO_2 (78/22)	5.3	~3000	0.105	288	1.30	-	No	-
	39	UO_2/ZrO_2 (78/22)	3.4	~3000	0.106	285	1.30	-	No	-
	40	UO_2/ZrO_2 (70/30)	11.1	~3000	0.312	287	1.30	-	No	-
	49	$UO_2/ZrO_2/Zr/Fe$ (62.3/15/11.7/11)	15.96	2730(3360)				-	-	-
	50	$UO_2/ZrO_2/Zr/Fe$ (59.5/18/11.9/10.6)	14.46					-	-	-
	51	$UO_2/ZrO_2/Zr/Fe$ (60.5/16.7/12.1/10.7)	6.3 (14.2 load)	2695(3420)	0.115	294	1.30	Yes	Yes	-
	52	$UO_2/ZrO_2/Zr/Fe$ (61/16/12/11)	8.6 (14.1 load)	2650	0.116	285	1.30	Yes	Steam Spike	-

(注1) 参考文献[16]によれば温度計測に問題があり，実際には3500K程度以上と推測されている。
(注2) 参考文献[16]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K，3200K)を示しており，計測の不確かさが大きいとされている。

図表８　甲Ｃ54・３８頁　表１０　TROI 実験の主な条件と結果（2/2）

トロイ実験では、３２回の試験ケースのうち、１２ケースで水蒸気爆発が発生し、４ケースで圧力スパイク[8]（Steam Spike）が発生している。１２ケースのうち、5ケースは外部トリガーが加えられているが、７ケースは外部トリガーが加えられておらず、自発的に水蒸気爆発が発生したことが示されている。

(ｳ) トロイ実験で重要なのは、水蒸気爆発が発生した溶融物温度が、実機でもあり得る温度であり、実機における水蒸気爆発発生の可能性を示している点である（甲Ｃ54・３９頁以下）。

実機における溶融燃料の温度は、３０００Ｋ（約２７２７℃）程度にはなり得ると考えられるところ、例えば、ケース 14 では、投入温度３０００Ｋで自発的な水蒸気爆発が発生している。

[8] 「圧力スパイク」とは、高温の溶融炉心と冷却材（水）の相互作用のうち、水蒸気による圧力上昇が発生するが、衝撃波を伴わず、爆発的現象に至らないものをいう。

また、ケース 13 は、２６００Ｋとされているが、これは温度計測に問題があったとされる。セレナ計画では、ケース 13 の解析の際に、高温溶融物温度を～３３００Ｋ（約３３００K の意味）として解析しており、この程度の温度もあり得ないものではない（甲Ｃ６３・４９頁）。

(ｴ) 他方、TROI 実験は、水深１３０㎝以下で行われていることに注意が必要である。

水深６７㎝では８ケース、９５㎝では２ケース、１３０㎝では２ケースで水蒸気爆発が発生し、６７㎝の８ケースのうち、７ケースは外部トリガーが加えられていない自発的な爆発であった。

本件原発が格納容器内に想定している水深２ｍ（当初の申請では３ｍ）ではどのようになるのか、この実験結果からは分からない。

カ　セレナ（SERENA）計画（❺）

(ｱ) セレナ計画の概要等については、高島意見書（甲Ｃ54）・４４頁以下のとおりである。

セレナとは、「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[9]」を意味し、原発において水蒸気爆発が発生することを前提にして、水蒸気爆発現象の解明（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としている（甲Ｃ54・４５～４６頁、甲Ｃ６０）。水蒸気爆発が起こるか起こらないかを解明することを目的としたものではない。

SERENA 計画は、フェーズ１（SERENA1）とフェーズ２（SERENA2）の２段階にわたって行われた。フェーズ１では実験は行われず、既存の実験結果（ファロ実験（L-14、L-28 及び L-33）、クロトス実験（K44）及びトロイ実験（13、34））の成果を用いた検討・解析を行った。

---

[9] Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications の略。

フェーズ２では、TROI と KROTOS の装置を用いて、それぞれ６回、計１２回の外部トリガーを与えた実験が行われた。より原子炉に近い状況での蒸気爆発に関する実験データを提供すること等を目標とした（甲Ｃ６１）。要するに、「どの程度の爆発が、どの程度の確率で起こるか」を、「解析コードによって精度をあげて、把握する」ことを目的としていたのである。これらの１２回という数少ない実験で、かつ、外部トリガーを与えた実験から、外部トリガーがない自発的な水蒸気爆発発生の有無の結論を導き出すことは不可能である。

(ｲ) フェーズ１の結論としては、爆発時にはキャビティの壁面には許容値以上の負荷がかかることがわかった（甲Ｃ６１、甲Ｃ６３・８頁）。原子炉容器外の FCI についてはそのシナリオを排除できないということであった。

(ｳ) フェーズ２の実験結果は、図表９のとおりである。

試験名	試験ケース	溶融物組成 (wt%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギ変換効率(%)
SERENA (TROI/ KROTOS)	TS-1	UO_2/ZrO_2 (73.4/26.6)	15.4	~3000	0.4	301	1.0	Yes	Yes	0.12
	TS-2	UO_2/ZrO_2 (68.0/32.0)	12.5	3063	0.2	334	1.0	Yes	Yes	0.28
	TS-3	UO_2/ZrO_2 (71.0/29.0)	15.9	3107	0.2	331	1.0	Yes	Yes	0.22
	TS-4	UO_2/ZrO_2 (81.0/19.0)	14.3	3011	0.2	333	1.0	Yes	Yes	0.35
	TS-5	$UO_2/ZrO_2/Zr/U$ (76.0/18.3/5.0/0.7)	17.9	2940	0.2	337	1.0	Yes	Steam Spike	0.06
	TS-6	$UO_2/ZrO_2/Fe_2O_3$/FP (73.3/18.5/4.9/3.3)	9.3	2910	0.2	338	1.0	Yes	Yes	0.66
	KS-1	UO_2/ZrO_2 (70.0/30.0)	2.4	2969	0.4	302	1.1	Yes	Yes	0.10
	KS-2	UO_2/ZrO_2 (70.0/30.0)	3.9	3049	0.2	333	1.1	Yes	Yes	0.08
	KS-3	UO_2/ZrO_2 (70.0/30.0)	0.8	2850	-	332	1.1	Yes	-(注1)	-(注1)
	KS-4	UO_2/ZrO_2 (80.0/20.0)	2.3	2958	0.2	332	1.1	Yes	Yes	0.18
	KS-5	$UO_2/ZrO_2/Zr$ (80.1/11.4/8.5)	1.7	2864	0.2	327	1.1	Yes	Energetic event(注2)	-(注2)
	KS-6	$UO_2/ZrO_2/Fe_2O_3$/FP (73.0/20.4/4.1/2.5)	1.7	2853	0.2	340	1.1	Yes	Yes	~0

(注 1) 実験失敗
(注 2) 計測失敗

図表９　甲 54・５１頁　表１２　SERENA 計画フェーズ２で行われた実験の主な条件と結果

フェーズ２で行われた１２ケースのうち、実験・計測の失敗の２ケースを除く

１０ケース中、９ケースで水蒸気爆発が発生し、１ケースで圧力スパイクが発生している。

(ｴ) 解析で得られた結果としては、実機への適用検討でも、原子炉キャビティ[10]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。

「解析コードによる計算では、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[11]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」と報告されている（甲Ｃ６４・１２頁)。すなわち、代表的な計算モデルで炉外で水蒸気爆発が起こった場合には、PWR では原子炉キャビティ側面、底部とも破壊され、BWR では底部が破壊されるということになると結論付けられたのである。

⑶ まとめ

上記のとおり、各種実験の目的は異なり、水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを明らかにすることを目的とした実験はなく、また、水蒸気爆発の可能性が極めて低いことを示した実験結果もない。

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

ファロ実験(❷)は、L-1 から L-28 までは、粗混合状態をモデル化するために、

---

[10] 「原子炉キャビティ」とは、原子炉圧力容器の周囲にある空間をいい、ここでは、下部（真下）にある空間を指している。ここに溶融炉心が落下して水蒸気爆発が発生する。

[11] 「力積」(impulse）とは、物体に作用する力を時間で積分した量であり、運動量の変化に等しい。つまり、物体に加える力が大きいほど、また、時間が長いほど、その物体の運動量は大きく変化するということを意味する。

溶融物の冷却挙動（クエンチング）を解明するための実験である。L-29、31 及び 33 の 3 例は、水蒸気爆発の全過程、すなわち「粗混合過程」と「爆発過程」の両方の把握を目的とした実験である。

クロトス実験（❸）は、爆発が発生した後の現象を調べることを目的とした実験である。

トロイ実験（❹）は、溶融炉心が、低圧の冷水と相互作用するときにどの程度強力な水蒸気爆発につながるかどうかを調査し、蒸気爆発の熱エネルギーから機械エネルギーへの変換比を測定することを目的とした実験である。

セレナ計画（❺）は、これまでの試験を踏まえた集大成として、原発における水蒸気爆発が起きることを前提にして、水蒸気爆発現象の解明(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。

各実験・研究は、水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いことを明らかにする目的では行われておらず、また、水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いという実験結果の評価は得られていない。

これらの結果を踏まえて、水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いと評価することは、科学的根拠に基づくものとはいえず、不合理である。

3　むしろ、各種実験結果は、水蒸気爆発の発生可能性が低いとはいえないことを示していること

各種実験において、実機における溶融炉心と同成分である二酸化ウラン及び二酸化ジルコニウム混合物を用いた実験は、クロトス実験の一部、ファロ実験、コテルス実験、トロイ実験、セレナ計画のフェーズ２である（ただし、本件原発は、フルＭＯＸの原子炉であり、二酸化ウランだけでなく、二酸化プルトニウムも含まれている)。

これらの実験結果は、被告国が主張するように、本件原発で水蒸気爆発が発生

する可能性が極めて低いことを示すものでないことは、２項で述べたとおりであるが、むしろ、それ以上に、水蒸気爆発が発生する可能性が低いとはいえないことを示しているともいえる。以下に、各実験における水蒸気爆発の発生確率を示す。

⑴　ファロ実験（❷）における水蒸気爆発の発生率

ア　実験は合計１２回行われているが、このうち、Ｌ-1 からＬ-28 は、水蒸気爆発が起こらないことを前提とした実験装置で行われ、水蒸気爆発が起こらないよう低サブクール度（０～１２Ｋ）の条件下で行われているから、これらのケースで水蒸気爆発が起きていないのは当然の結果であり、水蒸気爆発が起きていない実験結果としてカウントできない。

イ　試験ケースＬ-29、31 及び 33 は、低圧、高サブクール度の実験環境で行われ、Ｌ-33 には外部トリガーを与えている。Ｌ-33 の水蒸気爆発発生の有無について、図表４では発生していないかのように記載されているが、Ｌ-33 では水蒸気爆発が起こったと評価しているものが複数ある（甲Ｃ５８、５９及び６０）。

日本原子力開発機構や原規庁も、Ｌ-33 で水蒸気爆発が発生した事実を認めている。

したがって、水蒸気爆発の発生率は、

１÷３≒３３．３％

である。

ウ　この実験結果はデータ数が少なく、有意な結果とはいい難いが、少なくとも、水蒸気爆発の発生可能性が低いと評価する根拠にはならない。

⑵　クロトス実験（❸）における水蒸気爆発の発生率

ア　二酸化ウラン混合物を用いた実験は１０回である。うち外部トリガーを与えたものは８回である。このうち３回のケース（サブクール度８３Ｋ、１０２Ｋ及び

１２２Ｋ）で水蒸気爆発が発生している。

したがって、外部トリガーを与えた場合の水蒸気爆発の発生率は、

３÷８＝３７．５％

である。

イ　また、１０回の試験のうち、外部トリガーを与えないもの２回であり、水蒸気爆発は発生していない。

１０回の試験全体では、水蒸気爆発が発生したのは、

３÷１０＝３０％

である。

ウ　外部トリガーを与えた場合と、外部トリガーを与えていないものも含めた全体のいずれの発生率でも、水蒸気爆発が発生する可能性が低いとはいえない。

⑶　コテルス実験（❶）における水蒸気爆発の発生率

ア　実験は８回行われており、いずれも水蒸気爆発は起きていない。

しかし、このうち７回は、サブクール度が低い（０～２４Ｋ）条件下で行われており、そもそも水蒸気爆発は発生し難い。大気圧下での水温が８０℃よりも高い条件、すなわち、飽和温度により近い２０Ｋ以下の低サブクール度の条件の元では、水蒸気爆発は全く発生しないという論文もある（甲Ｃ５６）。

低サブクール度下の７回で水蒸気爆発が発生しなかったのは想定どおりの結果であり、水蒸気爆発発生の可能性の有無にカウントするのは不適当である。

イ　また、コテルス実験では、前述のとおり、他の実験とは組成がかなり異なる溶融物（ジルコニウムやステンレス鋼が含まれる）が用いられており、比較も困難である。

⑷　トロイ実験（❹）における水蒸気爆発の発生率

ア　全体で３２回の実験のうち、溶融物が二酸化ウランと二酸化ジルコニウムの混

合物である試験は２２ケースであり（9から２３、２５から４０)、このうち8ケースで水蒸気爆発が発生している。

水蒸気爆発の発生率は、

８÷２２≒３６．４％

である。

イ　２２ケースのうち、外部トリガーを与えた試験は4回行われ、4回ともで水蒸気爆発が発生している。

外部トリガーを与えた場合の水蒸気爆発の発生率は

４÷４＝１００％

である。

ウ　外部トリガーを与えないその他の試験の１８回中、4回で水蒸気爆発が起きている。

したがって、自発的水蒸気爆発の発生率は

４÷１８≒２２．２％

である。

エ　トロイ実験では､外部トリガーを与えれば１００％水蒸気爆発が発生しており、外部トリガーを与えなくても２２．２％で水蒸気爆発が発生している。

水蒸気爆発の発生可能性が低いとは全くいえない。

⑸　セレナ計画フェーズ２（❺）における水蒸気爆発の発生率

ア　フェーズ2ではTROIとKROTOSの試験装置を用いた実験を合計１２回行い、より原子炉に近い状況での蒸気爆発に関する実験データを提供すること等を目標とした。全てにおいて外部トリガーを与えている。

クロトス実験装置を用いた実験では､1回の実験失敗と1回の計測失敗があり、残りの１０ケース中、水蒸気爆発が発生したのは9回である。

したがって、水蒸気爆発の発生率は、

９÷１０＝９０％

である。

イ　１０回中、溶融物が二酸化ウランと二酸化ジルコニウムであるものに限ると、試験は７回行われ、水蒸気爆発が発生したのは７回である。

水蒸気爆発の発生率は

７÷７＝１００％

である。

ウ　水蒸気爆発の発生可能性が低いとは全くいえない。

⑹　まとめ

以上の実験結果を一覧表にすると、図表１０のようになる（水蒸気爆発が発生しない試験装置の試験、水蒸気爆発が発生困難なサブクール度の試験、試験失敗、計測失敗を除く）。

	FARO❷	KROTOS❸	COTELS❶	TROI❹	SERENA❺	試験全体
①	3	１０	1	２２	１０	４６
②	1	3	0	8	9	２１
③	1	8	0	4	１０	２３
④	1	3	0	4	9	１７
⑤	2	2	1	１８	0	２３
⑥	0	0	0	4	0	4
⑦	33.3%	30%	0%	36.4%	90%	45.7%
⑧	100%	37.5%	-	100%	90%	73.9%
⑨	0%	0%	0%	22.2%	-	17.4%

表中の①～⑨は以下のとおりである。

① 各試験の合計試験回数

② 水蒸気爆発発生回数

③ 外部トリガーを与えた試験回数

④ 外部トリガーを与えて水蒸気爆発が発生した回数

⑤ 外部トリガーを与えない試験回数

⑥ 外部トリガーを与えないで水蒸気爆発が発生した回数

⑦ 試験全体における水蒸気爆発発生率②／①

⑧ 外部トリガーを与えた場合の水蒸気爆発発生率④／③

⑨ 外部トリガーを与えない場合の水蒸気爆発発生率⑥／⑤

図表１０　各種実験において水蒸気爆発が発生した回数及び発生率

このように、二酸化ウラン及び二酸化ジルコニウム混合物を用いた実験結果を一覧すれば、水蒸気爆発の発生可能性が低いとは到底いえず、むしろ相応の可能性があることは否定されない。

以上