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



高島意見書に基づく水蒸気爆発に係る主張
準備書面（６４）

２０２６．１１．１９
原告訴訟代理人
弁護士青木秀樹

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

準備書面６３と６４の関係

発生可能性の高低にかかわらず、「水蒸気爆発を必ず（例外なく）格納容器破損モードとして想定し、破損防止対策、異常放出防止対策の有効性を確認しなければならない」ことが、設置許可基準規則による要求事項である。被告国、被告会社が進めている手続は、規則に違反する。（準備書面６３）

水蒸気爆発の発生可能性が極めて低いか否かは、規則違反と関係がない。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実験や研究が存在するとしても規則違反を正当化できない。

但し、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）。

念のため、準備書面６４において、被告国が科学的根拠として主張する国際的な実験や研究の評価が不当であることを高島意見書を基に主張する。

被告国の指摘する国際的な実験・研究の評価の矛盾

「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（UO2）と酸化ジルコニウム（ZrO2）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」（第２９準備書面・１１頁）。

⇧

これらの実験や研究は、規則制定時点で存在し、「必ず想定する格納容器破損モード」を定めた規則制定時に考慮済み。

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。

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

水蒸気爆発のメカニズム

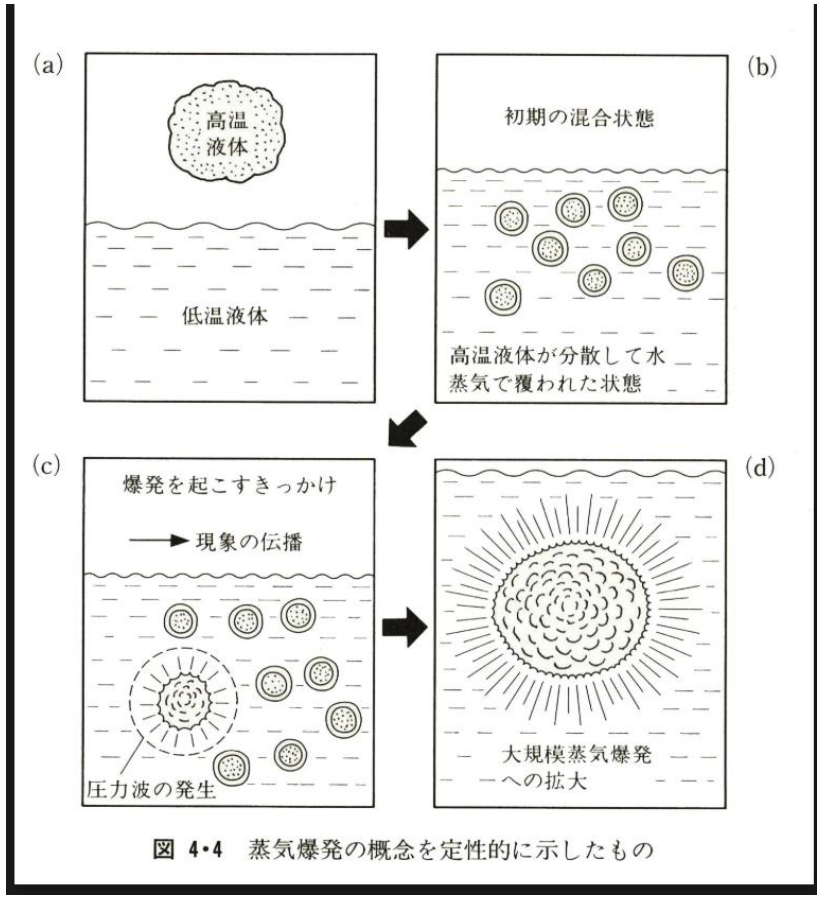


図 4・4　蒸気爆発の概念を定性的に示したもの

（ａ）溶融金属や溶融炉心などのような高温液体が落下する

（ｂ)高温液体の一部分は、水中では液滴となってバラバラに細かくなる。液滴は水蒸気膜に覆われた状態（膜沸騰という）で分散する。この状態を粗混合（あるいは予混合）状態という。

（ｃ）なんらかの原因で膜沸騰蒸気膜が1か所で壊れると、高温液体と水の直接接触によって瞬時に大量の水蒸気泡が発生する。この段階をトリガリングという。

（ｄ）発生した水蒸気泡は急成長し圧力波を発生する。この圧力は瞬時に水中を伝播して、周囲の蒸気膜を破壊し、斉時的に水蒸気泡生成を行うことで周囲の構造物を破壊する大規模な爆発となる。

水が熱せられて水蒸気になった場合に体積が約１６７０倍になるので、水蒸気爆発が起きた場合、１６７０気圧のオーダーの爆発が起きることになる。（甲C５４・６，　　７頁）

水蒸気爆発に係る実験・研究の状況

被告国「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」（第２９準備書面・１０～１１頁）。

水蒸気爆発に係る実験、研究の目的及び実験結果

　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。
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。

水蒸気爆発に係る主な実験

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）に分けて行われた。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。

❶ないし❹の実験の目的と概要の一覧

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

アルファ（ALPHA）試験

目的「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」（甲Ｃ５５・１頁）。

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

ファロ（FARO）実験（❷）二種類

表６　　２種類のFARO実験装置

粗混合実験用装置

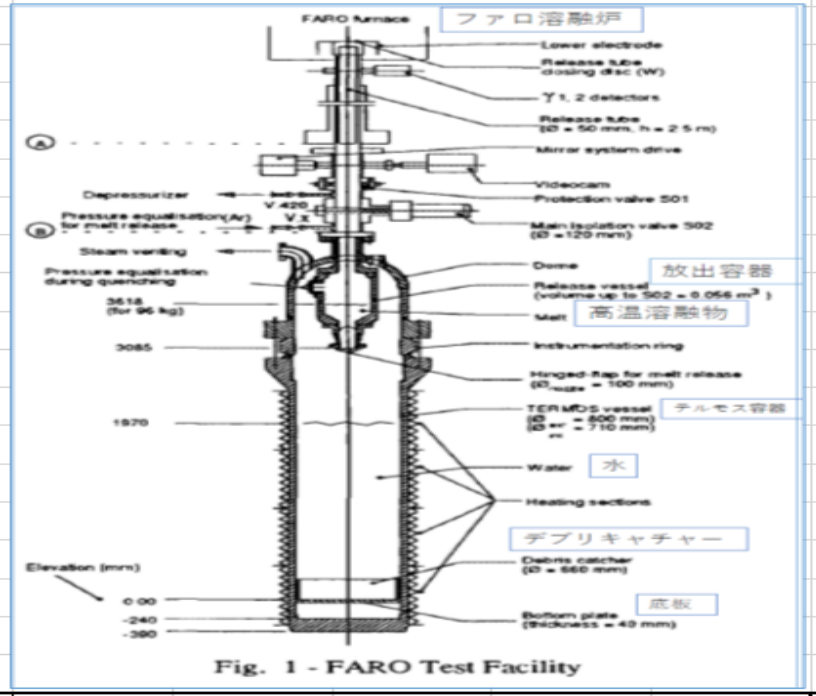


Fig. 1 - FARO Test Facility

爆発実験用装置

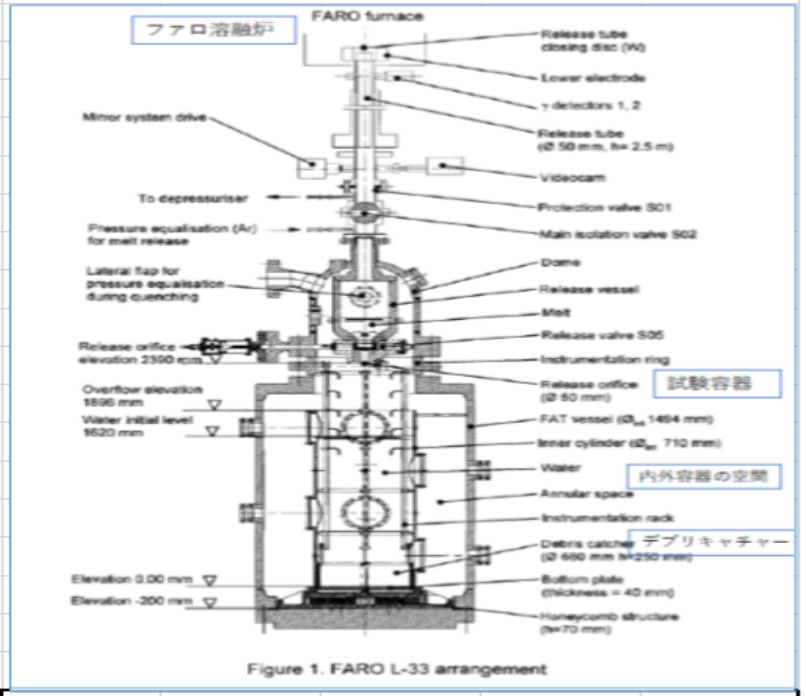


Figure 1. FARO L-33 arrangement

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				

ファロ（FARO）実験（❷）

L-1からL-28までは、図の左側に示される実験装置で行われた。

この装置は、主に粗混合状態 を解明する目的の実験装置。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。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ている。水蒸気爆発が起こらないような飽和温度に近い水の条件で行われた。

※「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）

※「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。

ファロ（FARO）実験（❷）

L―２９、３１及び３３の実験では、図の右側に示される実験装置で行われた。

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。

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。

ファロ（FARO）実験（❷）

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

ファロ（FARO）実験（❷）

Ｌ―１～Ｌ―２８の９ケースは、水蒸気爆発が発生しなくて当然の結果。

L―０６～L―２８までは、サブクール度 が０から１２Ｋ、飽和温度（沸点）との差がほとんどない状態で実施。そのような状態では水蒸気爆発は起こりにくい（甲Ｃ５６・１７７１頁）。

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。しかし、①２００２（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（甲Ｃ54・２７頁）。

②Ｌ―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。

Ｌ―３３では水蒸気爆発が発生したと評価すべきである。

※「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。

クロトス（KROTOS）実験（❸）

目的

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。

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。爆発状況のデータを取得して、爆発状況を解明する。

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。

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。

クロトス（KROTOS）実験（❸）

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	3086	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

クロトス（KROTOS）実験（❸）

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。

コテルス（COTELS）実験（❶）

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（COTELS）実験（❶）

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。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。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。他の、実験結果との比較は困難である。

コテルス実験では、溶融物の温度を測定せず。

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。

トロイ（TROI）実験（❹）

目的、「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（甲５７・１頁）。

トロイ（TROI）実験（❹）

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）

トロイ（TROI）実験（❹）

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（TROI）実験（❹）

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（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。

水蒸気爆発が発生した溶融物温度は、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（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。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。

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）。

セレナ（SERENA）計画（❺）

目的　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（甲Ｃ54・４５～４６頁、甲Ｃ６０）。

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。

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）。

「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。

セレナ（SERENA）計画（⑤）

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

セレナ（SERENA）計画（❺）

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）。

フェーズ２の解析で得られた結果

「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 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）。

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。

※「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。

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

ファロ実験（❷）における水蒸気爆発の発生率

Ｌ-1からＬ-28は、水蒸気爆発が起きていないのは当然の結果。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。

Ｌ-29、31及び33のうち、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り、日本原子力開発機構や原子力規制庁も水蒸気爆発が発生した事実を認めている（甲Ｃ５８、５９及び６０）。

水蒸気爆発の発生率は、

１÷３≒３３．３％

クロトス実験（❸）における水蒸気爆発の発生率

二酸化ウラン混合物を用いた実験は１０回。うち外部トリガーを与えたものは８回。このうち３回のケース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、

３÷８＝３７．５％

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

１０回の試験全体では、水蒸気爆発の発生率は、

３÷１０＝３０％

コテルス実験（❶）における水蒸気爆発の発生率

実験は８回、いずれも水蒸気爆発は起きていない。

そのうち７回は、サブクール度が低い（０～２４Ｋ）条件下で行われた。低サブクール度下で水蒸気爆発が発生しなかったのは想定どおりの結果。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。

また、コテルス実験では、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。

トロイ実験（❹）における水蒸気爆発の発生率

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。

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％

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％

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。

自発的水蒸気爆発の発生率は

４÷１８≒２２．２％

セレナ計画フェーズ２（❺）における水蒸気爆発の発生率

１２回中、１回の実験失敗と１回の計測失敗がある。残りの１０ケース中、水蒸気爆発が発生したのは９回。

水蒸気爆発の発生率は、

９÷１０＝９０％

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。

水蒸気爆発の発生率は

７÷７＝１００％

まとめ

	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%