

【水蒸気爆発関連論点整理】

新規制基準適合性審査申請

重大事故等対処施設

<(8)重大事故対策>

-格納容器破損防止

令和2年2月7日

東北電力株式会社

1. はじめに

宮城県安全性検討会に対する要望書について

- 令和元年10月3日「脱原発をめざす宮城県議の会」から、「女川原子力発電所2号機の安全性に関する検討会」に対し、水蒸気爆発についての弊社説明に関する下記の要望書が提出されている。(第20回安全性検討会にて宮城県殿よりご報告済)
- 本件については、同9月25日「宮城県議会環境生活農林水産委員会」における質疑においても、同8月30日第19回女川原子力発電所2号機の安全性に関する検討会においてご説明した水蒸気爆発に関する弊社説明について、ご指摘を頂いている。
- また、同12月26日に宮城県内の市民団体より「女川原子力発電所2号機の安全性に関する検討会」に係る要望書が提出されている。
- 本資料は、上記のご指摘等を踏まえ、水蒸気爆発に関する弊社見解について、同8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)を用いて補足説明するものである。
(2. において指摘事項①～④に対する、3. において12月26日の要望書に対する弊社見解を整理)

女川原子力発電所2号機の安全性に関する検討会
座長 若林利男様

県民の安全を守る立場から、水蒸気爆発問題に関する再検討をお願いする要望書

「脱原発をめざす宮城県議の会」は2018年3月22日、貴職あての要望書を提出し、格納容器下部への注水が水蒸気爆発を引き起こす危険性について、TRO I 実験の報告書すべてを取り寄せて評価し検証していただくことを求めました。

福島第一原発事故を発生させてしまった痛苦の教訓を踏まえて、県政には県民の命と安全を守る責務があります。原発の格納容器内で水蒸気爆発が起これば、猛毒のプルトニウムを含む炉心溶融物が微粒子になって拡散して福島第一原発事故を上回る甚大な被害を引き起こすと承知しています。「安全のための対策」が、逆に水蒸気爆発を招くことは、あってはならないからです。

貴職から「東北電力に説明を求める」という趣旨の回答があり、本年8月30日の第19回女川原子力発電所2号機の安全性に関する検討会で、東北電力の説明がありました。が、新たな疑問がわきました。

第1は、「実機の温度で水蒸気爆発は発生していない」という説明に関連してです。

東北電力が検討会に示したTRO I 実験に関わる資料には、① 実験者が報告した溶融物温度とはまったく異なるデータが引用され、② 実機の温度での水蒸気爆発が発生していたことが分からないようにされていました。

これは検討会の委員をミスリードしたものではないでしょうか。

③

第2に、「実機には水蒸気爆発のトリガーはない」という説明に関連してです。

検討会では、「TRO I 実験では、実機付近の温度では外部トリガーなしの自発的水蒸気爆発は発生していない」と説明があり、その根拠としてTRO I の実験者が2003年に著した論文が引用されました。

しかし、水蒸気爆発の専門家が2015年から雑誌『科学』などで、「TRO I の実験者が温度の測定に習熟し、データの正確な評価ができるようになったのは2007年の論文から」で、③ 2003年の論文を根拠に否定することは不正確だと、指摘しています。

以上の点について、専門的知見を有する貴検討会に判断していただくとともに、④ 「水蒸気爆発の可能性は小さい」という東北電力の説明の適否についても、あらためて検討していただくことを要望するものです。

2019年10月3日

脱原発をめざす宮城県議の会

会長＝佐々木功悦 事務局長＝岸田清実 副会長＝菅間進、中嶋廉

以上

1. はじめに

要望書の指摘事項についての見解

- ご指摘があった第19回検討会資料に掲載したTROI実験の主要な実験条件および実験結果の表について、弊社の見解は以下のとおり。
 - ・弊社は当該の表の作成にあたり、以下の文献1から4に記載の数値を使用しており、引用文献の数値の修正は行っていない。
 - ・引用した文献は水蒸気爆発に関して高い専門性を有した著者が記載したものであり信頼性が高いものである。
 - ・ご指摘のあった溶融物温度の記載については、実験に用いた溶融物の物性を踏まえると文献に記載の表現は妥当であると考えており、また、実験者自身の論文においても、温度測定に不確かさがあったと記載されている。
 - ・以上から、当該の表の記載は妥当であり、その表に基づき、実機における水蒸気爆発の発生可能性は極めて小さいとした整理は適切である。

文献1: V. Tyrpekl, Material effect in the fuel – coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/758983/filename/TYRPEKL_Vaclav_2012_ED182.pdf

Le président du jury (jury president) Rémi Barillon <https://www.theses.fr/>

文献2: J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13–17, 2004

https://www.researchgate.net/publication/236451640_The_Influence_of_Variations_in_the_Water_Depth_and_Melt_Composition_on_a_Spontaneous_Steam_Explosion_in_the_TROI_Experiments

文献3: J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO_2/ZrO_2 mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1–15

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549302003886>

文献4: J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007,

Vol.158, p.378–395

https://www.researchgate.net/publication/236485016_Results_of_the_Triggered_TROI_Steam_Explosion_Experiments_with_a_Narrow_Interaction_Vessel

1. はじめに

TROI実験データの整理について(1/2)

- 指摘事項①から④についての個別の見解はP5以降で説明するが、先立ってご指摘のあったTROI実験の主要な実験条件および実験結果の表の整理について、以下のとおり説明する。
- 弊社は当該の表の作成にあたり、文献1および2に記載の数値を使用しており、引用文献の数値の修正は行っていない。
- 水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータは文献1および2から、発生した場合の規模の検討に必要なパラメータは実験者の論文(文献3および4)に基づき記載している。

文献1

TROI	1	2	3	4	5	9	10	11	12	13	14
Material	ZrO ₂ /Zr 99/1	ZrO ₂ /Zr 99/1	ZrO ₂ /Zr 99/1	ZrO ₂ /Zr 99/1	ZrO ₂ /Zr 98.5/1.5	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30
Melt temperature (K)	>3373	>3373	>3373	>3373	3373	3200	3800	>3800	3800	2600	3000
Melt amount in FCI (kg)	5	5.5	4.88	4.2	2.9	4.3	8.7	9.2	8.4	7.7	6.5
Water temperature (K)	365	365	323	292	337	296	298	296	293	292	285
Water mass (kg)	283	283	283	283	283	-	-	-	-	-	-
Water height (cm)	67	67	67	67	67	90	67	67	67	67	67
Steam Explosion	+	NO	NO	YES	YES	NO	YES	NO	YES	YES	YES
Trigger	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Initial pressure (Mpa)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.147	0.111	0.11	0.108	0.105
Comments #1	varying melt jet diameter: 2.8 - 5 cm					plug/puncher - 8,0/6.5 cm					
Comments #2						dyn. pressure - no data					Two pyrometers: difference of melt Tosa 83K
Comments #3						debris size not fully measured					

TROI	17	18	23	29	32	34	35	36	37	38	39	40	
Material	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 78/22	UO ₂ /ZrO ₂ 78/22	UO ₂ /ZrO ₂ 50/50	UO ₂ /ZrO ₂ 87/13	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	UO ₂ /ZrO ₂ 78/22	UO ₂ /ZrO ₂ 78/22	UO ₂ /ZrO ₂ 78/22	UO ₂ /ZrO ₂ 70/30	
Melt temperature (K)	-	-	-	-	-	-3000	-3000	-3000	-3000	-3000	-3000	-3000	
Melt amount in FCI (kg)	9.1	-	11.5	-	-	10.5	8	6.3	8.1	5.3	3.4	11.1	
Water temperature (K)	-	-	-	-	-	341	324	305	313	288	285	287	
Water mass (kg)	-	-	-	-	-	199	367	269	269	92	92	92	
Water height (cm)	-	-	-	-	-	67	120	95	95	130	130	130	
Steam Explosion	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO	
Trigger	-	-	-	-	YES	YES	YES	YES	YES	-	-	-	
Initial pressure (Mpa)	-	-	-	-	-	0.110	-	0.110	0.104	0.105	0.106	0.312	
Comments #1													
Comments #2	Mishandling during debris measure etc.												
Comments #3	H ₂ 789 ppm	H ₂ 428 ppm	H ₂ 619 ppm	H ₂ 1010 ppm									H ₂ 1400 ppm

文献2

TROI test number	Unit	21	22	23	24	25	26
Melt	Initial Charge Composition UO ₂ /ZrO ₂	80/20	80/20	80/20	U/100	70/30	80/20
	Temperature (K)	3000	2900	3600	3600	3500	3300
	Charged mass (kg)	17.0	17.0	17.0	9.5	15.0	17.0
	Released mass (kg)	7.520	9.910	10.385	5.430	9.005	12.310
	Initial jet diameter (cm)	-	7.4	7.4	3.2	8.0	4.5
	Free fall distance in gas (m)	3.2	3.2	3.2	3.8	3.8	3.8
Test System	Water mass (kg)	367	367	367	189	189	189
	Water height (m)	1.3	1.3	1.3	0.67	0.67	0.67
	Temperature (K)	298	297	293	288	287	283
	Sub-cooling (K)	298	297	293	288	287	283
Pressure Vessel	Initial temperature (MPa)	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.106
	Initial pressure (air) (K)	290	295	290	291	291	288
	Free volume (m ³)	8.032	8.023	8.023	8.023	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization (MPa)	0.011	0.025	0.020	0.015	0.021	0.029
	Time to reach peak (sec)	10	3	3	3	3	5
	Maximum PV heat-up (K)	50	160	105	35	90	85
	Time to stabilize (sec)	10	15	10	10	10	25
	Maximum water heat-up (K)	20	13	8	21	22	27
	Time to stabilize (sec)	15	10	8	30	30	35
	Steam explosion	NO	NO	NO	SE	SS	SS
	Dynamic pressure peak (MPa)	-	-	-	5.5	0.1	-
	Duration (msec)	-	-	-	1.0	1.5	-
	Input (kN)	-	-	-	>500	78	15
	Duration (msec)	-	-	-	7.0	10.0	20.0
Debris	Total (kg)	7.320	9.910	10.385	5.430	9.005	12.310
	<6.35mm (kg)	-	-	1.250	2.805	0.705	1.095
	4.75 - 6.35mm (kg)	-	-	1.505	0.325	1.030	1.720
	2.0 - 4.75mm (kg)	-	-	4.475	0.865	4.135	4.980
	1.0 - 2.0mm (kg)	-	-	1.825	0.595	1.285	2.215
	0.71 - 1.0mm (kg)	-	-	0.500	0.180	0.495	0.720
	0.425 - 0.71mm (kg)	-	-	0.490	0.240	0.655	0.870
	<0.425mm (kg)	-	-	0.285	0.420	0.700	0.710
H ₂ gas	Before/After the interaction (ppm)	Not measured	Not measured	20438	191335	4914	28105
	Mass after the interaction (g)	-	-	0.288	0.877	0.009	0.069
Timing of Melt Delivery	Melt delivery duration (sec)	5.1	1.8	3.1	2.0	1.2	1.3
	Time between melt-water contact and melt-bottom contact (sec)	0.65	0.62	0.66	0.21	0.17	0.18
	Time between met-water contact and spontaneous trigger (sec)	Not available	Not available	Not available	-0.16	-0.17	-0.17

令和元年8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)

TROI実験の主要な実験条件および実験結果(1/2)

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	0.108	292	0.67	-	Yes	0.40%
	14	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	6.5	3000	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	-	

水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータ

発生した場合の規模の検討に必要なパラメータ

文献1: V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

文献2: J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004

文献3: J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15

文献4: J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395

1. はじめに

TROI実験データの整理について(2/2)

令和元年8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)

TROI実験の主要な実験条件および実験結果(2/2)

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)	
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	0.63	
	35	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8	~3000	0.110		334	1.30	Yes	0.21	
	36	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	5.3	~3000			305	0.95	Yes	0.50	
	37	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	8.1	~3000	0.104		313	0.95	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	-	

水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータ

発生した場合の規模の検討に必要なパラメータ

文献1

TROI	17	18	23	29	32	34	35	36	37	38	39	40
Material	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂	UO ₂ /ZrO ₂
Melt temperature (K)	70/30	78/22	78/22	50/50	87/13	70/30	~3000	~3000	~3000	~3000	~3000	~3000
Melt amount in FCI (kg)		9.1		11.5		10.5	8	5.3	8.1	5.3	3.4	11.1
Water temperature (K)						341	334	305	313	288	285	287
Water mass (kg)						189	367	269	269	92	92	92
Water height (cm)						67	130	95	95	130	130	130
Steam Explosion	NO		NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO
Trigger	-	-	-	-	-	YES	YES	YES	YES	-	-	-
Initial pressure (Mpa)							0.110			0.104	0.106	0.106
Comments # 1												
Comments # 2												
Comments # 3	H ₂ 180 ppm		H ₂ 430 ppm	H ₂ 619 ppm	H ₂ 1010 ppm							

TROI	49	50	51	52
Material	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (62.3/15/11.7/11)	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (59.5/18/11.9/10.6)	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (60.5/16.7/12.1/10.7)	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (61/16/12/11)
Melt temperature (K)	2730 (3360)		2695 (3420)	2650
Melt amount in FCI (kg)	15.96	14.46	6.3 (14.2 load)	8.6 (14.1 load)
Water temperature (K)			294	285
Water mass (kg)			367	367
Water height (cm)			130	130
Steam Explosion	-	-	YES	+-
Trigger	-	-	-	-
Initial pressure (Mpa)	-	-	0.115	0.116
Comments # 1	apparatus test section changed			
Comments # 2	metal added phase separation		metal added + steam expl.	
Comments # 3	NO AIRBORNE - NO TEMPERATURES, COMPOSED		NO AIRBORNE - NO TEMPERATURES, COMPOSED	NO AIRBORNE - NO TEMPERATURES, COMPOSED

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項①について(1/4)

①東北電力が検討会に示したTROI実験に関わる資料には、実験者が報告した溶融物温度とはまったく異なるデータが引用されている。

- 本指摘の元になったのは、以下の点であると考えている。
 - 第19回検討会資料では、TROI-34～37の溶融物温度について、表1に示すとおり、実験者が報告した文献4ではなく、それをまとめて溶融物温度を「～3000K(約3000K)」とした文献1に基づいて記載していたこと。

令和元年8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)

実験名	実験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	当該箇所	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率(%)	
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	0.110	341	0.67	Yes	0.63	
	35	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8	～3000		334	1.30	Yes	0.21	
	36	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	5.3	～3000		305	0.95	Yes	0.50	
	37	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	8.1	～3000	0.104	313	0.95	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※	-

表1 各文献における溶融物温度の比較

		TROI-34	TROI-35	TROI-36	TROI-37
文献1	溶融物温度(K)	～3000	～3000	～3000	～3000
文献4	測定温度(K)	3670(maximum)	2990(maximum)	3510	3380
	補正温度(K)※	3343	2793	3214	3109

※溶融物温度はパイロメータで測定しており、温度計と溶融物の間に取り付けられた耐熱窓の影響を受けることから、その分を補正した温度

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項①について(2/4)

【弊社の回答】

- 当該記載は文献1に基づいて数値を記載したものであり、引用文献の数値の修正は行っていない。
- 弊社は引用した文献は妥当^(※1)と考えている。また、TROI-34～37の溶融物温度については、実験に用いた溶融物の物性を踏まえると「～3000K」という表現は妥当^(※2)と考えられる。
- 弊社はTROI実験の主要な実験条件および実験結果の表において、水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータおよび発生した場合の規模の検討に必要なパラメータについて、漏れなく記載している^(※3)と考えている。

■引用した文献(文献1)の妥当性に対する弊社の見解

- (※1)
- 引用した文献の著者は、水蒸気爆発に関する国際的なプロジェクト(OECD(経済協力開発機構) SERENA2)の業務を実施しており、こうした分野において高い専門性を有していると考えている。さらに、仏国カダラッシュ研究所でデブリ実験に携わっている専門家が当該文献の監修をしており、この点からも信頼性があると考えている。
 - 当該文献では、当該分野の高い専門性を有している著者がTROI実験結果についての整理を行い、考察していることを確認している。また、引用した文献は2012年に発行された文献であり比較的新しく、一般に公開されている文献である。これらの点を踏まえると引用した文献は妥当である。
- また、水蒸気爆発が発生したケース(TROI-35)について、実験者の文献も引用文献として明記している。

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項①について(3/4)

7

■ 溶融物温度の妥当性に対する弊社の考察

- (※2) ➤ TROI-34～37では、二酸化ウランとジルコニアの溶融物を使用している。二酸化ウラン:ジルコニアが重量比70:30(mol比=0.52:0.48)の混合物は、固相線温度、液相線温度が約2800Kから約2900K(図1参照)であることから、溶融物の物性を踏まえ、引用した文献では溶融物温度として～3000K(約3000K)と記載したものと考えられる。

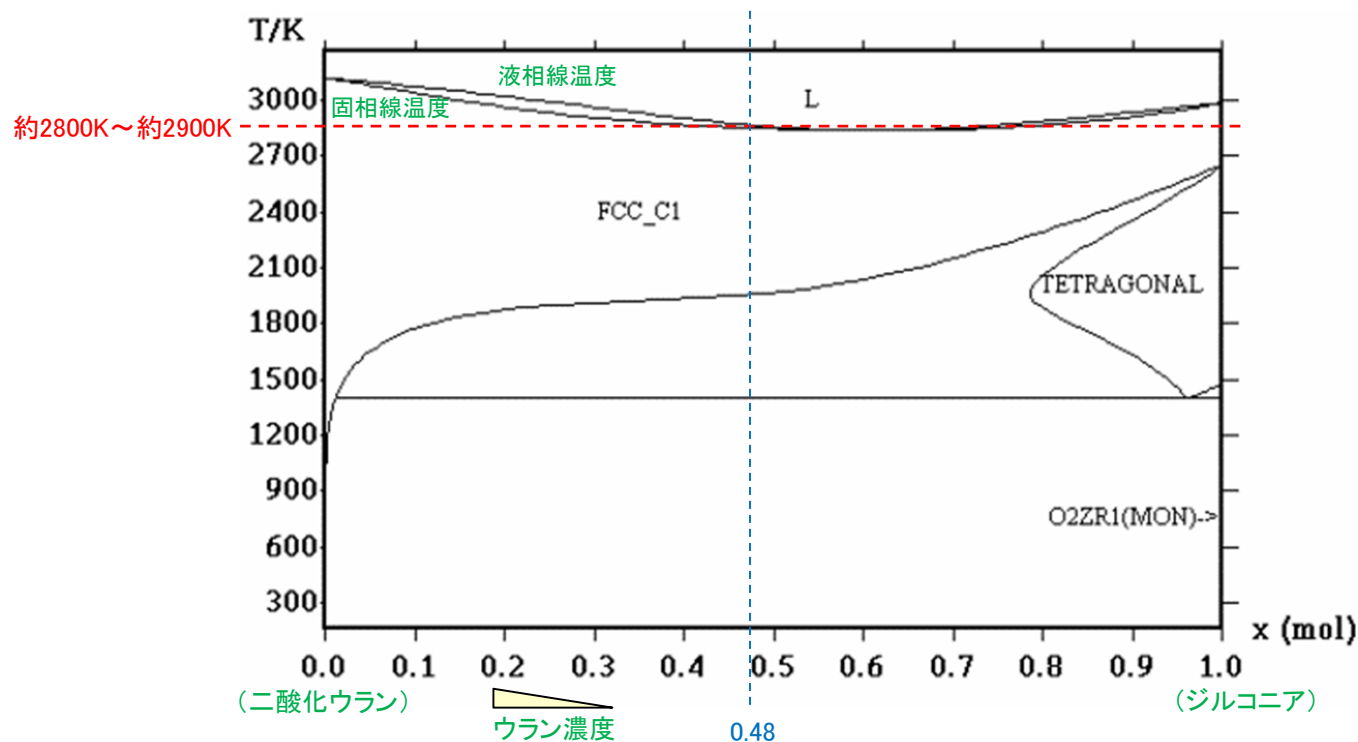


図1 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ phase diagram
(引用文献[1]の図に加筆)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項①について(4/4)

■水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータの充足性に対する弊社の見解

- (※3) 以下に示す「TROI実験の主要な実験条件及び実験結果」の表については、空欄の箇所も含め、文献1に基づき記載している。水蒸気爆発が発生した実験ケースについては、水蒸気爆発の発生可能性の検討に必要なパラメータである溶融物組成、溶融物温度および外部トリガーの有無が漏れなく記載されていることを確認している。
- 水蒸気爆発が発生した場合の影響の程度を示すパラメータとしては、「機械的エネルギー変換効率^{注1}」を記載している。なお、影響の程度を示すパラメータとしては水蒸気爆発により壁面にかかる圧力を測定した値である「動圧ピーク^{注2}」もあるが、これは容器形状に依存^{注3}するため実機での水蒸気爆発の影響を検討する観点からは適切ではなく、容器形状等の実験体系に依存しない「機械的エネルギー変換効率」を記載している。

注1 デブリの持つ熱エネルギーが水蒸気爆発により機械的エネルギーに変換される際の変換効率

注2 単位体積当たりの運動エネルギーの最大値

注3 同じ爆発エネルギーの発生を仮定した場合でも、圧力を受ける壁面の面積が大きい方が動圧ピーク(圧力)は小さくなり、面積が小さい方が動圧ピークは大きくなる

令和元年8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)

TROI実験の主要な実験条件及び実験結果^[1-4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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 [※]	-

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項②について(1/2)

②東北電力が検討会に示したTROI実験に関わる資料には、「実機の温度での水蒸気爆発」が発生していたことが分からないようにされていた。

- 本指摘の元になったのは、以下の点であると考えている。
 - ・TROI-34,36,37については文献4に記載の溶融物温度より低い温度を記載し、実機の溶融物温度(≒約2600K)との差分を過小に記載しているものの、TROI-35については、2793Kより高い値(～3000K)を記載し、実機の溶融物温度との差分を過大に記載していること。

表2 各文献における溶融物温度および実機の溶融物温度の比較

		TROI-34	TROI-35	TROI-36	TROI-37	実機の溶融物温度
文献1	溶融物温度(K)	～3000	～3000	～3000	～3000	≒約2600
文献4	測定温度(K)	3670(maximum)	2990(maximum)	3510	3380	
	補正温度(K)	3343	2793	3214	3109	

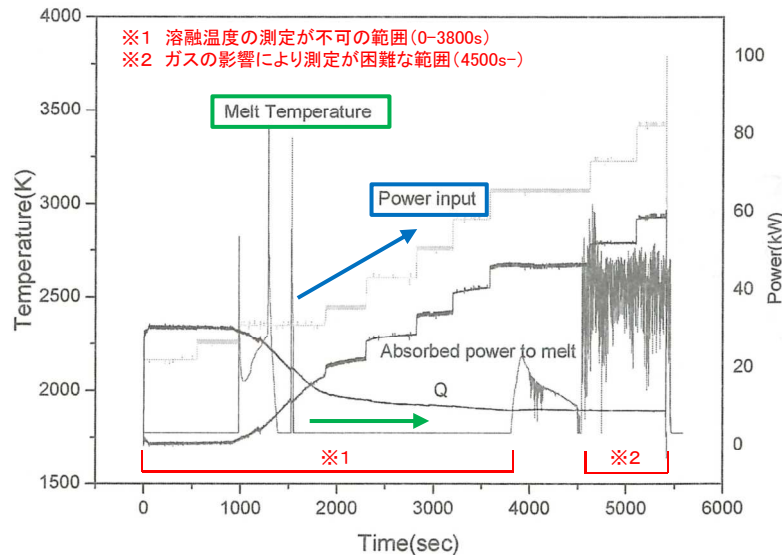
2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項②について(2/2)

【弊社の回答】

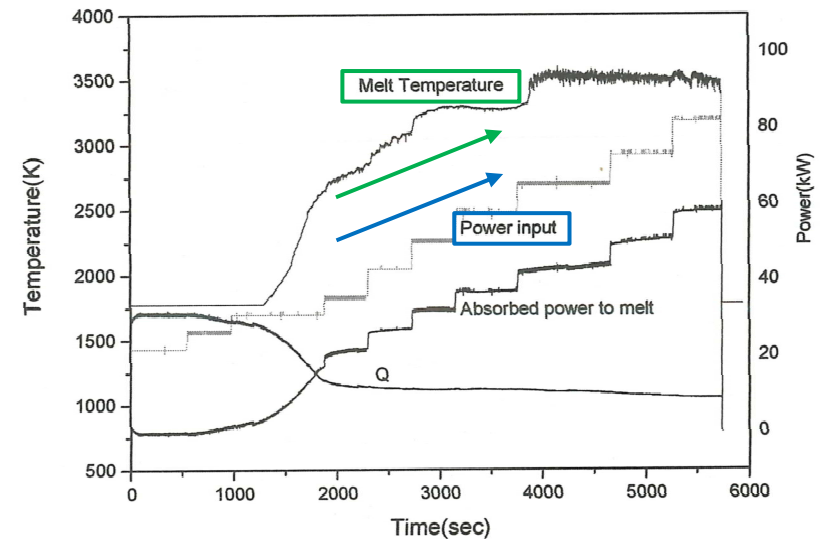
- 弊社は、TROI-35の溶融物温度については、実験に用いた溶融物の物性を踏まえると「 $\sim 3000\text{K}$ 」という表現は妥当と考えられる。
- 実験者は、文献4において、温度測定に不確かさがあったことを記載している。
- 仮にTROI-35の溶融物温度が実機相当と想定した場合であっても水蒸気爆発の発生可能性の整理に影響はない。

■ TROI-35の溶融物温度を実験者の論文の値とした場合の水蒸気爆発発生可能性への影響に対する弊社の見解

- TROI-35の溶融物温度として約 3000K という表現が妥当であることは前述(P7)のとおりである。
- TROI-35の溶融物温度の推移は、下記の測定の困難さもあり、同じシリーズで実施したケース(TROI-36)の溶融物温度の推移と異なっている。
- 実験者は、文献4において、TROI-35の温度測定について、以下のとおり分析している。
 - ・頂部の瓦礫状のクラストは、輻射熱伝達に対して断熱の役割をしたため、3800秒までの間、溶融温度は測定されなかった。
 - ・この実験では、溶融プールからのガス噴出があり、4500秒後の溶融温度測定はガスの影響を受けた。この噴出により、溶融物温度の測定が困難であった。
- なお、TROI-35は、外部トリガーが有の条件で水蒸気爆発が発生しているケースであり、仮にTROI-35の溶融物温度が実機相当であったとしても、水蒸気爆発が発生した実験ケースは「外部トリガーを与えた場合」又は「溶融物温度が高い場合」という整理に影響はない。



溶融物温度の推移 (TROI-35)
(文献4の図に加筆)



溶融物温度の推移 (TROI-36)
(文献4の図に加筆)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項③について(1/2)

③【実機には水蒸気爆発のトリガーはないという説明に関連】

検討会では「TROI実験では、実機付近の温度では外部トリガーなしの自発的水蒸気爆発は発生していない」と説明があり、その根拠としてTROIの実験者が2003年に著した論文が引用されました。しかし、TROIの実験者が温度の測定に習熟し、データの正確な評価ができるようになったのは2007年の論文からで、2003年の論文を根拠に否定することは不正確である。

➤ 本指摘の元になったのは、以下の点であると考えている。

- ・TROI-13, 14の熔融物温度について、2003年発行の論文3に基づき、温度測定に対する考察を実施することで熔融物温度は実機条件の温度より高いと整理し、「実機付近の温度では外部トリガーなしの自発的水蒸気爆発は発生していない」と整理していること。

令和元年8月30日第19回安全性検討会資料(抜粋)

TROI実験の主要な実験条件及び実験結果^[1-4]

実験名	実験ケース	熔融物組成 (%)	熔融物質量 (kg)	熔融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率(%)
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※	-
		UO ₂ /ZrO ₂ (80/20)	17.0	3300	0.106	283	0.67	No	Steam Spike※	-

実機における熔融炉心温度: ~約2600K

当該箇所

(注1) 参考文献[3]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[3]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。

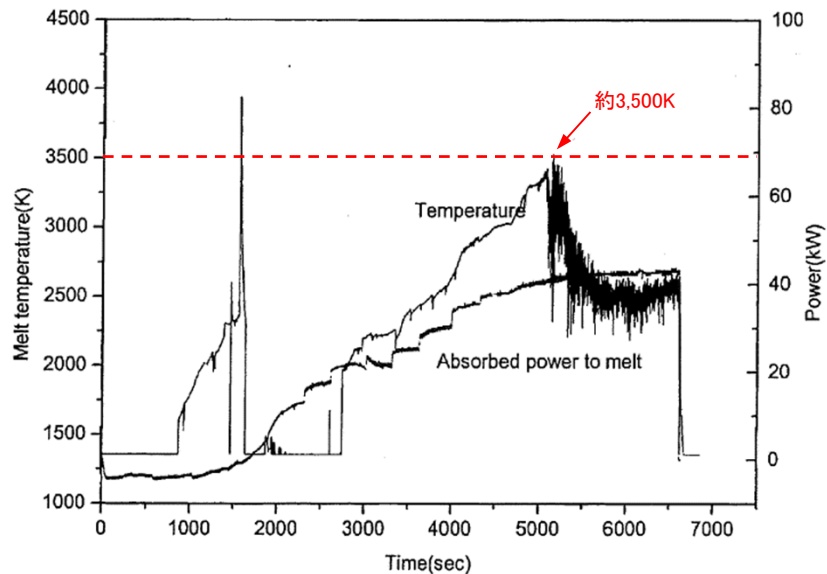
※ 圧カスパイクのことであり、水蒸気爆発は発生していない。なお、圧カスパイクとは、高温の熔融物から冷却材への伝熱により水蒸気が発生し、急激に圧力が上昇する現象のこと。

[1] V. Trpekl, Material effect in the fuel-coolant interaction: structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, 2012
 [2] J.H. Kim, et al., The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04
 [3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design, 222, 1-15, 2003
 [4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiments, Nucl. Techn., vol.138 378-395, 2007

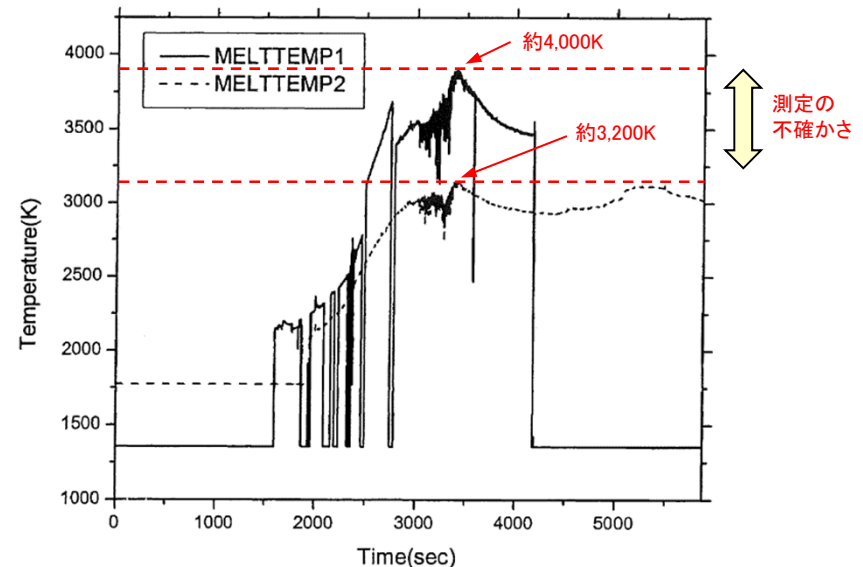
2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項③について(2/2)

■TROI-13, 14の溶融物温度に対する弊社の見解

- 2007年論文(文献4)において, TROI-13,14の溶融物温度についての記載はない。
- 実験者は, 文献3において, TROI-13,14の温度測定について, 以下のとおり分析している。
 - ・TROI-13では, 測定時に通気孔から大量のガスが出てきたことおよび測定温度が3500K到達後も溶融物への加熱は続いていたこと(Absorbed power to meltが一定の値を維持)を考慮すれば, 実際の温度が3500K程度以上である可能性が非常に高い。
 - ・TROI-14では, 2種類の高温計(MELTTEMP1および2)が用いられたが, それぞれの高温計の最高温度は約4000K, 約3200Kであることを示しており, また, 極めて高い温度における測定は, 多くの不確かさを排除できないとしている。
- よって, 溶融物の物性の観点からもTROI-13,14は実機条件より高い温度にて水蒸気爆発が発生したケースであり, 水蒸気爆発が発生した実験ケースは「外部トリガーを与えた場合」又は「溶融物温度が高い場合」という整理は適切と考えている。



溶融物温度の推移(TROI-13)
(文献3の図に加筆)



溶融物温度の推移(TROI-14)
(文献3の図に加筆)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(1/13)

④「水蒸気爆発の可能性は小さい」という東北電力の説明の適否についても、あらためて検討していただきたい。

- 前述①～③の指摘を踏まえ、水蒸気爆発の可能性確認および水蒸気爆発発生を仮定した評価について、令和元年8月30日第19回検討会資料に修正を加えた資料(次頁以降)を用いて補足説明する。

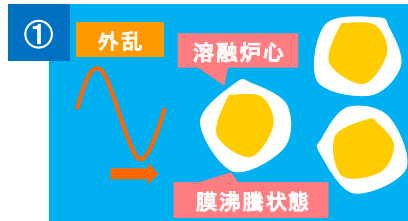
反映項目	反映箇所
TROI-34～37の溶融物温度の記載が実験者の論文の値と異なることから、検討会において値の確認を可能とするため、検討会資料に実験者の論文の値を追加	P17
TROI-34～37の溶融物温度を「～3000K」と記載しており、この値は実験に使用している溶融物の組成を踏まえても妥当な値であることを示すため、 UO_2 と ZrO_2 の phase diagramを追加	P18
「実機には水蒸気爆発のトリガーはない」という説明について、水蒸気爆発のトリガープロセスの詳細を追記した上で、実機における水蒸気爆発の外部トリガーの有無に対して考え方の記載を充実化	P15 P20
従来より仮に水蒸気爆発が発生した場合の評価を記載していたが、水蒸気爆発の評価について、評価体系や評価条件を詳細に記載	P21～25

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(2/13)

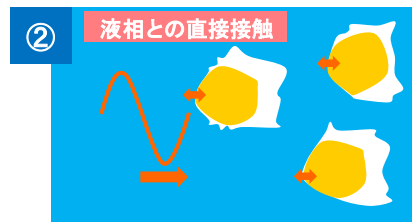
背景

- 女川2号ではMCCIの対策として、溶融炉心の落下前に格納容器下部に水張りを実施する。そのため、溶融炉心落下時に急激な水蒸気発生・圧力上昇等が生じる。このうち、衝撃波を伴うものを水蒸気爆発と呼ぶ。
- 水蒸気爆発が発生した場合において格納容器下部の原子炉圧力容器の支持機能への影響が生じる懸念があることから、水蒸気爆発の可能性について確認を行った。

水蒸気爆発の発生のメカニズム

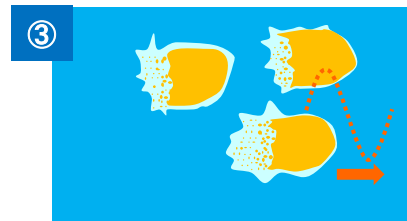


粒子化した溶融炉心は膜沸騰状態(溶融炉心と液相の直接接触は発生しにくく、水蒸気爆発には至らない)。



外乱等※により、蒸気膜が不安定化し、局所的に溶融炉心と液相の直接接触が生じる。

※ 実験における外乱について16ページ参照



溶融炉心と液相の直接接触により、急激な蒸気発生および溶融炉心の微粒化が生じる。

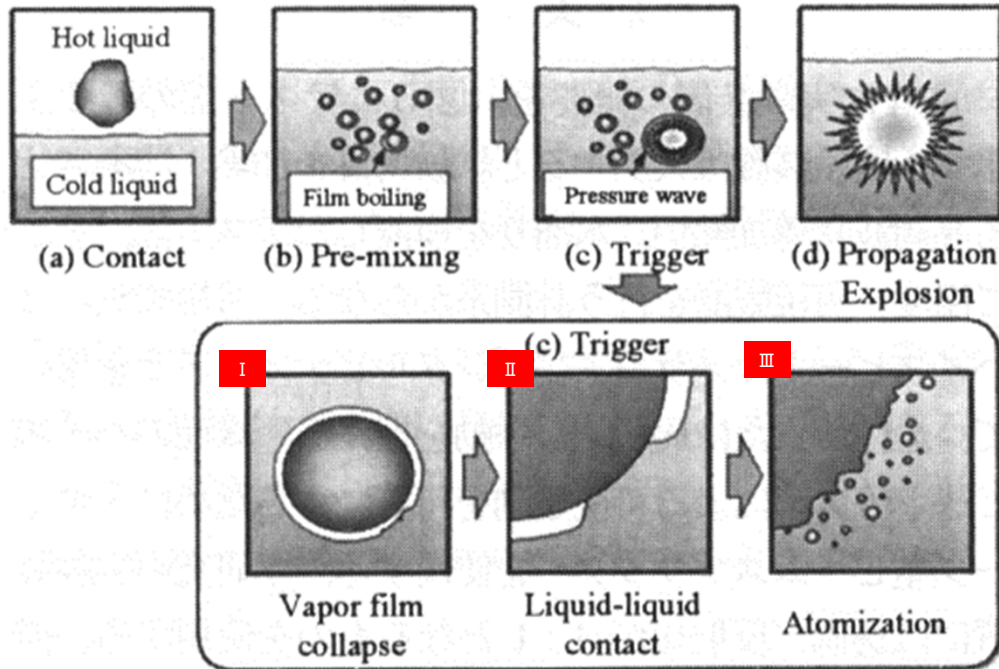


溶融炉心の細粒化に伴い、液相との接触が促進され、急激な蒸気発生が起こる。これに伴い圧力波が発生。

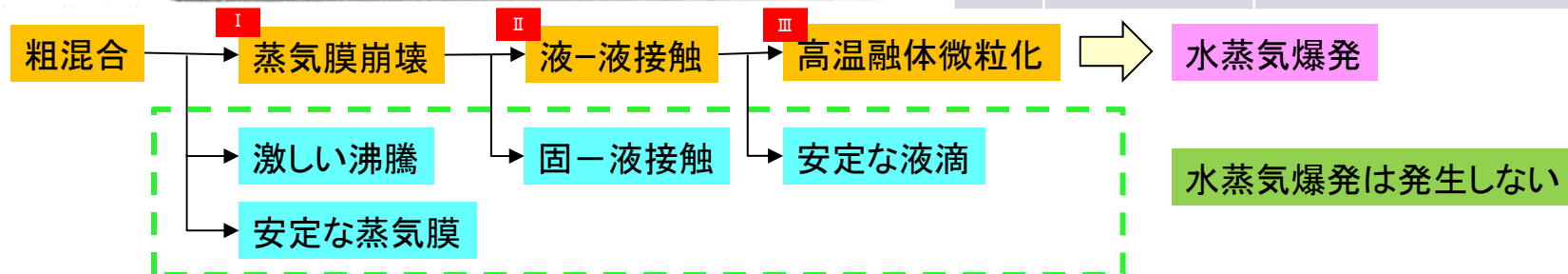
2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(3/13)

トリガープロセス

▶ 蒸気爆発にきっかけを与えるトリガー現象を構成する各素過程(トリガープロセス)を以下に示す。トリガープロセスは、蒸気膜崩壊、液-液接触および高温融体微粒化の段階に分かれており、すべての素過程の条件を満たした場合に限り、水蒸気爆発が発生する^[1]。



段階	現象の説明
[I]	蒸気膜崩壊 (Vapor Film collapse) 外部トリガーなどの外乱により蒸気膜が崩壊する。溶融液滴が膜沸騰状態を形成しなければ、激しい沸騰とともに固化されるため、水蒸気爆発は発生しない。逆に膜沸騰蒸気膜がとても安定ならば蒸気膜崩壊が発生しないため、水蒸気爆発は発生しない。
[II]	液-液接触 (Liquid-liquid contact) 液-液接触により熱伝達率が増加する。溶融液滴と低沸点液体の接触により界面温度が低下し、接触界面が固化しているならば固-液接触となり、液-液接触は発生しないため、水蒸気爆発は発生しない。
[III]	高温融体微粒化 (Atomization) 高温融体の微粒化現象による飛躍的な接触面積の増加で伝熱が生じ、激しい蒸発により圧力波を発生する。溶融液滴自身が安定であれば高温融体微粒化は発生しないため、水蒸気爆発は発生しない。



[1] 阿部 豊 他, “ベーストリガ蒸気爆発のトリガ条件に関する研究”, 日本機械学会論文集 (B編) 71巻702号 (2005-2)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(4/13)

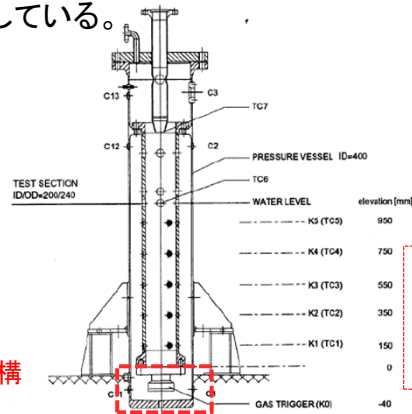
水蒸気爆発実験知見の整理

- 実機において想定される溶融物(二酸化ウランとジルコニウムの混合溶融物)を用いた大規模実験として、COTELS, FARO, KROTOSおよびTROIがあり、近年の論文も踏まえ、以下の内容を確認した^[1-6]
- ・ 上記実験のうち、水蒸気爆発が発生したKROTOS, TROIの一部実験の特徴としては、水蒸気爆発時の挙動を確認する観点から、実機では想定されない外乱(圧縮ガス等)を与えて液-液直接接触を生じやすくしていること、若しくは、実機よりも溶融物の初期の温度を高く設定することで、溶融物表面の蒸気膜が安定化する反面、溶融物表面が冷却材中で固化しにくくさせていることが挙げられる。
 - ・ なお、KROTOSで外乱を与えることで水蒸気爆発が発生したのはサブクール度※が大きい実験ケースであるが、溶融物量が多くより実機体系に近いFAROやCOTELSではサブクール度が大きい実験ケースにおいても水蒸気爆発は発生していない。(溶融物量 KROTOS:数kg, FARO:100kg程度, COTELS:50kg程度)

※ 対象として考えている液体について、その液体の圧力に相当する沸点(飽和温度)と実際の液温との差

<外部トリガー(外乱)の付与>

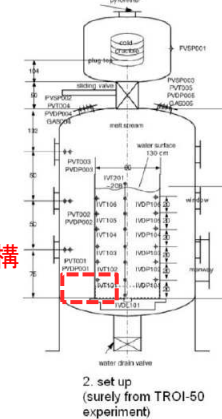
- ・ 水蒸気爆発が発生した実験の特徴としては、外乱(圧縮ガス等)を与えて液-液直接接触を生じやすくしていることが挙げられる。KROTOS実験およびTROI実験においては、圧縮ガス(KROTOS)又は爆薬(TROI)により外部トリガーを与え、水蒸気爆発が発生しやすい環境としている。



トリガー発生用の機構
(圧縮ガス注入)

実験装置底部
に150気圧の
圧縮ガスを放出
する機構を設置

KROTOS実験装置(引用文献[7]の図に加筆)



Expl.:
IVDP - water dynamic pressure
PVT - pressure vessel temperature
PVDP - pressure vessel dyn. pressure
PVSP - pressure vessel static press.
IVDL - bottom dynamic load
IVT - water temperature

トリガー発生用の機構
(PETN¹⁵ 1g)

爆薬(PETN¹⁵ 1g)に
よって、約90気圧程
度の圧力を与える機
構を設置

TROI実験装置(引用文献[1]の図に加筆)

[1] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.
[2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004
[3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15
[4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395
[5] D.Magallon, "Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments," Nucl. Eng.Design, 2006, 236 1998-2009
[6] M. Kato, H. Nagasaka, "COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions," JAERI-Conf 2000-015, 2000
[7] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts, Nucl. Eng. Des. , 1999 ,189 ,p.379-389

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(5/13)

<外部トリガー(外乱)付与の実験結果>

- ・ TROI実験の主要な実験条件および実験結果は以下のとおりであり、外部トリガーを与えた実験において水蒸気爆発が発生している。

TROI実験の主要な実験条件および実験結果^[1-4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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(注1)		341	0.67	Yes	Yes	0.63
	35	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8 (注2)	~3000(注1)	0.110	334	1.30	Yes	Yes	0.21
	36	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	5.3	~3000(注1)		305	0.95	Yes	Yes	0.50
	37	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	8.1	~3000(注1)	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) 引用文献[4]によれば各実験ケースの溶融物温度は下表のとおり。上表にて記載した溶融物温度約3000Kの妥当性については、次ページにて記載。

実験ケース	溶融物温度 (K)
34	3670(max) (3343)
35	2990(max) (2793)
36	3510 (3214)
37	3380 (3109)

(注2) 引用文献[4]によれば溶融物質量は19.93kgと記載されているが以前の試験のデブリが残っていた分が含まれたため水中に落下した正確な溶融物質量は不明と記載されている(装荷溶融物量(18kg)より落下溶融物量(19.93kg)のほうが多くなっている)。同時期にシリーズとして実施されたTROI-34,36,37における装荷溶融物と落下溶融物の割合は、平均すると約44%程度であり、TROI-35においても同程度の割合と仮定すると、装荷した溶融物の18kgの約44%として8kgとなり、合理的な値であると考えている。

※ 圧カスパイクのことであり、水蒸気爆発は発生していない。なお、圧カスパイクとは、高温の溶融物から冷却材への伝熱により水蒸気が発生し、急激に圧力が上昇する現象のこと。

[1] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

[2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004

[3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15

[4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(6/13)

<TROI-34～37における溶融物温度の妥当性>

- ・TROI-34～37では、二酸化ウランとジルコニアの溶融物を使用している。二酸化ウラン:ジルコニアが重量比70:30(mol比=0.52:0.48)の混合物は、固相線温度、液相線温度が約2800Kから約2900K(下図参照)であることから、溶融物の物性を踏まえ、引用した文献では溶融物温度として～3000K(約3000K)と記載したものと考えられる。

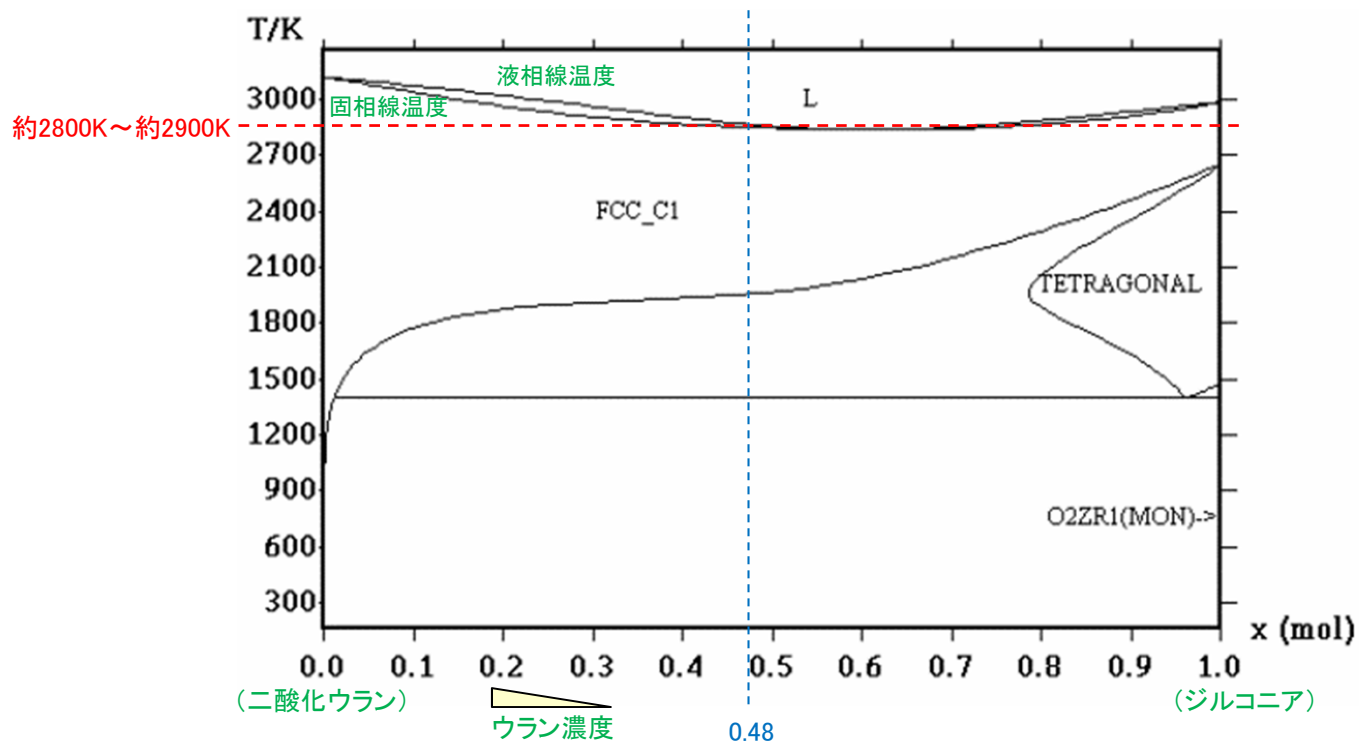


図1 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ phase diagram
(引用文献[1]の図に加筆)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(7/13)

<溶融物初期温度の設定>

- その他の水蒸気爆発が発生した実験の特徴としては実機よりも溶融物の初期の温度を高く設定することで、溶融物表面が冷却材中で固化しにくくさせていることが挙げられる。TROI実験の主要な実験条件および実験結果は以下のとおりであり、溶融物温度を高く設定することで水蒸気爆発が発生しやすい条件としている。

TROI実験の主要な実験条件および実験結果^[1-4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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※	-	

実機における溶融炉心温度: ≤約2600K

(注1) 引用文献[3]によれば温度計測に問題があり、実際には3500K程以上と推測されている。

(注2) 引用文献[3]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。

※ 圧カスパイクのことであり、水蒸気爆発は発生していない。
なお、圧カスパイクとは、高温の溶融物から冷却材への伝熱により水蒸気が発生し、急激に圧力が上昇する現象のこと。

[1] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

[2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004

[3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15

[4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(8/13)

水蒸気爆発の可能性の確認

➤ 大規模実験において、水蒸気爆発が発生した実験の特徴としては、「溶融物温度が高い場合」又は「外部トリガーを与えた場合」と整理。大規模実験の条件と実機条件を比較した結果は以下のとおり。

【溶融物温度】

・実機の溶融炉心は実験で使用されている溶融物である二酸化ウランやジルコニアより融点の低い鉄等が溶融することから、溶融物の初期の温度は実験条件よりも低くなる。

【外部トリガー】

・初期水張りによって格納容器下部に張られた水は準静的であり、外乱が加わる要素は考えにくいことから、実機において外部トリガーは発生しない。

・TROI実験では爆薬(PETN¹⁵)により約90気圧もの圧力により外部トリガーを与えている。実機である女川2号の有効性評価において、格納容器圧力上昇の観点で厳しい事象を想定した場合でも格納容器圧力の最大値は0.640MPa[gage](約6.4気圧)程度であり、大きな圧力変化は生じない。

・仮に外乱により蒸気膜が崩壊した場合であっても、実機の溶融炉心は過熱度が小さく、また冷却水との温度差が大きいため、溶融炉心と冷却水が接触した部分の温度が固化温度以下に下がり、表面が固化することから、液-液接触とならないと考えられる。

➤ したがって、実機において想定される条件において、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。

➤ また、実機における格納容器下部の水深は水蒸気爆発が発生した実験条件より深いため粒子化した溶融炉心が固化しやすいこと、BWRの原子炉圧力容器下部には制御棒駆動機構等の構造物が存在しているため水蒸気爆発の阻害要因となることから、実機における水蒸気爆発の発生確率を更に低減させると考えられる。

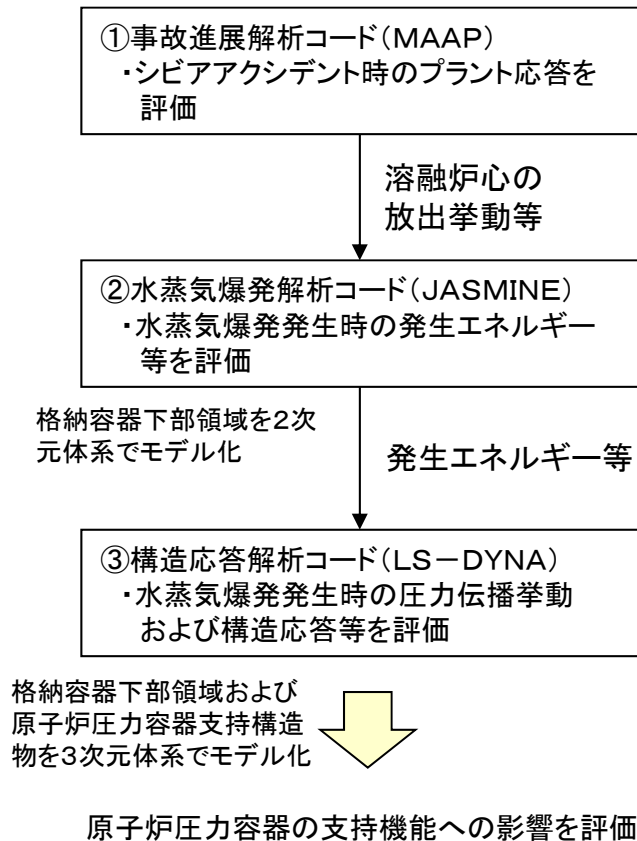
➤ ただし、水蒸気爆発が発生した場合における格納容器の健全性に対する影響を確認することは、格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考えられることから、仮に水蒸気爆発が発生した場合の評価を実施した。

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(9/13)

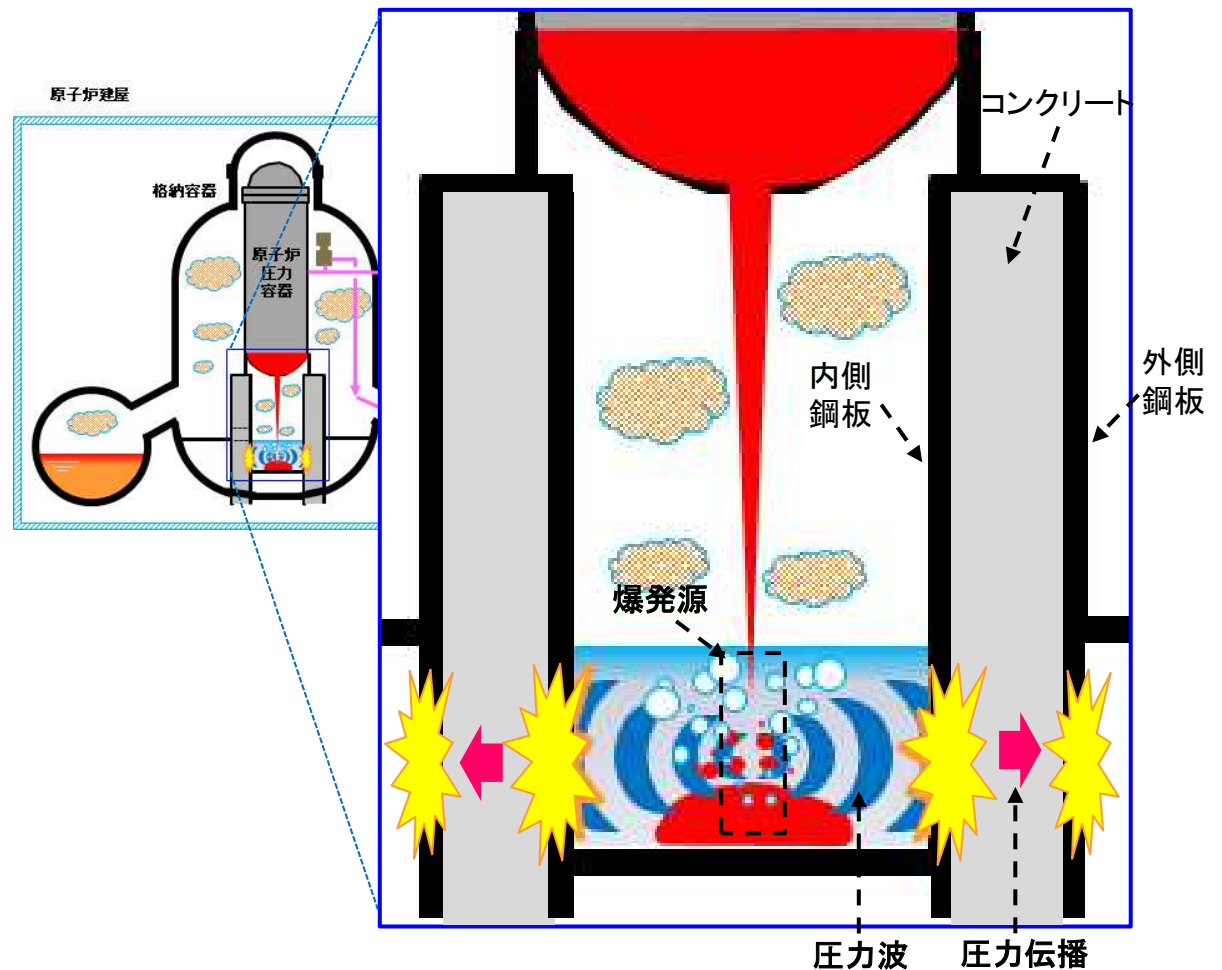
水蒸気爆発発生を仮定した場合の影響評価

- 仮に水蒸気爆発が発生した場合における原子炉圧力容器の支持機能への影響を以下の評価方法にて評価した。
- 評価に用いる解析コードは、有効性評価に使用している解析コードと同様に電力・メーカーで確認を行っており、国の審査でも確認されている。

<評価方法>



<水蒸気爆発評価の概要図>

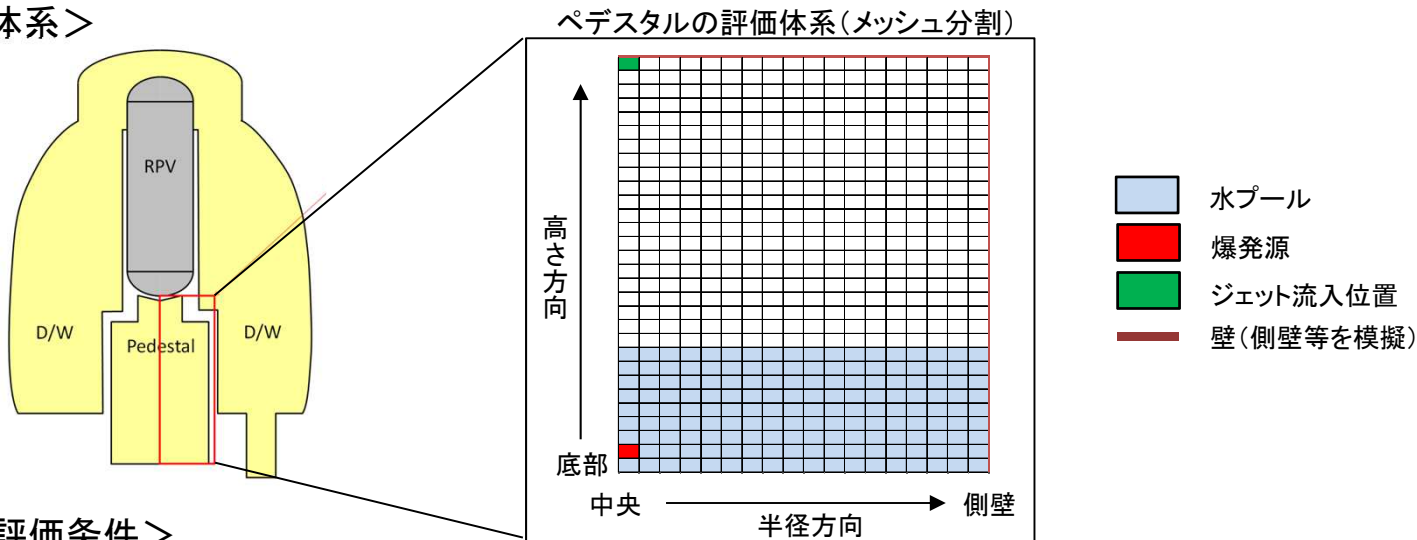


2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(10/13)

水蒸気爆発発生を仮定した場合の影響評価条件(JASMINE)

- JASMINE評価では、MAAPにおける溶融炉心の放出挙動等を入力として、水蒸気爆発発生時の運動エネルギーを評価している。
- 評価体系は下図のとおりであり、円柱状の格納容器下部を半径方向と高さ方向にメッシュ状に分割している。また、評価条件は下表のとおりであり、保守的な評価条件を設定することで、水蒸気爆発により発生するエネルギーを保守的に評価している。

<評価体系>



<主な評価条件>

項目	解析条件	想定される実現象	条件設定の考え方
原子炉圧力容器の破損径※	0.2m	計装管等の局所的な小口径(0.0357m程度)の破損が発生し、固相を巻き込んで緩やかに流出	落下する溶融炉心の量が多い方が厳しい評価になることから、溶融炉心の全量が短時間に格納容器下部に落下するという保守的な条件を考慮して設定
格納容器下部水位	4.2m	初期水張りの管理水位の上限として格納容器下部水位3.88mを設定しているため、原子炉圧力容器破損時の下部水位は3.88m以下	格納容器下部水位が高い方が厳しい評価となることから、物理的に水位が上昇する上限である格納容器下部水位(約4.10m)を包絡する水位である4.2mの水位を設定
水蒸気爆発発生タイミング	発生エネルギーが最も大きくなるタイミング	水蒸気爆発は発生しない	発生エネルギーが最も大きくなるように設定

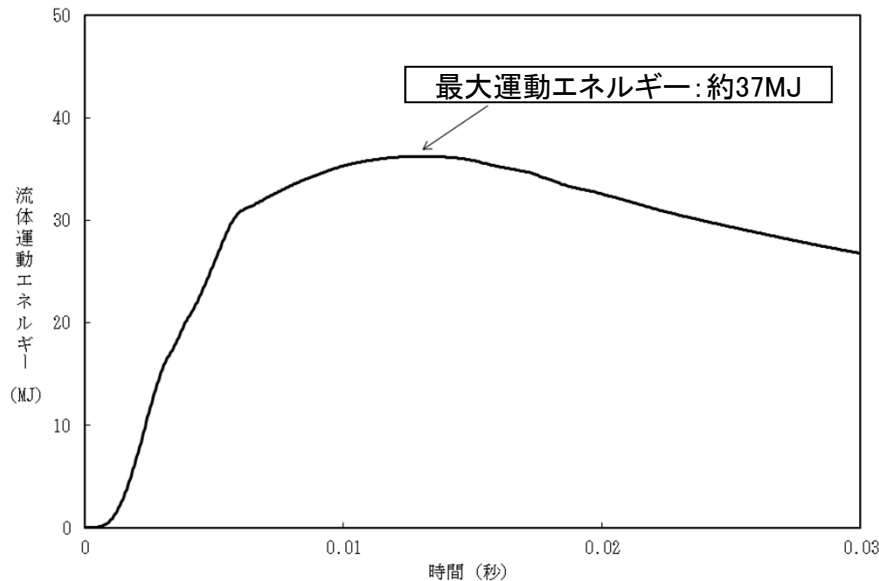
※ MAAP評価における設定

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(11/13)

水蒸気爆発発生を仮定した場合の影響評価結果(JASMINE)

- JASMINE評価の結果、水蒸気爆発により発生する最大運動エネルギーは約37MJとなった。
- 水蒸気爆発により発生するエネルギーの評価において、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータである。下表に示すとおり、二酸化ウランを使用した水蒸気爆発実験であるTROI実験(SERENA2)におけるエネルギー変換効率は最大でも2.49%であり、女川2号の水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率(約4.0%)のほうが大きいことから、最新の水蒸気爆発実験を踏まえても保守的な評価となっている。

<水蒸気爆発によるエネルギーの推移>



<エネルギー変換効率>

- ・TROI実験(SERENA2)におけるエネルギー変換効率^[1]

TS1	TS2	TS3	TS4	TS6
0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%

- ・女川2号のエネルギー変換効率: 約4.0%

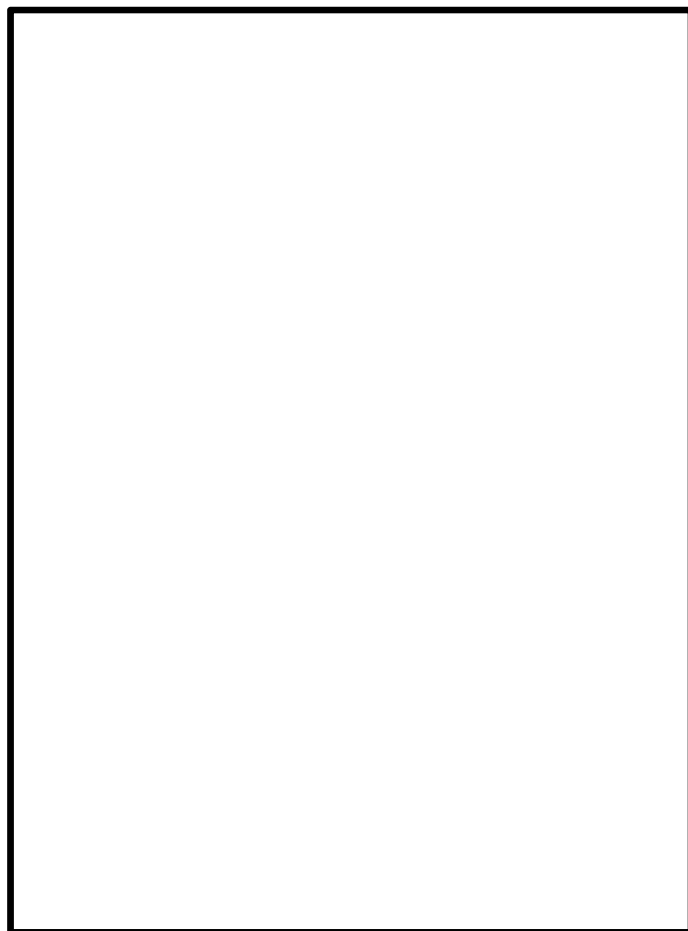
[1]堀田, 森田, 梶本, 丸山.「JASMINE Version 3による溶融燃料-冷却材相互作用SERENA2実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌(2017)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(12/13)


水蒸気爆発発生を仮定した場合の影響評価条件(LS-DYNA)

- LS-DYNA評価では、JASMINE評価から得られた水蒸気爆発発生時のエネルギーを入力として、原子炉圧力容器支持構造物にかかる応力等を評価している。
- 評価体系は下図のとおりであり、格納容器下部周辺をメッシュ状に3次元に分割している。また、評価条件は下表のとおりであり、圧力源の内部エネルギーとしてJASMINE評価結果の運動エネルギーの最大値を再現する値を用いることで、保守的な評価となっている。

<評価体系>



<主な評価条件>

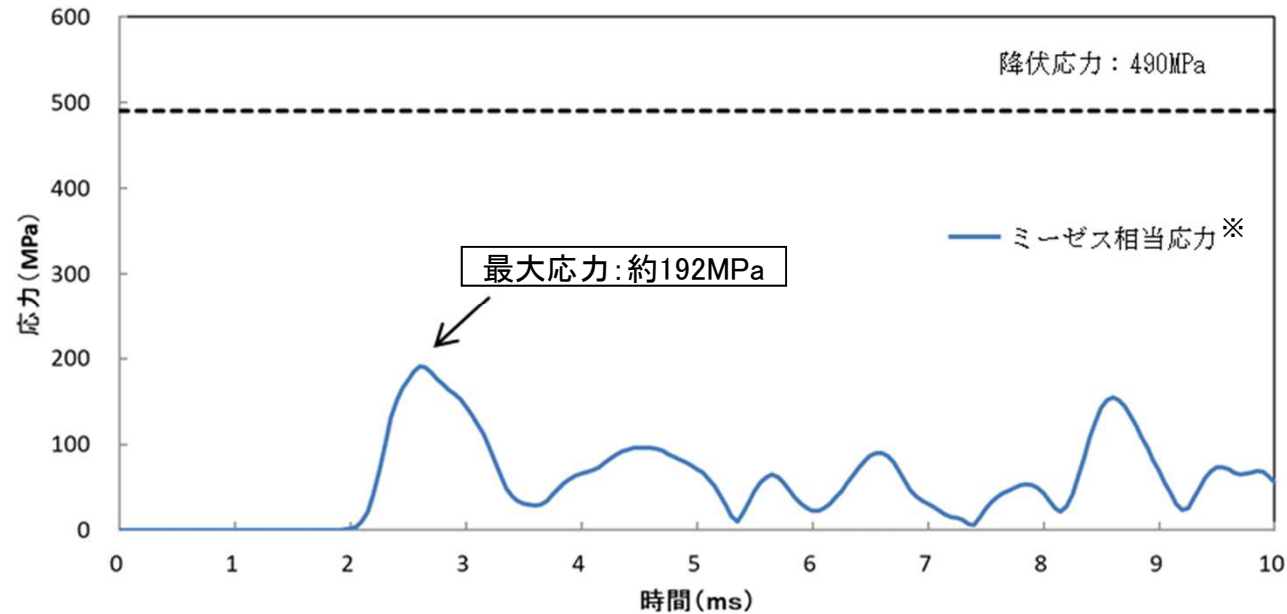
項目	解析条件
圧力源の位置	格納容器下部中央
圧力源の内部エネルギー	 (JASMINE評価結果の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定)

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解 指摘事項④について(13/13)

水蒸気爆発発生を仮定した場合の影響評価結果(LS-DYNA)

➤ LS-DYNAによる評価の結果、女川2号炉の格納容器下部の体系では、外側鋼板にかかる最大応力は約192MPaとなり、外側鋼板の降伏応力(490MPa)を大きく下回ることから、原子炉圧力容器の支持機能に影響は生じない。なお、構造上、格納容器下部の外側鋼板のみで原子炉圧力容器の支持が可能であるため、外側鋼板にかかる応力の評価を示している。

<外側鋼板にかかる応力の推移>



※ ミーゼス相当応力による評価は、水蒸気爆発の評価のように多くの応力成分が作用する多軸応力場において、降伏評価を行う代表的な評価方法

2. 10月3日要望書における指摘事項についての見解

その他、宮城県議会環境生活農林水産委員会における県へのご指摘に対する回答

・2012年の論文(文献4)は放出質量の記載が異なる。

- 文献1によると、TROI-35の溶融物質量は8kgと記載されており、本資料においてもその数値を記載している。一方、実験者の論文(文献4)においては19.93kgと記載している。
- 実験者は、文献4において、TROI-35の溶融物質量の測定について、以下のとおり分析している。
 - ・装荷溶融物量(18kg)より落下溶融物量(19.93kg)のほうが多くなっている。
 - ・以前の試験のデブリが残っていた分が含まれたため水中に落下した正確な溶融物量は不明である。
- 弊社においては、同時期にシリーズとして実施されたTROI-34,36,37における装荷溶融物と落下溶融物の割合は、平均すると約44%程度であり、TROI-35においても同程度の割合と仮定すると、装荷した溶融物の18kgの約44%として8kgとなり、合理的な値であると考えている。
- ご指摘の点、文献1に基づき記載した数値であり、以下のとおり、第19回安全性検討会の資料に追加する。
 - ・実験者の論文によれば溶融物質量は19.93kgと記載されているが、以前の試験のデブリが残っていた分が含まれたため水中に落下した正確な溶融物量は不明と記載されている(装荷溶融物量(18kg)より落下溶融物量(19.93kg)のほうが多くなっている)。同時期にシリーズとして実施されたTROI-34,36,37における装荷溶融物と落下溶融物の割合は、平均すると約44%程度であり、TROI-35においても同程度の割合と仮定すると、装荷した溶融物の18kgの約44%として8kgとなり、合理的な値であると考えている。

表3 各文献における溶融物質量の比較

		TROI-35
文献1	溶融物質量(kg)	8
文献4	装荷溶融物量(kg)	18
	落下溶融物量(kg)	19.93

3. 12月26日要望書における指摘事項についての見解(1/2)

12月26日要望書における指摘事項①

IAEAは「溶融炉心が水に落ちないようにすることが好ましい方法である」(IAEA-TECDOC-1791)という認識です。溶融炉心を水で受け止めるという「安全」対策が、逆に危険な水蒸気爆発を招くことになるのではないのでしょうか。

【弊社の回答】

- 設計基準事故対処設備および重大事故等対処設備を整備していることから、重大事故等の起因事象となる事象が発生した場合においても、原子炉圧力容器が破損するまで事象が進展する可能性は極めて小さいと考えている。
- 新規制基準適合性審査においては重大事故等対処設備が機能喪失していることを前提に、溶融炉心が格納容器下部に落下する場合に発生する溶融燃料-冷却材相互作用(FCI)や溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)の評価を実施している。
- そのような事象進展を想定した上で、水蒸気爆発、MCCI、溶融炉心の冠水の観点等を考慮し、総合的に格納容器破損防止対策を検討している。
- 弊社においては、水蒸気爆発の可能性は極めて小さいこと、仮に発生した場合でも格納容器の健全性に影響はないことおよび格納容器下部に落下した溶融炉心を速やかに冷却することを考慮し、格納容器下部に事前に水張りを実施する対策を採用している。

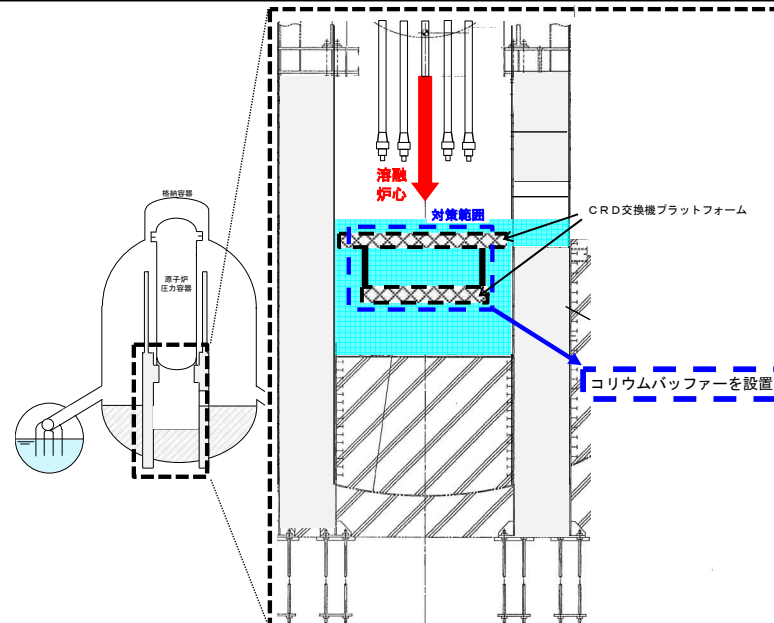
3. 12月26日要望書における指摘事項についての見解(2/2)

12月26日要望書における指摘事項②

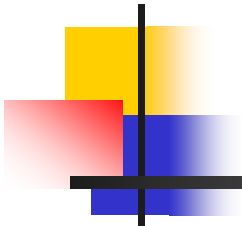
原子力規制委員会が11月12日の審査会合で、溶融炉心を分散させる緩衝材を設置するように追加対策を求めましたが、原子力研究所(当時)の研究員が「分散板によって溶融物を水面上で分散させた場合、自発的な蒸気爆発は起こりにくくなったが、起こった場合には通常よりも激しい水蒸気爆発となった」(1994年, JAERI-Review94-010, P.7)と報告しております。追加対策は逆により危険を増すのではないのでしょうか。

【弊社の回答】

- 弊社においては、更なる安全性向上に向けた自主的な取り組みとして、水蒸気爆発が発生した場合のエネルギーを低減するために、コリウムバッファを格納容器下部に設置することとしている(対策イメージは下図のとおり)。
- 弊社としては、溶融炉心落下時の実効的な水中落下距離を制限し、水深が浅い状態と同様の状況とすることで、仮に水蒸気爆発が発生した場合の機械的エネルギーを低減することをコリウムバッファ設置の一つの目的としている。
- ご指摘の知見は弊社においても認識しており、この知見も含め水蒸気爆発に関する技術的知見を踏まえ、コリウムバッファの設置においては、他の機器・構造物へ干渉し、構造的・機能的な影響を与える等、悪影響等を及ぼすことがないように設計検討を行っていく。



対策イメージ



参考



1. 水蒸気爆発実験の主要な条件および実験結果

KROTOS実験の主要な実験条件および実験結果^{[1][2][3]}

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	

FARO実験の主要な実験条件および実験結果^[2]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	-

[1] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts, Nucl. Eng. Des. , 1999 ,189 ,p.379-389

[2] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nucl. Eng. Des. , 2006, 236, p.1998-2009

[3] H. S. Park, R. Chapman, M. L. Corradini, Vapor Explosions in a One-Dimensional Large-Scale Geometry With Simulant Melts, NUREG/CR-6623, 1999.

1. 水蒸気爆発実験の主要な条件および実験結果

TROI実験の主要な実験条件および実験結果(1/2)^[1-4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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	-	

[1] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

[2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004

[3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15

[4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395

1. 水蒸気爆発実験の主要な条件および実験結果

TROI実験の主要な実験条件および実験結果(2/2)^[1-4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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	-

[1] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, Strasbourg University, 2012, Ph.D.thesis.

[2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04, Pittsburgh, PA USA, June 13-17, 2004

[3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 2003, 222, p.1-15

[4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., 2007, Vol.158, p.378-395

1. 水蒸気爆発実験の主要な条件および実験結果

COTELS実験の主要な実験条件および実験結果^[1]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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	-	

(注)溶融物温度は3000~3100Kと見積もられている^[2] ^[3]

SERENA実験(フェーズ2)の主要な実験条件および実験結果^[4]

実験名	実験ケース	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	機械的エネルギー変換効率(%)
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 ₂ O 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 ₂ O 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

[1] M. Kato, H. Nagasaka, COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions, JAERI-Conf 2000-015, 2000.

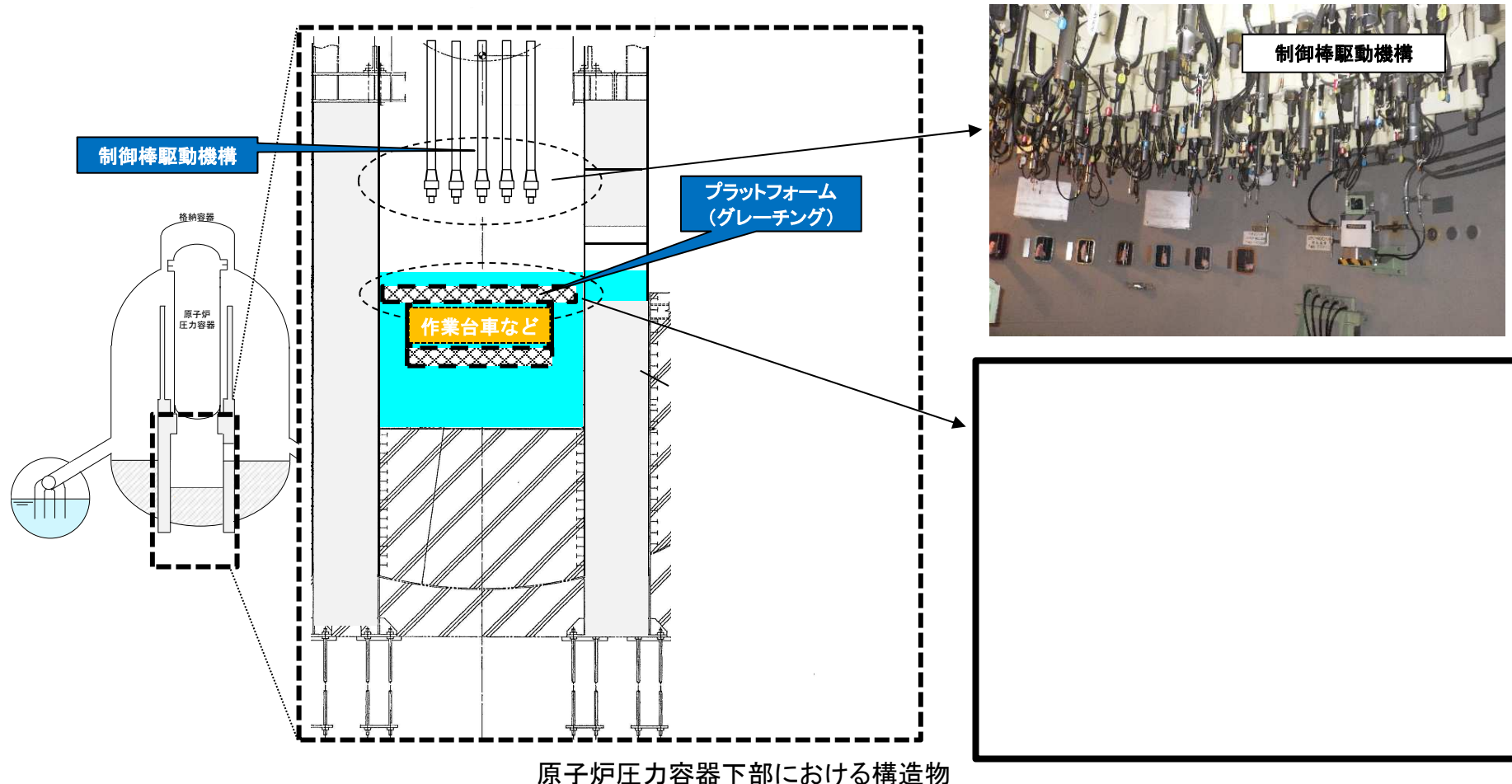
[2] (財)原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成13年7月

[3] M. Kato, et al, Fuel Coolant Interaction Tests using UO₂ Corium under Ex-vessel Conditions, JAERI-Conf 99-005, 1999.

[4] NEA/CSNI/R, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions, 2015.

2. 圧力容器下部の構造物について

- 原子炉圧力容器の下部には、作業用のプラットフォーム(グレーチング)、制御棒駆動機構等が存在している。
- 実機において想定される溶融物(二酸化ウランとジルコニウムの混合溶融物)を用いた大規模実験の知見から、水蒸気爆発の発生の可能性は極めて低いと考えられる。これに加えて、実機の構造上、原子炉圧力容器から流出した溶融炉心は、構造物との干渉により、水蒸気爆発の発生の可能性は更に低減されると考えられる。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。