

目 次

第 1	はじめに	3
第 2	本件原子力発電所の安全確保対策.....	3
1	自然的立地条件に係る安全確保対策	3
2	事故防止に係る安全確保対策.....	4
3	福島第一原子力発電所の事故を契機とした更なる安全確保対策	5
4	小括.....	7
第 3	本件原子力発電所における水素爆発の発生可能性	8
1	水素爆発の概要	8
2	炉心が著しく損傷した場合に想定される水素発生源	9
3	水素低減対策	11
4	水素濃度評価（水素爆発の発生可能性）	12
5	小括	14
第 4	本件原子力発電所における水蒸気爆発の発生可能性	14
1	水蒸気爆発の概要	14
2	水蒸気爆発の評価（水蒸気爆発の可能性の評価）	16
3	小括	21
第 5	原告ら主張への反論	21
1	外部トリガーの発生可能性について	21
2	T R O I の実験における溶融物温度について	22
第 6	結論	26

第 1 はじめに

原告らは、準備書面 70 において、過酷事故時には福島第一原子力発電所事故で発生した水素爆発による圧力パルスや、高温溶融物による水の囲い込みなど外部トリガーが生じ得るとして、本件原子力発電所で水蒸気爆発が発生する具体的危険性がある旨主張する。原告らの主張は、従来の主張の繰返しに過ぎず、本件原子力発電所において水蒸気爆発の生じる可能性が極めて低いことは準備書面 18, 23, 27 で述べたとおりであるが、本書面では、被告九州電力が行ってきた各種安全確保対策について俯瞰的に説明し、本件原子力発電所において福島第一原子力発電所事故のような過酷事故に至る具体的危険性はないこと、また、万一事故等が発生した場合であっても原告らが主張する水素爆発や水蒸気爆発の可能性は極めて小さいことを改めて述べる。

具体的には、第 2 において、本件原子力発電所の安全確保対策によって事故等が発生する可能性は極めて低く、仮に事故等が発生したとしても、水素爆発や水蒸気爆発の起因となる炉心の著しい損傷に至る危険性はないことを述べた上で、第 3, 第 4 において、水素爆発及び水蒸気爆発の位置づけ及びそれぞれの概要、本件原子力発電所での対策状況ならびに安全性評価結果、第 5 において、原告準備書面 70 に対する反論を必要な範囲で述べる。

第 2 本件原子力発電所の安全確保対策

1 自然的立地条件に係る安全確保対策

本件原子力発電所は、地盤、地震、津波等の自然的立地条件を十分に把握した上で、これらが事故等の誘因とならないよう、その特性を踏まえた設計及び建設を行い、建設以降も随時、最新の知見等に基づいた評価・検討を行って、地震、津波等の自然力に対し本件原子力発電所の安全性が十分確保されていることを確認するなどしている。

そして、後述する安全確保対策においては、本件原子力発電所の安全性を確保するために重要な役割を果たす「安全上重要な設備」について、地震、

津波等の自然力による共通要因故障（共通要因による安全機能の一斉喪失）を防止している。

2 事故防止に係る安全確保対策

本件原子力発電所は、事故等発生時に、多重の障壁（燃料ペレット、燃料被覆管、原子炉容器（原子炉冷却材圧力バウンダリ）、原子炉格納容器（鋼板・コンクリート一体型））の健全性を維持するため、原子炉を「止める」、原子炉を「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」という安全確保対策を講じている。原子炉を「止める」ための設備として制御棒等を設置しており、これらによって、燃料ペレット及び燃料被覆管を損傷させることなく、原子炉を安全に停止できる。原子炉を「冷やす」ための設備としては、非常用炉心冷却設備（ECCS¹）等を備えている。放射性物質を「閉じ込める」ための設備としては、原子炉格納容器（鋼板・コンクリート一体型）等を備えている。

そして、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」という機能を有するこれらの安全上重要な設備については、その安全機能を喪失しないよう耐震安全性を備え、多重性または多様性及び独立性を有する設備とするなど高い信頼性を確保している。このような安全確保対策を講ずるにあたっては、「第1段階 異常の発生防止対策」、「第2段階 異常の拡大防止対策」、「第3段階 燃料の損傷防止対策²」の3段階の対策を用意し、それぞれの段階について、後続の段階に期待せず当該段階で異常の発生等を防止するという多重防護の考え方を採用している（図1）。

このように、被告九州電力は、本件原子力発電所において、地震や津波等の自然力に対する対策や、事故等の発生を防止するための対策はもとより、万一の事故等発生時に炉心の著しい損傷や周辺環境への放射性物質の異常な放出を防止する対策も含めて、放射性物質のもつ危険性を顕在化させないた

¹ ECCS：「Emergency Core Cooling System」の略。

² 燃料の損傷防止により、多重の障壁のうち最も基本の第1、第2の障壁である燃料ペレット及び燃料被覆管の健全性が維持される。

めの事故防止に係る安全確保対策を講じている。かかる安全確保対策により、本件原子力発電所においては、事故等が生じる可能性は極めて低く、また、万一事故等が発生した場合であっても、水素爆発や水蒸気爆発の起因となる炉心の著しい損傷は確実に防止できるようになっている。

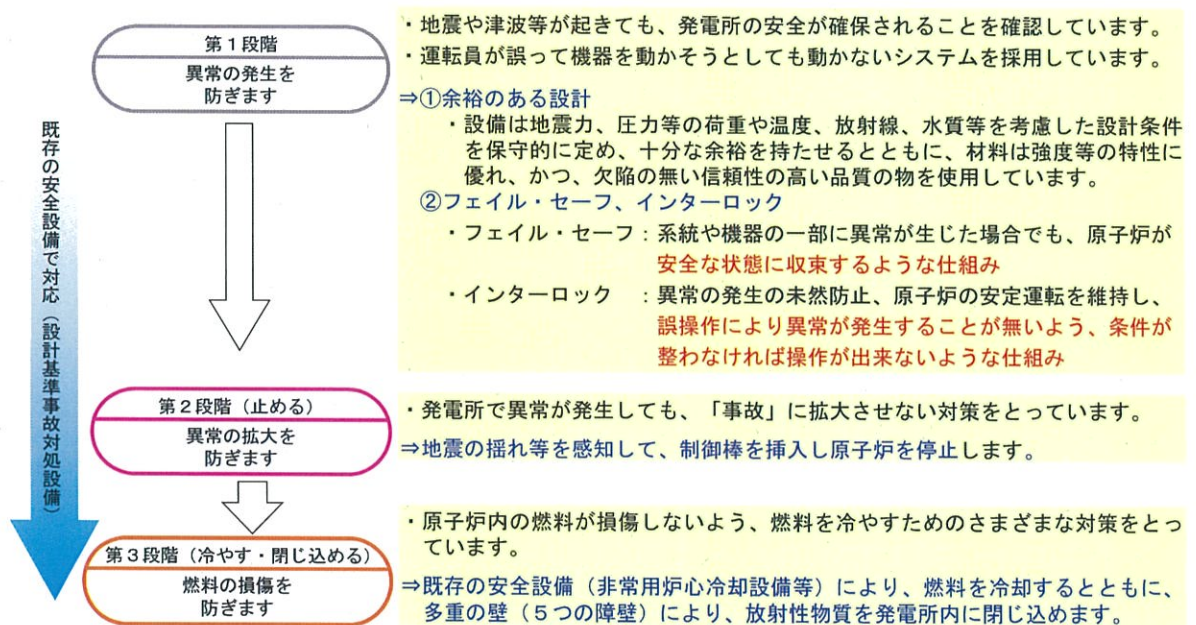


図1 本件原子力発電所における基本的な安全確保対応の流れ

3 福島第一原子力発電所の事故を契機とした更なる安全確保対策

福島第一原子力発電所の事故においては、地震発生後直ちに原子炉は停止したものの、地震により同発電所への送電設備等が損傷したため外部電源が失われたこと、その後襲来した津波により外部電源喪失後に作動していた非常用ディーゼル発電機が停止し、同じく津波により原子炉の熱を海に逃がすための海水ポンプも破損したこと、更に計測や制御のために必要な直流電源が喪失したことにより、事故防止に係る安全確保対策が奏功せず、炉心が著しく損傷するとともに、格納容器等の損傷によって放射性物質の閉じ込めにも失敗し、放射性物質が周辺環境に多量に放出された。

被告九州電力は、福島第一原子力発電所の事故を契機に、第1段階から第

3段階までの「既存の安全設備での対応」について、地震や津波などの自然的立地条件の想定を従前以上に厳しく（安全側に）した上で、火山や竜巻などの他の自然現象についても再評価を行った。

その結果、福島第一原子力発電所事故以前より講じていた第1段階から第3段階までの既存の安全設備が機能喪失しないこと、すなわち炉心が著しく損傷する危険性はないことを確認している。

更に、被告九州電力は、あえて本件原子力発電所の多重の障壁の健全性を維持するために設けている、原子炉を「止める」「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」という信頼性の高い安全上重要な設備がその安全機能を喪失するような事態を想定し、そのような場合に事象の進展、拡大を防止し、炉心の著しい損傷や原子炉格納容器の破損を防止するため、「第4段階 放射性物質の放出防止対策」及び「第5段階 放射性物質の放出を極力抑える」の「更なる安全対策」として、常設及び可搬式の設備（注水設備、電源設備等）を新たに配備し、より一層安全確保対策を充実させている。（図2）

こうした安全確保対策の強化により、本件原子力発電所においては、万一事故等が発生し、さらに安全上重要な設備の一部が故障等した場合であっても、炉心の著しい損傷や周辺環境への放射性物質の異常な放出は確実に防止できるようになっている。

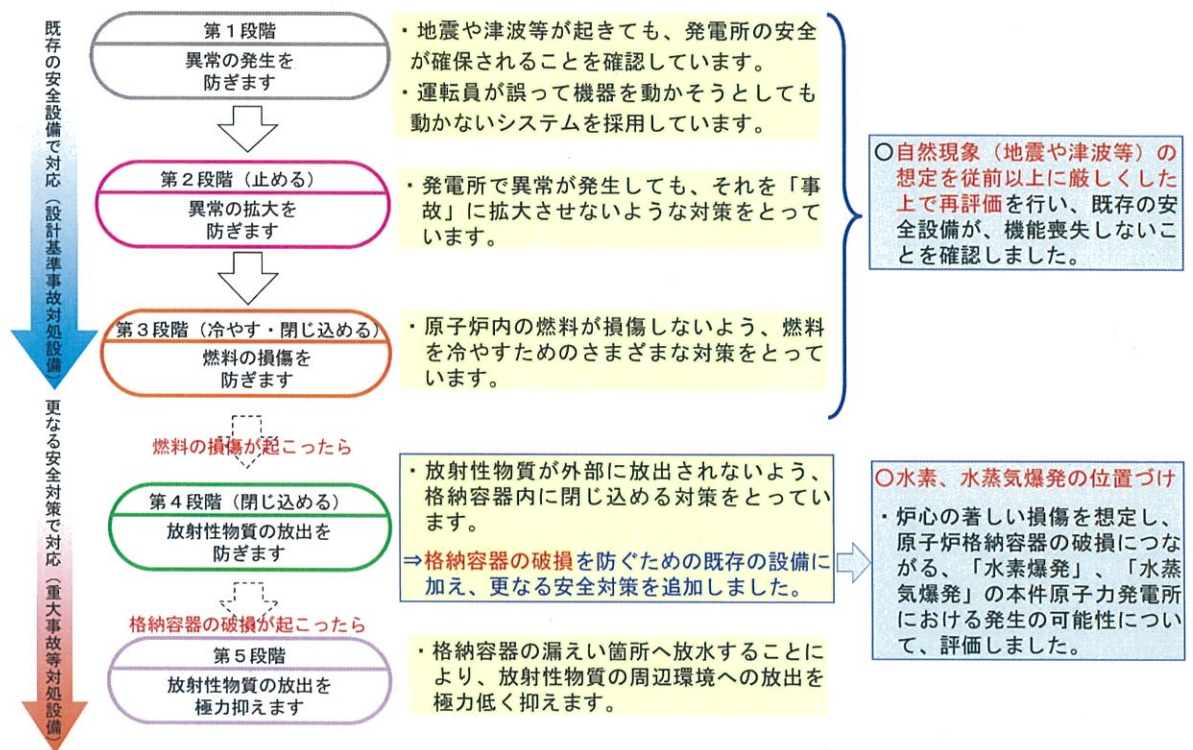


図2 本件原子力発電所における安全確保対応の流れ
(福島第一原子力発電所事故後)

4 小括

以上のとおり、本件原子力発電所においては、福島第一原子力発電所事故と同様な事故が生じること自体がまず考えられないが、万一事故等が発生し、さらに「既存の安全設備」の一部が故障等した場合であっても、「更なる安全対策」により炉心の著しい損傷や周辺環境への放射性物質の異常な放出に至ることはない。

第3 本件原子力発電所における水素爆発の発生可能性

1 水素爆発の概要

水素爆発とは、水素と酸素とが急速に反応、すなわち燃焼する化学変化現象である。水素爆発は、大きく「爆燃」と「爆轟」との2つの形態³がある。

「爆轟」は、衝撃波を伴って燃え広がる破壊力の大きな現象であり、「爆燃」は、「爆轟」に比べ周囲に対する破壊力が小さい現象である。したがって、本件原子力発電所においては、格納容器破損防止の観点から、衝撃波が発生することで格納容器の健全性に影響を及ぼし得る「爆轟」に注目し、その発生の可能性を評価している。

なお、図3に示す通り、これらの燃焼形態は、空気中の水素、酸素（空気）及び水蒸気の割合で異なる。水素が爆発するには、酸素濃度も必要であり、水素及び酸素（空気）がバランスよく混合した状態、つまり、図3の桃色で示した領域でないと「爆轟」は起きない。

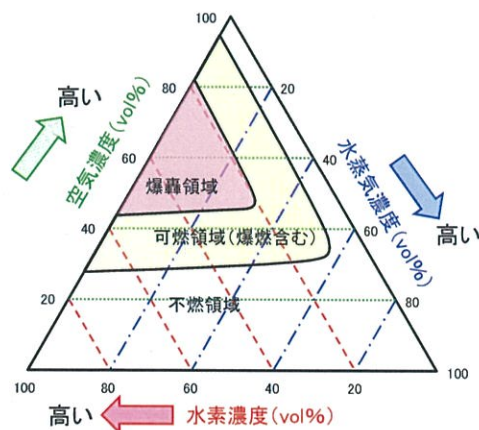


図3 水素爆発に係る水素、空気及び水蒸気の関係

³ 一般的な水素爆発の概要

	爆燃，燃焼 火炎の伝播速度が遅く，空間内で圧力はほぼ均一。	爆轟 燃焼に伴う火炎の伝播速度が音速を超え，不連続な圧力変化。局所的に高い圧力（衝撃波）となる。
火炎伝播速度	音速以下	超音速
燃焼現象	ガスコンロ，内燃機関，火炎	ガス爆発

2 炉心が著しく損傷した場合に想定される水素発生源

本件原子力発電所は、各種の安全確保対策を講じることにより、仮に事故等が発生したとしても水素発生につながるような炉心の著しい損傷に至ることはないが、被告九州電力は、万一炉心が著しく損傷した場合を想定し、原子炉格納容器の破損につながる水素爆発発生の可能性を評価している。

原子力発電所においては、これまでの知見から、炉心が著しく損傷した場合の水素発生源として、「①水—炉心内の金属反応」、「②水の放射線分解」、「③原子炉格納容器内の金属腐食」及び「④溶融炉心・コンクリート相互作用（M C C I⁴）」の4つがあり、以下にその内容を述べる。

① 水—炉心内の金属反応

原子炉格納容器内には、燃料被覆管や炉内構造物（炉心を支える金属）などの金属が存在し、この金属は、高温になると水蒸気の中の酸素と結びつきやすく、水の分子から酸素を奪い取り、残った水素が気体となる。

燃料被覆管については、燃料ペレットが損傷するような高温になると、燃料ペレットと直接接触している燃料被覆管も高温となり、燃料被覆管に用いられているジルコニウムと水蒸気とが反応し、水の分子から酸素が奪われ、水素が発生する。

また、炉内構造物についても、炉内構造物が高温となれば、燃料被覆管の場合と同様に水の分子から酸素が奪われ、水素が発生する。

② 水の放射線分解

水が放射線エネルギーを吸収すると、水分子を構成する水素と酸素とが個々の元素に分解される。分解された酸素及び水素は元の水に戻るものもあるが、一部は水素元素同士が2つ結びつき、ごく少量の水素が発生する。

⁴ M C C I : 「Molten Core Concrete Interaction」の略。

③ 原子炉格納容器内の金属腐食

原子力発電所においては、配管の破断等が生じ、1次冷却材が原子炉格納容器内に放出され、その結果、発生した水蒸気により原子炉格納容器内の圧力、温度が上昇すると、冷却水をスプレイ（噴霧）することとしており、この冷却水と原子炉格納容器内のクレーンやグレーチング（格子状の足場）に用いられている金属との腐食反応が起き、①水－炉心内の金属反応と同様に水の分子から酸素が奪われ、ごく少量の水素が発生する。

④ 溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）

溶融炉心と原子炉下部キャビティ床面のコンクリートとが直接接触すると、高温の溶融炉心によりコンクリートが熱分解し、溶融する。コンクリートの溶融に伴い、コンクリート中に含まれる水と溶融した炉心中の金属との反応が起き、①水－炉心内の金属反応と同様に水の分子から酸素が奪われ、水素が発生する（図4）。

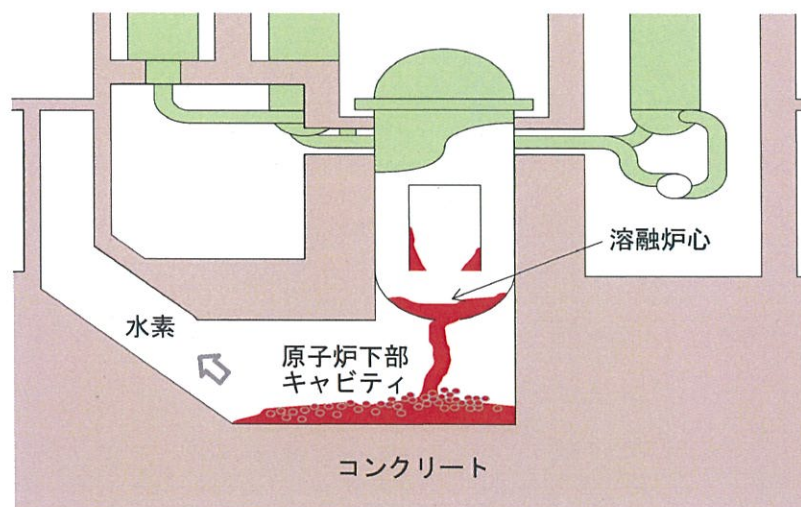


図4 溶融炉心・コンクリート相互作用

なお、本件原子力発電所の事故等の際には、上記③のとおり、冷却水のスプレイ（噴霧）により、原子炉下部キャビティに冷却水が注入され、溶

融炉心が冷却されることから、コンクリートの侵食が防止され、「④溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）」は発生しない。

3 水素低減対策

(1) 本件原子力発電所は水素爆発を起こしにくい構造であること

本件原子力発電所は、加圧水型原子炉であり、沸騰水型原子炉の福島第一原子力発電所と比べ、原子炉格納容器が大きく、自由体積が大きい（約 10 倍）ことから、万一原子炉格納容器内に水素が発生したとしても水素濃度が高濃度となりにくい（図 5）。

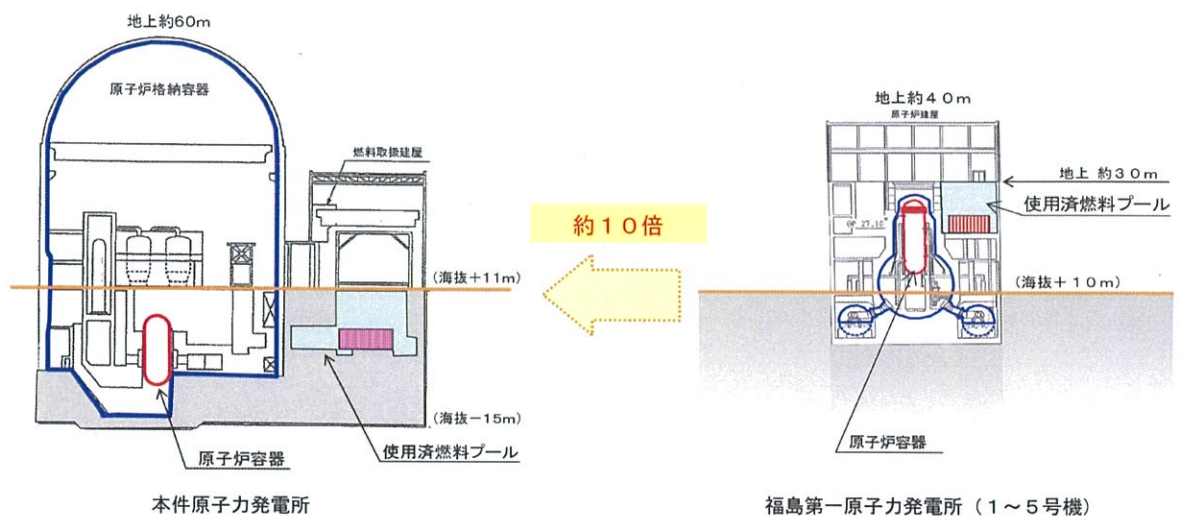


図 5 原子炉格納容器体積の比較

(2) 福島第一原子力発電所事故を契機として、水素濃度低減を図る設備を設置していること

本件原子力発電所においては、水素濃度を低減するための「更なる安全対策」として、静的触媒式水素再結合装置（PAR）⁵を 5 台設置（プラントあたり）するとともに、より一層の水素濃度低減を図るための設備とし

⁵ 静的触媒式水素再結合装置：触媒（白金，パラジウム）により水素を酸素と反応させて水にする装置。PARとは、「Passive Autocatalytic Recombiner」の略。

て電気式水素燃焼装置（イグナイタ）⁶を 14 台設置（予備 1 台含む）（プラントあたり）している（図 6）。

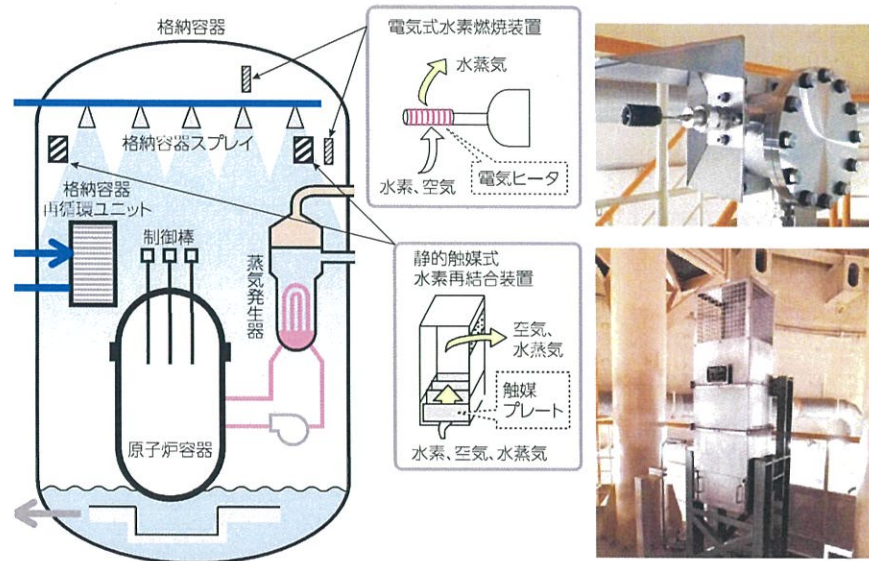


図 6 静的触媒式水素再結合装置及び電気式水素燃焼装置

4 水素濃度評価（水素爆発の発生可能性）

被告九州電力は、準備書面 18, 23 で述べたとおり、万一炉心が著しく損傷した場合においても、静的触媒式水素再結合装置（PAR）等により水素爆発に至らないと評価しており、以下にその内容を述べる。

(1) まず、評価にあたっての判断基準は、「原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件⁷に換算して 13vol%以下又は酸素濃度が 5vol%以下であること」とされており【乙イ A62 (77 頁)】、この条件では「爆轟」が発生することはない。

(2) 評価においては、前述（10～11 頁）のとおり、本件原子力発電所における万一の事故等の際には、原子炉下部キャビティの冷却水により熔融炉

⁶ 電気式水素燃焼装置（イグナイタ）：電気ヒータにより、水素を強制的に燃焼させて水にする装置。

⁷ ドライ条件：ある気体中に含まれる物質のうち、水蒸気を除外した条件として考慮すること。

心が冷却され、コンクリートの侵食が防止されるため、「④溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）」に伴う水素が発生することはないことから、4つの水素発生源のうち、「④溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）」以外の「①水－炉心内の金属反応」、「②水の放射線分解」及び「③原子炉格納容器内の金属腐食」に伴い発生する水素を考慮している。

また、最も厳しい事象として、「大破断LOCA時に非常用炉心冷却設備（ECCS）の低圧注入及び高圧注入機能が喪失する事象」、すなわち、通常では破断が考えられないような配管が大破断し、加えて多重性及び独立性を有している非常用炉心冷却設備（ECCS）の低圧注入系及び高圧注入系が全て機能喪失するという事態を想定している。さらに水素濃度低減を図るために設置した電気式水素燃焼装置（イグナイタ）が機能しないという安全側の条件も付加している。

そして、「①水－炉心内の金属反応」に伴う水素発生量については、原子力規制委員会による「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」に、「原子炉圧力容器の下部が破損するまでに、全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応する」ことを想定するよう定められている【乙イA61（17頁）】。これを踏まえ、解析から得られる本件原子力発電所の全炉心内のジルコニウム量の反応割合は75%を大きく下回るもの（約27%）であるにもかかわらず、被告九州電力は全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応することを条件として評価している。【乙イB56-2（195、196頁）】

なお、評価における水素発生量のうち、「②水の放射線分解」及び「③原子炉格納容器内の金属腐食」に伴う水素発生量は、全体の1%程度と少量であり、「①水－炉心内の金属反応」に伴う水素発生量が大部分を占める。

評価の結果、原子炉格納容器内の水素濃度は最大約12.8vol%（ドライ濃度換算）に留まり、水素爆発（爆轟）が発生する可能性のある水素濃度13vol%（ドライ濃度換算）に達することはないことを確認している【乙イ

B56-2 (196 頁)】。

(3) さらに被告九州電力は、不確かさの影響評価として、上記「①水一炉心内の金属反応（全炉心内のジルコニウム量の 75%の反応割合）」、「②水の放射線分解」及び「③原子炉格納容器内の金属腐食」に加え、「④溶融炉心・コンクリート相互作用（MCC I）」に伴う水素の発生（解析の結果より全炉心内のジルコニウム量の約 6%の反応割合）も合わせて評価を行い、原子炉格納容器内の水素濃度は、静的触媒式水素再結合装置（PAR）及び電気式水素燃焼装置（イグナイタ）が作動することにより、最大約 9.5vol%（ドライ濃度換算）に留まり、水素爆発（爆轟）が発生する可能性のある水素濃度 13vol%（ドライ濃度換算）に達することはないことを確認している【乙イ B56-2 (197 頁)，乙イ B57 (48 頁)】。

5 小括

以上のとおり、本件原子力発電所においては、万一炉心が著しく損傷した場合を想定しても、水素爆発は発生しない。

第 4 本件原子力発電所における水蒸気爆発の発生可能性

1 水蒸気爆発の概要

水蒸気爆発とは、水と大きな温度差のある物質とが接触した際に高温側の物質から低温側の水へ極短時間で伝熱が行われ、水が急激に蒸発する物理変化現象である。

通常は水と大きな温度差のある物質とが接触しても、水による冷却が進み、そのままの状態で落ち着くため、水蒸気爆発は発生しない（下記（1））。

しかし、一部のケースにおいては水蒸気爆発が発生したものもあり、多数の研究の結果から、水蒸気爆発の発生プロセス（挙動）は下記（2）のとおり説明されている。

(1) 通常のケース

高温の溶融物が冷却水に落下すると、冷却水との摩擦により溶融物表面が一部剥離して粒子状（細粒化）となり、蒸気膜に覆われ、安定した状態（膜沸騰状態）になる（①）。

この安定化した状態のまま、細粒化した溶融物は冷却されつつ水中を降下した後、残りの溶融物とともに床面に堆積し、溶融物は冷え固まり、水蒸気爆発に至ることはない（①'）。（図 7）

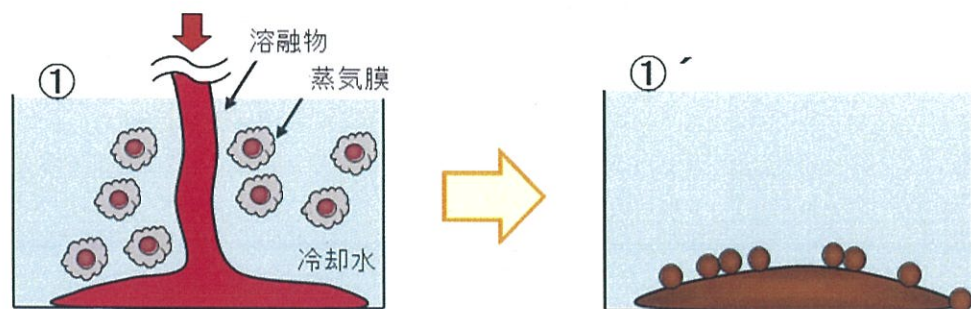


図 7 水蒸気爆発のプロセス（通常の場合）

(2) 水蒸気爆発が発生するケース

上記溶融物が細粒化した状態（①）で、何らかの強い要因、すなわち爆発などの外部トリガーが加わると、蒸気膜が崩壊し、冷却水と溶融物とが直接接触する（②）。

冷却水と溶融物との直接接触に伴い、溶融物の熱が急激に冷却水に伝熱され、冷却水が急激に蒸発することによって発生した衝撃により、近傍の蒸気膜が崩壊し（③）、この現象が瞬時に全体に拡大・伝播する（④）。この状態が水蒸気爆発である。（図 8）

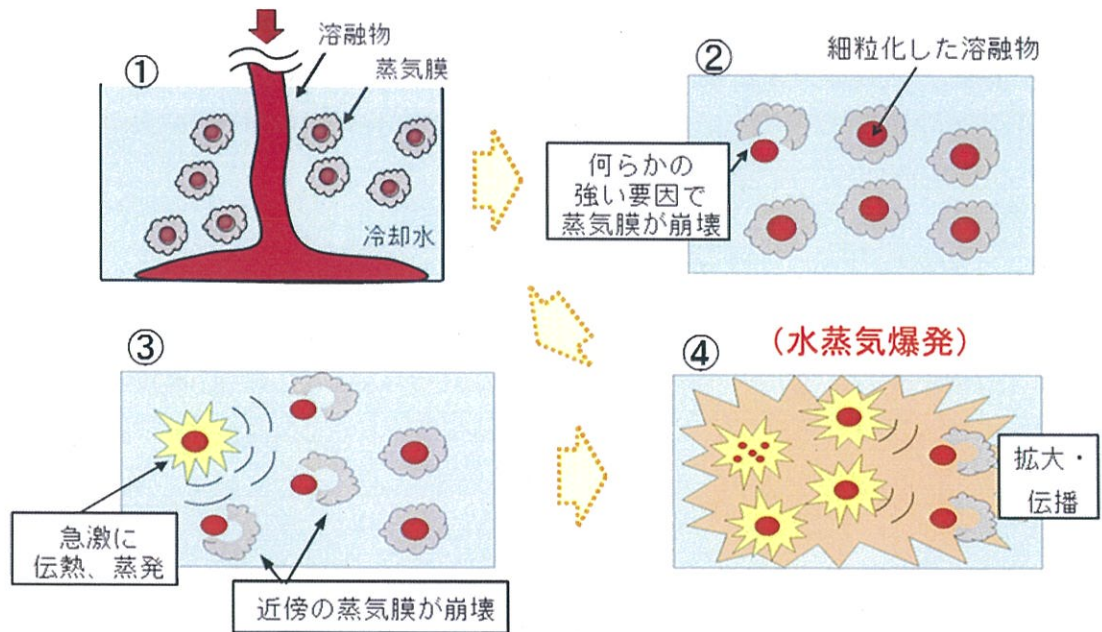


図8 水蒸気爆発のプロセス（水蒸気爆発が発生するケース）

上記のプロセスから分かるように、水蒸気爆発は、蒸気膜を崩壊させるような強い要因，すなわち爆発などの外部トリガーがあって初めて生じる現象である。

2 水蒸気爆発の評価（水蒸気爆発の可能性の評価）

被告九州電力は，準備書面 18，23 で述べたとおり，万一炉心が著しく損傷した場合においても，これまでに実施された各種実験の結果等を踏まえると水蒸気爆発に至る可能性は小さいと評価している【乙イ B56-4(193, 194 頁)，乙イ B57 (39～42 頁)，乙イ B58-2 (添 3.3.1-1，添 3.3.1-3，添 3.3.1-6 頁)】。以下にその内容を改めて述べる。

(1) 水蒸気爆発に係る評価の必要性

前述（10～11 頁）したとおり，本件原子力発電所においては，万一炉心が著しく損傷した場合，溶融炉心を受け止め，冷却するため，溶融炉心が落下するまでに原子炉下部キャビティへ十分な量の水張を行うこととしていることから，その際の水蒸気爆発の可能性を評価している（図 9）。

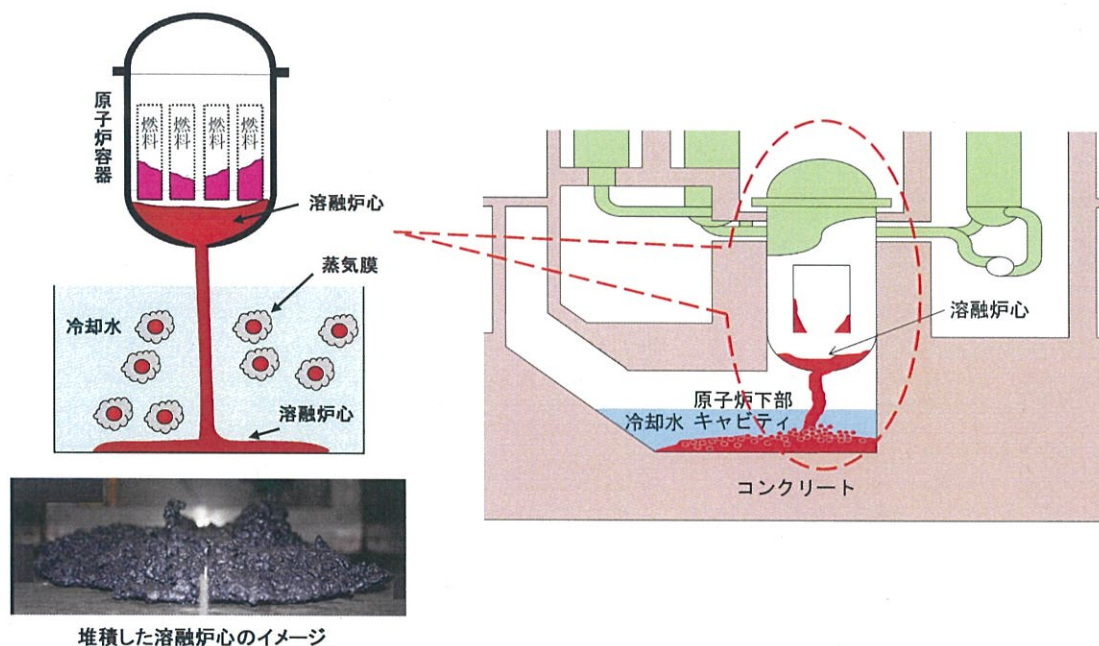


図9 原子炉下部キャビティにおける溶融炉心の冷却

(2) 水蒸気爆発の評価

評価にあたっての判断基準は、「急速な原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による熱的・機械的荷重によって原子炉格納容器バウンダリの機能⁸が喪失しないこと」とされている【乙イ A62 (76 頁)】。

原子力発電所における水蒸気爆発に関しては、国内外の国家機関等において、現象の解明や評価に関する多くの研究が行われてきている。原子炉の燃料と同じ二酸化ウランを含む模擬溶融物を水に落下させた実験として、これまでにFARO, KROTOS, COTELS及びTROIが行われており、延べ61回に及ぶ溶融物の水への落下実験が実施されている。

これらの実験は、表1のとおり、いずれも権威があり信頼性のある機関で実施されたものであり、被告九州電力は、本件原子力発電所の水蒸気爆発の可能性について、こうした信頼性のある実験の結果に基づき評価した。

⁸ 原子炉格納容器バウンダリの機能：格納容器に放射性物質を閉じ込める機能

表 1 水蒸気爆発に関する各種実験及び実施機関

実験	実施機関
F A R O K R O T O S	欧州委員会共同研究センター (J R C)
C O T E L S	(財)原子力発電技術機構 (N U P E C)
T R O I	韓国原子力研究所 (K A E R I)

欧州共同体の政策執行機関である欧州委員会の直
属科学組織であり、欧州委員会の政策の策定と実
施において、原子力を含む技術的な支援を行いま
す。本実験は傘下のイッラ研究所(イリ7)で行われ
ました。

原子力技術の進歩・発展を図ることを目的に産・
官・学の支援を受けて設立され、原子力発電所や
その機器の安全性に関する試験研究が実施されま
した。本実験は、ガッファス国立原子力センターの施設
を用いて行われました。

韓国の国家原子力総合機関であり、同国の原子力
の各分野の研究開発を主導しています。

上記の落下実験のうち、主に溶融物と水との反応挙動や水蒸気爆発の発
生を確認する目的で実施された F A R O 及び C O T E L S の実験では水蒸
気爆発は生じていない。

一方、K R O T O S 及び T R O I の実験は、上記の他に水蒸気爆発のメ
カニズムの解明や解析コードにおける再現性の検証を主な目的として実施
され、あえて圧縮ガスの供給や火薬による爆発といった外部トリガーを与
えたり、溶融物の過熱度⁹を実機解析結果よりも高くしたりするなど、水蒸
気爆発の生じやすい条件を付加した実験も行っている。

具体的には、K R O T O S の実験においては、実験装置底部に約 150 気
圧の圧縮ガスを放出させ【乙イ B58-3 (添 3.3.1-4 頁)】、T R O I の実験にお
いては火薬 (P E T N¹⁰ : 1 g) によって、実測値で 9MPa (約 90 気圧)

⁹ 溶融物の温度(融点よりも高い温度)と溶融物の融点(固体が液体に変化するときの温度)
との差であり、どの程度融点を超えているのかを示す数値。溶融物の過熱度が高いほど、
溶融物が固化するまでのエネルギーが大きく、水に落下した後に溶融物の表面が冷却されて
固化するまでの時間が長くなり、水蒸気爆発のメカニズムの起点である細粒化が進むため、
それだけ水蒸気爆発が発生しやすくなる。

¹⁰ PETN : ペンスリットと呼ばれる高性能の爆薬、一般的な爆薬である TNT (トリニトロ
トルエン) に比べ爆発威力が大きく、熱に対し鈍感、自然分解を起こしにくい等の特徴が
ある。

程度の圧力、つまり外部トリガーを与えている【乙イ A121 (380, 384 頁)】。

これらの水蒸気爆発が生じやすい条件を付加した実験の結果、K R O T O S の実験において 3 回、T R O I の実験において 15 回水蒸気爆発がそれぞれ発生している。

K R O T O S の実験において水蒸気爆発が発生したケースは、実機では原子炉下部キャビティに自ら圧縮ガスを発生させるような設備は存在しないところ、あえて水蒸気爆発が発生しやすい環境とするために、外部トリガーを与え（容器の底から圧縮ガスを供給）、膜沸騰状態を強制的に不安定化させるという条件を付加した結果、水蒸気爆発が発生したものである。

また、T R O I の実験においては、外部トリガー（火薬による爆発）の有無、熔融物の過熱度といった条件の組み合わせによる様々なケースがある中、水蒸気爆発が発生したケースは、外部トリガーを与えた条件で 7 回、外部トリガーを与えず熔融物の過熱度を実機想定よりも高くした条件（約 100～900K 高い状況）で 4 回（T R O I 実験 I D 10, 12, 13, 14）、両方の条件を付加した場合で 4 回、水蒸気爆発がそれぞれ発生しているが、いずれも実機で生じるとは考えられない条件を付加した結果である（表 2）。

表 2 実機で想定される模擬溶融物を用いた水蒸気爆発に関する実験結果¹¹

実験 ID	溶融物タイプ	UO ₂ 質量割合	溶融物 質量 kg	溶融物 温度 K	溶融物 過熱度 K	外部トリガーの有無	水蒸気爆発発生の有無
9	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	4.3	3200	389	—	—
10	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	8.7	3800	989	—	○
11	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.69	9.185	3800	989	—	—
12	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	8.4	3800	989	—	○
13	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.69	7.735	3500 (注 1)	689	—	○
14	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.69	6.545	3200 ~4000 (注 2)	389 ~1189	—	○
21	80%UO ₂ +20%ZrO ₂	0.8	7.32	3000	167	—	—
22	80%UO ₂ +20%ZrO ₂	0.8	9.91	2900	67	—	—
23	80%UO ₂ +20%ZrO ₂	0.8	10.385	3600	767	—	—
25	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	9.005	3500	689	—	—
26	80%UO ₂ +20%ZrO ₂	0.8	12.31	3300	467	—	—
34	70%UO ₂ +29%ZrO ₂ +1%Zr	0.7	10.52	3670	859	○	○
35	70%UO ₂ +29%ZrO ₂ +1%Zr	0.7	19.93	2990	179	○	○
36	70%UO ₂ +29%ZrO ₂ +1%Zr	0.7	5.26	3510	699	○	○
37	80%UO ₂ +19%ZrO ₂ +1%Zr	0.8	8.13	3380	547	○	○
38	79%UO ₂ +20%ZrO ₂ +1%Zr	0.79	5.325	3650	817	—	—
39	79%UO ₂ +20%ZrO ₂ +1%Zr	0.79	3.405	3730	897	○	—
40	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	11.1	3000	189	—	—
43	63%UO ₂ +27%ZrO ₂ +10%Fe	0.63	10.22	2860	—	—	—
44	63%UO ₂ +27%ZrO ₂ +10%Fe	0.63	10.77	2880	—	○	—
46	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	11.734	3590	779	○	○
47	63%UO ₂ +27%ZrO ₂ +10%Fe	0.63	10.736	3030	—	—	—
48	70%UO ₂ +30%ZrO ₂	0.7	13.042	3620	809	—	—
51	62.8%UO ₂ +13.5%ZrO ₂ +12.6%Zr+11.1%SS	0.628	6.309	3420	—	○	○
52	61%UO ₂ +16%ZrO ₂ +12.2%Zr+10.8%SS	0.61	8.604	2650	—	○	—
TS-1	73.4%UO ₂ +26.6%ZrO ₂	0.734	15.4	3000	145	○	○
TS-2	68.0%UO ₂ +32.0%ZrO ₂	0.68	12.5	3063	228	○	○
TS-3	71.0%UO ₂ +29.0%ZrO ₂	0.71	15.9	3107	272	○	○
TS-4	81.0%UO ₂ +19.0%ZrO ₂	0.81	14.3	3011	171	○	○
TS-5	76.0%UO ₂ +18.3%ZrO ₂ +Zr5.0%+0.7%U	0.76	17.9	2940	140	○	—
TS-6	73.3%UO ₂ +18.5%ZrO ₂ +4.9%Fe ₂ O ₃ +3.3%FP	0.733	9.3	2910	239	○	○

(注 1) 参考文献「Fuel Coolant Interaction experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture」によれば温度計測に問題があり、実際には 3,500K 程度以上と推測されている。

(注 2) 参考文献「Fuel Coolant Interaction experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture」によれば 2 つの温度計が異なる最高温度 (4,000K, 3,200K) を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

(乙イ B 58-2 (添 3.3.1-6 頁) を基に作成)

- ¹¹ 「外部トリガーの有無」の欄に○印がある場合は、溶融物が水プールに落下中、人為的な圧力をかけて、強制的に膜沸騰状態の蒸気膜を不安定化させた (トリガーを与えた) 実験であり、「水蒸気爆発発生の有無」の欄に○印がある場合は、水蒸気爆発が発生した実験。

なお、両実験ともに、外部トリガーを与えた場合でも水蒸気爆発に至らなかったケースもあるため、外部トリガーを与えたとしても常に水蒸気爆発が発生するわけではない。

以上のとおり、KROTOS及びTRO Iの実験結果では、二酸化ウランを含む模擬溶融物では、実機で生じるとは考えられない外部トリガーを与えた場合や溶融物の過熱度が実機想定よりも高い場合に、水蒸気爆発が発生している。

本件原子力発電所においては、原子炉下部キャビティに圧縮ガスや爆発を生じさせる設備はなく、KROTOSの実験で付加した約 150 気圧や、TRO Iの実験で付加した約 90 気圧もの高い圧力が、本件原子力発電所の原子炉下部キャビティにかかることは考えられず、外部トリガーとなり得る要素がないこと、本件原子力発電所において想定される溶融物の過熱度は水蒸気爆発が発生した実験における溶融物に比べ低いことから、水蒸気爆発が発生する可能性は小さく、原子炉格納容器バウンダリの機能は喪失しないと評価している。【乙イ B58-2（添 3.3.1-1，添 3.3.1-3，添 3.3.1-6 頁）】

3 小括

以上のとおり、本件原子力発電所においては、万一炉心が著しく損傷した場合を想定しても水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さい。

第5 原告ら主張への反論

1 外部トリガーの発生可能性について

被告九州電力は、準備書面 27 において、これまでに実施された水蒸気爆発に係る各種実験の結果等を踏まえ、実機において水蒸気爆発の生じる危険性は極めて低いことが確認されていることを述べた。

これに対し、原告らは準備書面 70 において、大量の溶融物が少量の水を囲い込んだ際に、外圧が発生して外部トリガーとなり得る旨主張するが、こ

の点、原子力規制委員会は、本件原子力発電所の審査書案に係るパブリックコメントに対する回答において、「大量の溶融物が少量の水を囲い込んだ場合、水蒸気爆発に関与する粗混合状態の溶融物の量が少ないことから、水蒸気爆発が発生したとしても、発生する機械的エネルギーによる影響は無視できると判断しています。」と説明しており、原告らの主張には理由がない。【乙イB57(44頁)】

また、原告らは同書面において、水素爆発を原因とする圧力パルスなど、実際の過酷事故において想定される外部トリガー（外乱）は複数存在するところ、かかる外部トリガーの発生可能性について検討していないと主張する。

しかしながら、上述（8～14頁）したとおり、本件原子力発電所で万一炉心溶融に至った場合においても、原告らの主張する水素爆発に至る危険性はないため、外部トリガー（外乱）となることは考えられず、水蒸気爆発に係る各種実験結果から、本件原子力発電所において、実験で付加したような膜沸騰状態¹²を不安定化させる外部トリガー（外乱）が発生することも考えられない。

したがって、原告らの主張には理由がない。

2 TRO Iの実験における溶融物温度について

- (1) 原告らは、準備書面 70（58～59 頁）において、TRO Iの実験のうち水蒸気爆発が発生した実験 ID14 の溶融物温度に関して、「TRO I 報告書が TRO I 14 における溶融物温度として報告しているのは「3,000K」であり、3,200～4,000K というのは、TRO I 報告書の記載を曲解した誤導である」旨主張する。

この点、準備書面 27（4～10 頁）で述べたとおり、実験 ID14 の溶融物温度は、2002 年 TRO I レポートでは、3,000K との記載もあるが、同レポートの考察において、図 10 を示しつつ、①実験 ID14 では、測定温度の

¹² 膜沸騰状態：液体への熱伝達において伝熱体の伝熱面の全面を沸騰した蒸気が膜となって覆い、その蒸気膜と液体との接触面から直接に沸騰する状態。

比較のため I R C O N 温度計と C H I N O 温度計との 2 種類の高温計が用いられたこと、② C H I N O 温度計での最高温度が 4,000K 近くであった一方で、I R C O N 温度計での最高温度は 3,200K 程度であり、この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分析していることから、被告九州電力は T R O I 実験 I D 14 における溶融物温度を 3,200～4,000K としている【乙イ A 113-1 (5, 8～9 頁), 乙イ A 113-2】。

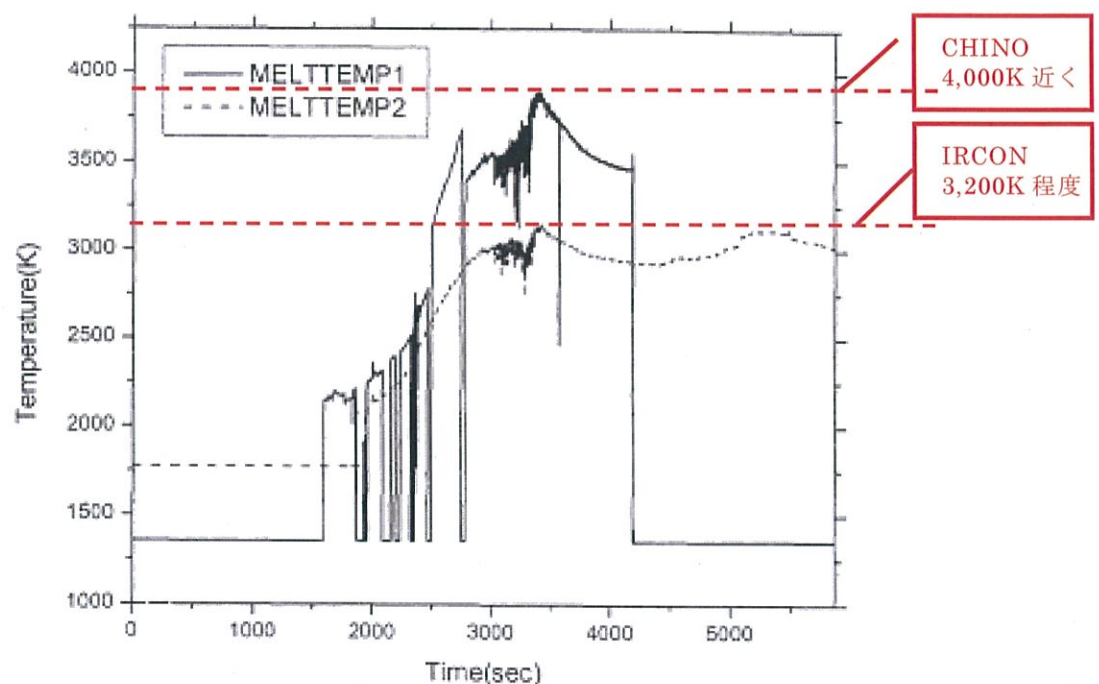


Fig. 8. Melt temperature for TROI-14 by CHINO and IRCON pyrometer.

図 10 CHINO 温度計と I R C O N 温度計による
T R O I - 14 実験の溶融物温度
(乙イ A 113-1 (9 頁) の Fig.8 に一部加筆)

そして、実験 I D 14 における測定温度の不確か性については、2003 年 T R O I レポートにおいても図 1 1 を示しつつ、ほぼ同様の分析がなされている。

すなわち、実験 I D 14 に関しては、① C H I N O 温度計での最高温度が

3,800K程度¹³であった一方で、IRCON温度計での最高温度は3,200K程度であったことから、②この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こと、③溶融物の（試験設備への）供給直前の温度は、高温計の上限値に非常に近い3,773Kであったとしている【乙イA114-1（793～794頁）、乙イA114-2】。

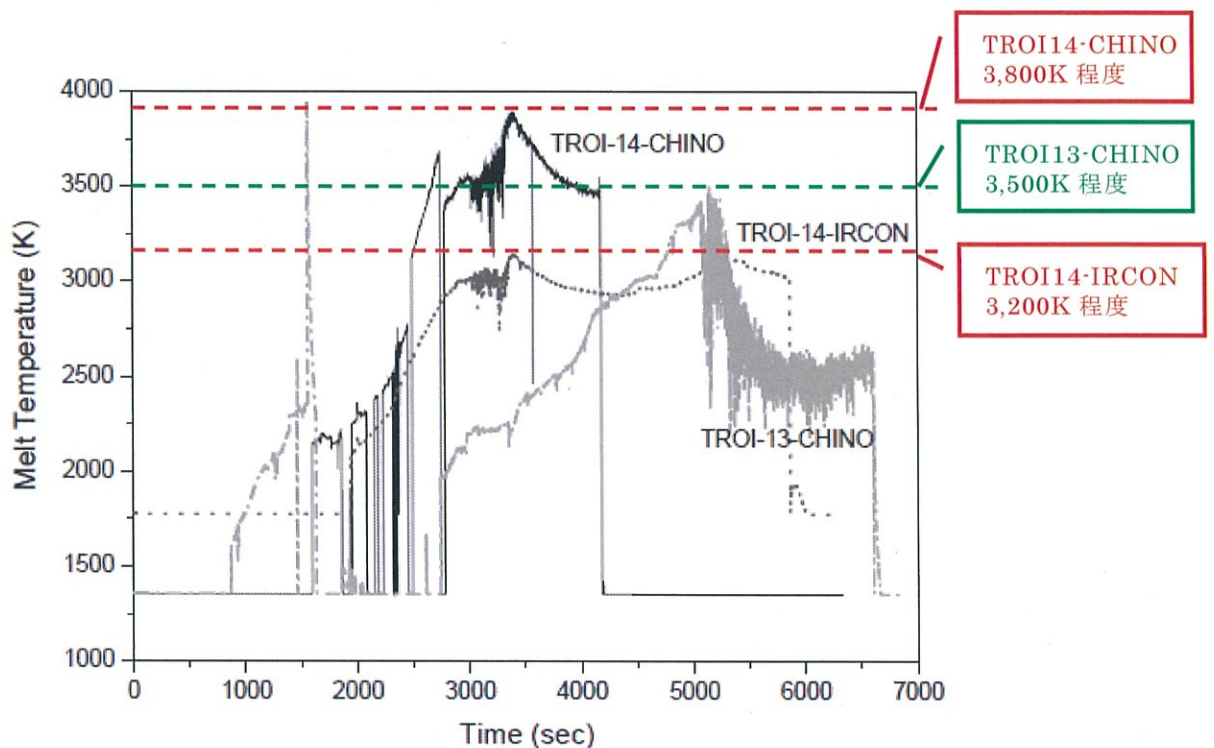


Fig. 17 Melt temperatures for TROI-13 and TROI-14

図 1 1 TROI-13実験と14実験の溶融物温度
(乙イA114-1（794頁）の Fig.17 に一部加筆)

上記の2002年TROIレポート及び2003年TROIレポートの分析は、実際には、実験ID14は温度計測の不確かさが大きいものの、試験設備への供給直前の溶融物温度は3,773K（溶融物の融点を2,811Kとした場合、過熱度は962K）であったことを示唆しており、いずれも溶融物の過熱度が実

¹³ 2002年TROIレポートでは、「4,000K近く」とされているが、同じことを指している。

機想定より高い条件下での実験であることを示している。つまり、TRO I 実験において自発的水蒸気爆発が発生したとされる4ケース（実験ID10, 12, 13, 14）は、いずれも熔融物の過熱度が実機想定より非常に高い条件下での実験であったといえる（表2）。

以上のとおり、2002年TRO I レポートと2003年TRO I レポートとではほぼ同様の分析がなされており、TRO I の実験における実験ID14の熔融物温度として、被告九州電力が示した温度は合理的なものであり、原告らの主張には理由がない。

- (2) また、原告らは、準備書面70において、TRO I レポートにおける実験ID14で、原告らが言うところの「九電の想定する実機での熔融物温度3,111K」を下回る熔融物温度（3,000K）で水蒸気爆発が発生していると主張する。

この点、上述のとおり、そもそも2002年TRO I レポート及び2003年TRO I レポートによれば実験ID14の熔融物温度は3,200K～4,000Kであり、原告らの主張は前提に誤りがある。

また、原告らは融点及び過熱度から熔融物の温度を想定し、熔融物の温度に着目した主張を行うが、水蒸気爆発の発生可能性を評価するにあたって着目すべきは「熔融物温度」ではなく「熔融物の過熱度」であり、「熔融物温度」の高低をもって水蒸気爆発の発生可能性を論じる原告らの主張は不合理である。

すなわち、「熔融物の過熱度」は、「熔融物温度」（融点よりも高い温度）と熔融物の融点（固体が液体に変化する時の温度）との差であるところ、熔融物の過熱度が高いほど熔融物が固化するまでのエネルギーが大きく、水に落下した後に熔融物の表面が冷却されて固化するまでの時間が長くなり、水蒸気爆発のメカニズムの起点である細粒化が進むため、それだけ水蒸気爆発が発生しやすくなる。

被告九州電力は、万一炉心が著しく損傷した場合の本件原子力発電所にお

ける溶融炉心の過熱度について、実機を模擬した解析結果や論文をもとにして評価し、300K程度と想定している。【乙イ B58-2（添 3.3.1-1）】

これに対し、TRO I の実験のうち外部トリガーなしで水蒸気爆発が発生した実験の模擬溶融物の過熱度は、実験 I D 10 及び実験 I D 12 において 989K、実験 I D 13 において 689K、実験 I D 14 において 389～1189K であり【乙イ B58-2（添 3.3.1-6）】、いずれも本件原子力発電所で生じるとは考えられない条件下での実験であったといえる。

以上のとおり、原告らの主張には理由がない。

第 6 結論

以上のとおり、そもそも本件原子力発電所においては安全確保対策により、万一事故等が発生したとしても炉心が著しく損傷することはなく、水素爆発及び水蒸気爆発に至ることはない。

更に、被告九州電力は、万一炉心が著しく損傷した場合を想定し、水素爆発は発生せず、水蒸気爆発の発生の可能性は小さいと評価しており、これらに伴う周辺環境への放射性物質の異常な放出が起こる具体的危険性はない。

なお、これらの対策及び評価については、原子力規制委員会によりその妥当性が確認され、平成 29 年 1 月 18 日、発電用原子炉設置変更許可を受けているところである。

以 上