

平成26年（ネ）第126号 大飯原発3, 4号機運転差止請求控訴事件

一審原告 松田正 外187名

一審被告 関西電力株式会社

控訴審第9準備書面

- 水蒸気爆発及び水素爆発の危険性 -

平成27年9月11日

名古屋高等裁判所金沢支部民事部第1部C1係 御中

一審原告ら訴訟代理人弁護士 佐藤辰弥

同 弁護士 笠原一浩

目次

第1	はじめに.....	4
1	格納容器の機能喪失.....	4
2	福島原発事故で明らかになった水蒸気爆発及び水素爆発の危険性.....	4
3	一審被告の過酷事故対策のシナリオについて.....	5
4	一審被告のシナリオが水蒸気爆発及び水素爆発の危険性・福島原発事故の教訓を無視していること.....	6
第2	水蒸気爆発の危険性について.....	6
1	水蒸気爆発とは何かについて.....	6
(1)	水蒸気爆発とは.....	6
(2)	水蒸気爆発発生のメカニズム.....	7
2	原発過酷事故時に水蒸気爆発が発生した場合について.....	8
3	PWRの審査において過酷事故の際に一審被告が想定する対応とその問題点について.....	9

(1) 過酷事故の際に一審被告が想定する対応（シナリオ）について	9
(2) 一審被告が想定する対応（シナリオ）の問題点について	10
4 高浜原発3・4号機設置変更許可審査書の内容について	11
(1) 申請内容	11
(2) 審査結果	11
(3) 審査過程における主な争点	11
5 審査書が根拠としたJAEA報告書が水蒸気爆発の可能性を否定していないこと	12
(1) JAEA報告書の内容について	12
(2) JAEA報告書の評価について	12
6 水蒸気爆発の実験結果と適合性審査	13
(1) 申請の際にTRO1装置の実験データが無視されていること	13
(2) TRO1の実験の方がKROTOSの実験よりも規模がより大きく、かつ最近実施されていること	14
(3) TRO1の実験結果を評価しない原子力規制委員会の「考え方」について	14
(4) 過酷事故の際には様々な状況が外部トリガー（誘因）になり得ること	14
(5) 一審被告の申請書は水蒸気爆発の引き起こす深刻な事態に対する適切な認識を欠いていること	15
7 原子力規制のあり方について	16
8 小括	17
第3 水素爆発の危険性について	17
1 水素爆発とは	17
(1) 過酷事故時の水素発生要因について	17
(2) 水素の爆発現象について	19

2	PWRで水素爆発が発生した場合の結果について	19
(1)	福島原発事故の場合	19
(2)	PWRでは格納容器が損壊するおそれがあること	20
(3)	放出が予想されるヨウ素とセシウムの量	20
(4)	小括	20
3	格納容器内での水素爆発防止対策	21
(1)	過酷事故時に想定されるシナリオについて	21
(2)	格納容器内での水素爆発防止対策についてエラー! ブックマークが定義 されていません。	
4	水素爆発防止対策の審査ガイド	22
5	水素濃度の解析評価結果について	23
(1)	基本解析について	23
(2)	MCCIの不確かさを顧慮した感度解析について	25
6	結語	27

第1 はじめに

1 格納容器の機能喪失

環境中への放射性物質の放出を防止する最後の防壁は、格納容器である。

したがって、格納容器が機能喪失する危険性がある場合は、具体的危険性が認められる。

格納容器の破壊の要因としてまず挙げられるのは、福島事故で起きた格納容器内部の圧力・温度の比較的ゆっくりした上昇と、極めて急激な爆発現象である。後者の原因の主なものは、水蒸気爆発や水素爆発である。格納容器の機能喪失のシナリオは多数あるが、事故の早期に格納容器が爆発現象に伴って破壊する水蒸気爆発や水素爆発の危険性は確実に避けるべきである。なぜなら、格納容器が破壊してしまうと、放射性物質の拡散を防ぐ方法がなくなり福島事故をはるかに凌ぐ規模の事故になる危険性が認められるからである。

2 福島原発事故で明らかになった水蒸気爆発の危険性及び水素爆発の危険性

水蒸気爆発は、非常に高温の溶融物と水とが接触した時に、極度に急速な蒸発が起こって、爆発的な様相を呈する現象であり、過酷事故が発生した場合、溶融炉心が落下して水と接触し、水蒸気爆発が起きる可能性がある。福島原発事故では、過酷事故が発生し、溶融炉心が落下するという、まさに水蒸気爆発の発生が懸念される事態が生じた。幸いにして福島事故では構造上、溶融炉心が水プールに落下することがなかったため、大規模な水蒸気爆発は起きなかった。しかし、事故のシナリオによっては、格納容器床に水が溜まっているか、あるいは落下した溶融炉心に水がかかり、水蒸気爆発が起きる可能性もあった。炉心溶融後は、冷却のため溶融炉心と水との接触の可能性があるため、常に水蒸気爆発の危険性は避けられないものである。福島事故は改めて炉心溶融後の水蒸気爆発の危険性を思い起こさせる事故であった。

また、福島原発事故において、水素爆発によっていくつかの原子炉建屋が破壊されたことに伴い、大量の放射性物質が広範囲にまき散らされたことは、我

々の記憶に新しい。本件原発は、加圧水型炉（PWR）であり、沸騰水型（BWR）の福島第一原発と型式は異なるが、過酷事故時に原子炉内及び原子炉外で大量の水素が発生する危険性がある点においては全く同じである。BWR では、事故時に格納容器内での水素爆発を防ぐ対策として、通常運転中の格納容器内の雰囲気（空気）を空気に替えて窒素を封入して酸欠状態にしているため、水素爆発が生じるおそれのある場所は、格納容器内ではなく、水素が格納容器のフランジの貫通部や電気配線貫通部から流出してくる空気雰囲気の原子炉建屋内になる。一方、PWR では、通常運転中の格納容器内は空気なので、水素爆発が格納容器内で生じるおそれがあり、大規模な水素爆発の場合、格納容器が損壊してしまう。この場合、福島原発事故の原子炉建屋内での水素爆発とは比較にならないほど大量の放射性物質が大気中に放出されることになる。

3 一審被告の過酷事故対策のシナリオについて

現在、原子力規制委員会において、原発の再稼働に向けて新規規制基準での適合性審査が進められており、設置変更許可申請書が合格とされたのは九州電力の川内原発1・2号機、四国電力の伊方原発3号機の他に、一審被告の高浜原発3・4号機であり、一審被告の本件原発については、現在審査中である。

上記各原発は、いずれもPWRであるが、PWRにおいて、多重故障により原子炉の冷却機能が喪失し炉心溶融が懸念される事態になった時、炉心への注水はあきらめ、重大事故対策用の格納容器スプレイで格納容器内に水を散布して格納容器を冷却する手順が示されている。冷却に失敗して炉心溶融が発生すると、最短では事故発生から1時間半程度で原子炉圧力容器が溶融貫通する。その間に、格納容器スプレイ水が周囲の流路から格納容器下部キャビティに流入して深さ約1.3mのプールを作り、原子炉圧力容器底部を貫通して格納容器底部に落下する溶融核燃料をそのプール内で冷却するというのが、一審被告を含む上記各電力会社の設置変更許可申請書における過酷事故対策のシナリオである。（詳細は後述）

4 一審被告のシナリオが水蒸気爆発及び水素爆発の危険性・福島原発事故の教訓を無視していること

しかしながら、そのようなシナリオでは、本件原発のいずれの原子炉においても、過酷事故の際には、水蒸気爆発及び水素爆発が発生する危険性が高く、過酷事故対策としてはいわば自殺行為に等しい。

上記のとおり、福島原発事故によって水蒸気爆発及び水素爆発の危険性が明らかになり、それらの教訓を得たはずであるのに、一審被告は、過酷事故対策としてそれらの教訓を無視するかのごときシナリオを描いて、原発再稼働に向けて動き出している。

また、以下に述べるように、一審被告の描くシナリオでは、過酷事故の際に、水蒸気爆発及び水素爆発が発生して、より大規模な事故に発展する危険性が高いことが科学的にも指摘されている。にもかかわらず、再稼働に向けて、一審被告は、このような指摘を無視した内容の設置変更許可申請を行い、原子力規制委員会がその申請を許可している。それでは、福島原発事故の際の教訓を生かすことができず、福島原発事故と同様な、あるいはそれ以上の原発事故を再び引き起こす事態にもなりかねない。

以下、過酷事故の際に水蒸気爆発の危険性を指摘した「原子炉格納容器内の水蒸気爆発の危険性」（甲198）及び水素爆発の危険性を指摘した2015年9月7付「大飯原発3・4号機運転差止控訴審意見書」（甲199）の内容に沿って、それら水蒸気爆発及び水素爆発の危険性について説明を行う。

第2 水蒸気爆発の危険性について

1 水蒸気爆発とは何かについて

(1) 水蒸気爆発とは

水蒸気爆発は、燃焼のような化学反応ではなく、高温溶融物と接した液体の水が瞬時に蒸発する物理現象である。

この現象は、例えば、金属工場で水溜まりに溶融金属を落とすと爆発する非常に危険な現象として昔から恐れられている。また、火山のマグマが地下水と接触すると大規模なマグマ水蒸気爆発を起こすことも知られている。

液体の水が大気圧下で蒸発すると、その体積は理論上1600倍にもなり、その体積の急膨張が水蒸気爆発である。

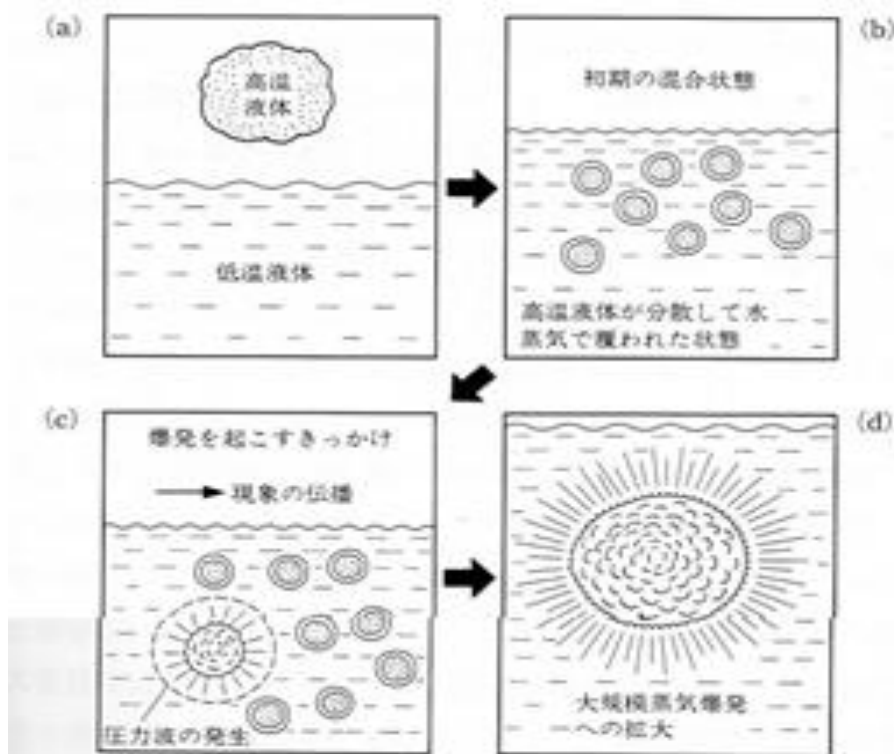
ただし、実験を繰り返してみると、条件によって発生したり発生しなかったりする複雑な現象であることも分かっている（以上甲198・0897～0898頁目「水蒸気爆発とは何か」）。

(2) 水蒸気爆発発生メカニズム

水蒸気爆発は、温度の異なる2種類の液体が接触したときに瞬時に起きる現象であるが、溶融した金属などの高温液体が水（低温液体）接触した場合、高速度写真による観察などから、以下の4つのステージを経て発生することが明らかになっている。

すなわち、まず、高温液体が低温液体に接触すると、最初に水中で高温液体が分散して蒸気の膜（膜沸騰）で覆われる初期の混合状態（粗混合状態）が生じる（b）。次に、膜沸騰を破壊する要因（トリガー）が存在すると、これにより膜沸騰が破壊されて、液-液直接接触が生じる（c）。さらに、膜沸騰を破壊する現象が周囲の分散した溶融液の固まりにも伝播する（c）。そして、高温の溶融液の固まりが水中で微粒子化して大規模蒸気爆発へと拡大する（d）。

「水蒸気爆発のメカニズム」（甲198・0898頁）



2 原発過酷事故時に水蒸気爆発が発生した場合について

福島原発事故のときには、事故後十数時間経過したときに「管理放出（格納容器ベント）」が行われ、事故後28時間程度経過したときに「過圧破損による後期大規模放出」が起きて、大量の放射性物質が格納容器外に放出された。これらと比較すると、原発過酷事故時に水蒸気爆発が発生した場合（水蒸気爆発による早期大規模放出）には、格納容器が同時に破壊されて、キセノン、セシウムの他にストロンチウムなども含んだ大半の放射性物質が数時間以内に格納容器の外に放出されてしまう、極めて厳しい事故となる。事故後数時間で大量に放射性物質を放出してしまうこのような格納容器の壊れ方を「格納容器早期破壊」といい、その代表的な原因が水蒸気爆発である。

チェルノブイリ原発事故では、水蒸気爆発が発生した可能性もあり、事故の後期では溶融炉心がプラントの下部にある水プールに落下してさらなる大規

模な水蒸気爆発が発生する可能性も懸念された。

福島原発事故を起こした東京電力の福島第一原発は、BWRのマークⅠ型格納容器で原子炉圧力容器の直下には大量の水がなかったために、大規模な水蒸気爆発が起こらなかった。もし、日本原電東海第二原発のようなマークⅡ型格納容器であれば、溶融物は原子炉圧力容器の真下にあるコンクリート中間スラブ上にたまり、そこで冷却水と接触して水蒸気爆発を起こすか、溶融して中間スラブの厚さ数十cmの底を溶融貫通して直下の圧力抑制プールに落下して、大規模な水蒸気爆発を起こす危険性が高かった（以上甲198・0898～0899頁目「原発過酷事故時の水蒸気爆発：格納容器破壊の脅威」）。

3 PWRの審査において過酷事故の際に一審被告が想定する対応とその問題点について

(1) 過酷事故の際に一審被告が想定する対応（シナリオ）について

大飯3・4号機，高浜3・4号機のようなPWRの審査における過酷事故のシナリオの典型例は，「大破断冷却-材喪失事故」（LOCA:Loss of coolant Accident）＋全電源喪失（緊急炉心冷却系（ECCS:Emergency Core Cooling System）失敗＋格納容器スプレイ失敗）である。

このような過酷事故に対して一審被告は，以下のような対応（シナリオ）を想定している。

① 過酷事故から約20分前後経過すると炉心溶融となり，約1.5時間経過すると原子炉圧力容器が破損する。

この事故のシナリオでは，炉心溶融・原子炉圧力容器破損は必然であり，溶融炉心は一気に原子炉圧力容器の中から格納容器へと出てくる（甲198・0900頁・図5参照）。

② 溶融炉心が原子炉圧力容器から落下あるいは噴出する状況は，様々な偶然に支配されるために，断定的に既述できない。

③ 過酷事故対策として追加した冷却設備は容量が小さいために，原子炉

圧力容器内部への注水は断念して、メルトダウン(炉心溶融)は放置する。代わりに、格納容器の上部から格納容器スプレーで冷却水を散布して、格納容器の破損を防ぐと同時に、その冷却水をいくつかの流路から原子炉圧力容器直下にある原子炉キャビティに導き、水深約1.3m程度の水プールを作る。

④ こうして原子炉圧力容器を貫通した溶融炉心が原子炉キャビティの水プールへと流れ落ちて冷却され、溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI: Molten Core Concrete Interaction, あるいは「コア・コンクリート反応」とも呼ばれる。その意味については、本準備書面「第3」第「1」項「(1)水素の発生」「イ」の箇所で後述する。以下「MCCI」という。)を防ぎ、安定的に溶融炉心の冷却を行う(甲198・0900頁・図5参照)。なお、この過程で危惧される水蒸気爆発は、過去の研究結果から起こりにくいと述べている。

そして、これら一審被告が想定する対応(シナリオ)を原子力規制委員会も無条件で追認している。

(2) 一審被告が想定する対応(シナリオ)の問題点について

しかし、これらの過酷事故時に一審被告が想定する対応(シナリオ)には、いくつかの重大な過誤があり、多くの人たちがパブリックコメントなどで厳しい指摘をしている。その問題点を要約すると、以下の2点になる。

すなわち、まず1点目、事故の状況によっては、配管破損に伴い飛散、落下した配管保温材が流路を閉塞するなどして、計画したとおりに原子炉キャビティに水を張ることができない可能性がある。水を張ることができない場合には、水蒸気爆発は起きないとしても、溶融炉心がコンクリートに接触するMCCIによって、大量の一酸化炭素や水素が発生して事故収束を困難にし、さらには水素爆発の危険性も高まる。

次に2点目、逆に原子炉キャビティへの水張りが成功した場合には、水プールに溶融炉心が落下して、大規模な水蒸気爆発を起こす可能性がある(以

上甲198・0899～0900頁「加圧水型原子炉格納容器と水蒸気爆発」）。

4 高浜原発3・4号機設置変更許可審査書の内容について

ここで、本件原発についても同様の審査がなされ则认为られる、高浜原発3・4号機の設置変更許可審査書（以下単に「審査書」という。）の内容を検討する。審査書には「原子炉压力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」の箇所で、過酷事故時に原子炉压力容器外で溶融燃料と水などの冷却材とが接触した場合の相互作用（「溶融炉心・冷却材相互作用」FCI: Fuel Coolant Interaction, 以下「FCI」という。）について、以下の内容の記述がある。

(1) 申請内容

原子力压力容器外のFCIには、衝撃を伴う水蒸気爆発と、溶融炉心から冷却材への伝熱による水蒸気発生に伴う急激な圧力上昇（以下「圧力スパイク」という。）があるが、水蒸気爆発の発生の可能性が極めて低いため、圧力スパイクについて考慮する（審査書199頁）。

(2) 審査結果

原子力規制委員会は、上述のように一審被告が水蒸気爆発の可能性が低いとしていることを妥当と判断した（審査書202頁）。

(3) 審査過程における主な争点

原子力規制委員会の指示により、一審被告は、論文「JAEA－Reserch 2007-072」（以下「JAEA 報告書」という。）を調査した。その上で、一審被告は、実機（実際の事故の際の機序を指す。）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 及び KROTOS を挙げ、このうち KROTOS の一部実験においてのみ水蒸気爆発が発生していることを示した。それと共に、一審被告は、この水蒸気爆発が発生した実験では、外乱を与えて、液－液直接接触が生じやすくして水蒸気爆発を誘発しているが、実機では、液－液直接接触が生じ

るような外乱となり得るような要素が考えにくく、これらの（水蒸気爆発が発生した実験での）想定評価が実機と異なることを示した。

この一審被告の摘示を受けて、原子力規制委員会も、原子炉圧力容器外の FCI で生じる事象として、水蒸気爆発を除外して、圧力スパイクを考慮すべきことを確認し、申請内容を追認した（甲 198・0900～0901 頁目「審査書の記述」）。

5 審査書が根拠とした JAEA 報告書が水蒸気爆発の可能性を否定していないこと

しかしながら、審査書が根拠とした JAEA 報告書は、以下のように、過酷事故の際に原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生する可能性を否定していない。

(1) JAEA 報告書の内容について

JAEA 報告書には、概ね以下の内容が記載されている。

「原子炉内水蒸気爆発は発生しにくいですが、炉容器外での溶融炉心が・・・大量の水と接触する可能性があります」（原子炉圧力容器外での）「強い水蒸気爆発の可能性を除外できない。」，「また、炉容器外水蒸気爆発による格納容器破損のシナリオは、炉容器内の場合に比較して炉型に強く依存するため、一般的な結論を導き難く、個別評価の必要性が高い」（JAEA 報告書 1 頁）。

「検証に用いた実験の規模に対し、実機現象は融体質量で約 100 倍の外挿となっていることから、規模の拡大による予期しない影響が存在する可能性は否定できない。」（同報告書 43 頁）。

(2) JAEA 報告書の評価について

以上のように、JAEA 報告書は、過酷事故の際に原子炉圧力容器外において強い水蒸気爆発が発生する可能性を一切否定していない。

のみならず、実験では 2 kg から約 180 kg の溶融物で実施されている

が、実機では少なくとも数百 kg ないし百トン程度までの溶融物が生じる可能性を考える必要がある。ここで、重要な事実は、実験において、水蒸気爆発は落下する溶融物の量が多いほど発生しやすいとされていることである。そうすると、他の条件が同じ場合、規模の小さい実験の場合よりも、溶融物の量がより多い実機の場合の方が水蒸気爆発を起こしやすいことになる。

さらに、JAEA 報告書は、実機の場合には、プールの底に滞留した溶融物が巻き上げられて爆発に関与する可能性や、爆発が複数回発生する可能性があるとも述べている。

したがって、JAEA 報告書は、過酷事故の際に原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生する可能性を肯定こそすれ、否定など一切していないことは明らかである。

なお、水蒸気爆発は、似たような条件でも発生したり、しななかったりする確率現象である。水蒸気爆発を確実に防ぐには、溶融物と水などの冷却材を接触させないという、極めて当たり前の結論以外はない（以上甲 198・0901～0902 頁「JAEA 報告書の適用範囲」）。

6 水蒸気爆発の実験結果と適合性審査

(1) 申請の際に TROI 装置の実験データが無視されていること

高温の溶融物を水プールに落下させて、水蒸気爆発の発生を調査するための実験装置としては、日本の旧原子力発電技術機構の COTELS 計画、イタリアのイスパラ研究所の FARO 及び KROTOS 装置、韓国原子力研究所の TROI 装置などがある。

一審被告は、新規制基準のもとで原子力規制委員会に対する設置変更許可申請に際して、これら各実験装置による実験データのうち、COTELS 計画、FARO 及び KROTOS 装置のものを挙げているが、なぜか TROI 装置の実験データには言及していない。TROI 装置による実験では、6回のうち4回は激しい水蒸気爆発が発生しており、しかもどちらも膜沸騰の蒸気膜を破壊す

る外部トリガー（要因）なしの自発的な水蒸気爆発の発生が確認されている。

(2) TROI の実験の方が KROTOS の実験よりも規模がより大きく、かつ最近実施されていること

原子力規制委員会による審査の過程で一審被告が大規模実験としてあげた実験の規模は、COTELS の実験装置では約 60 kg、KROTOS では約 3 kg の試料を使用している。他方で、申請で無視された TROI 装置では 10 ～ 20 kg の試料が使用されており、KROTOS の実験よりも規模が大きい。実験規模の大きさから言って、KROTOS よりも TROI 装置の方がより実機に近い。しかも、TROI による実験は、KROTOS の実験よりも最近に行われている。実験の規模からいっても実施された時期からいっても、TROI の実験結果を評価しない理由は理解できない。

(3) TROI の実験結果を評価しない原子力規制委員会の「考え方」について

原子力規制委員会は、TROI 装置による実験結果を評価しない理由について、「TROI 装置による実験のうち、自発的な水蒸気爆発が生じた実験においては、熔融物に対して融点を大きく上回る加熱を実施するなどの条件で実施しており、この条件は実機の条件とは異なっています。・・・OECD SERENA 計画では、TROI 装置を用いて熔融物の温度を現実的な条件とした実験も行われ、その結果、本実験においては自発的な水蒸気爆発は生じないことを確認しています」という「考え方」を示している。

(4) 過酷事故の際には様々な状況が外部トリガー（誘因）になり得ること

他方、OECD SERENA 計画の結果を記した資料によると、TROI 装置、KROTOS 装置を使用した実験では、12回実施したうち8回の実験で水蒸気爆発の発生が確認されている。しかも、これらの実験のうち、TROI 装置の実験番号 TS-6 と KROTOS 装置の実験番号 KS-4 では、熔融物が現実的な温度と思われる 2910K（TROI 装置）と 2958K（KROTOS 装置）でそれぞれ水蒸気爆発が発生している。また、OECD SERENA 計画に先立って

行われた、二酸化ウラン・ジルコニア・ジルコニウム混合物を用いた TROI 実験の TROI-13 では、2600K という実機条件の温度で自発的水蒸気爆発の発生が報告されている (J.H.Song et al., Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.40, No.10 p.784)。

確かに、OECD SERENA 計画で実施された実験では、外部トリガー (誘因) を加えて実施されたと思われ、その意味では原子力規制委員会の言うように「自発的な水蒸気爆発」ではない。

一般に、熔融温度の低い錫や鉛を除いて、熔融銑鉄やアルミニウム、マグマなどを水プールに投入する実験室規模での実験では、自発的な水蒸気爆発が発生することはほとんど報告されていない。高速の水流を吹き付けるとか、外部圧力パルスを加えるなどの外部トリガーなしに水蒸気爆発を実験的に再現することは困難である。

しかしながら、過酷事故の際に、100 t に及ぶ熔融物が水プールに落下した場合には、①少量の水を熔融物と水プール底部や壁との間に囲い込んだり、②水を含む固形物を囲い込んだりする可能性がある。これらの場合には、囲い込まれた水が急蒸発して、水蒸気泡が急膨張することで、水蒸気爆発のトリガーとなる可能性がある。また、外部から流入する水流の発生や、水温の急変 (水温低下) や水素爆発による圧力パルスなどもトリガーになりうる。

(5) 一審被告の申請書は水蒸気爆発の引き起こす深刻な事態に対する適切な認識を欠いていること

原子力規制委員会が「考え方」で示したように、「実験では (外部トリガーなしの) 自発的な水蒸気爆発が起こっていないから、過酷事故時の水蒸気爆発発生可能性を考慮する必要がない」というのであれば、火山におけるマグマ水蒸気爆発も、金属工場での鉄やアルミニウムなどによる水蒸気爆発事故も起こらないことになってしまう。ところが、過去にはこれら水蒸気爆発事故は現実に発生している。実際に 2015 年 9 月 1 日北九州市のアルミメッ

キ加工会社でアルミニウムの溶解作業中に漏出したアルミニウムと、付近にたまっていた水が接触し、水蒸気爆発が起きたとみられる。これを受けて、北九州消防局は溶解炉のある市内の全 23 事業所（計 95 施設）へ一斉指導を始め、溶解炉周辺に水気や可燃物がないかを点検しているという（2015 年 9 月 8 日付 西日本新聞朝刊）。また、実機溶融物による実験では、溶融物の温度が高い場合は高い確率で自発的な水蒸気爆発が認められ、実機条件（実機の状況や条件）とされる温度条件でも確認されている（TROI-13）。

過酷事故の際には、既に述べたように、様々な状況が外部トリガーになりうる以上、水蒸気爆発が発生する蓋然性が高いと言わざるを得ない。にもかかわらず、水蒸気爆発発生の可能性を一切考慮せず、その対策をしない一審被告の申請書や、この申請書を適切とした原子力規制委員会の審査書は、水蒸気爆発の引き起こす深刻な事態に対する適切な認識を欠いている（以上、甲 198・0902～0904 頁「核燃料物質を使用した水蒸気爆発実験結果と適合性審査」）。

7 原子力規制のあり方について

一審被告の申請書では、過酷事故時に「水蒸気爆発の可能性は極めて低い」としてその対策を一切していない。また、原子力規制委員会も、水蒸気爆発が起こらなかった実験結果のみで構成した一審被告の言い分を丸呑みにする形で、審査書を作成している。

しかしながら、本来であれば、一審被告は、実際の事故をできる限り再現した条件での実験を行って、水蒸気爆発が発生した場合にどのような対策を立てるのかを示すべきである。

また、既に述べたように、原子力規制委員会は、単に「水に溶融物を投入して自発的に水蒸気爆発が発生しなければ、水蒸気爆発は起こらない」との考え方を示している。しかしながら、金属工場などでの事故では現実には何らかのトリガーが存在して水蒸気爆発が生じていることから、上述の原子力規制委員会

の考え方が危険であることは明白である。

取り返しのつかない不可逆な事態を避けるためには、不確実なことがらについてはより厳しい仮定に立って判断し、論理的に発生が否定できない場合には、発生するものとして考えて、これを確実に遮断するための対策を要求すべきである。一部の都合の良い知見に頼って安易に規制基準に適合していると結論することは、結果として、（原発に対する従来の）安全神話の再構築につながる（甲198・0904～0905頁「原子力規制のあり方はこれでいいか」）。

8 小括

水蒸気爆発は、熔融物に水をかけても発生するが、水プールに熔融物を落とす方がはるかに発生しやすい。ところが、一審被告を含む PWR を保有する各電力会社は、過酷事故対策として、科学的研究成果を恣意的に解釈し、水蒸気爆発は起こりにくいと断定し、熔融燃料を水プールに落下させて冷却する方法を採用している。これは、水蒸気爆発を発生させる可能性が高く、格納容器の破壊、さらには放射性物質の大量放出という大事故を引き起こしかねず、自殺行為と断ぜざるを得ない（甲198・0905頁「まとめ」）。

第3 水素爆発の危険性について

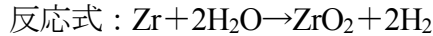
1 水素爆発とは

(1) 過酷事故時の水素発生要因について

原子炉の冷却機能喪失状態が続くと、炉心燃料の温度が上昇して、燃料が熔融する。このような過酷事故の際に、水素が発生する要因として、以下の4つが挙げられる。

ア ジルコニウム－水反応

燃料被覆管材料の主成分であるジルコニウム（Zr）は高温になると水（H₂O）と化学反応して水素を発生させる。



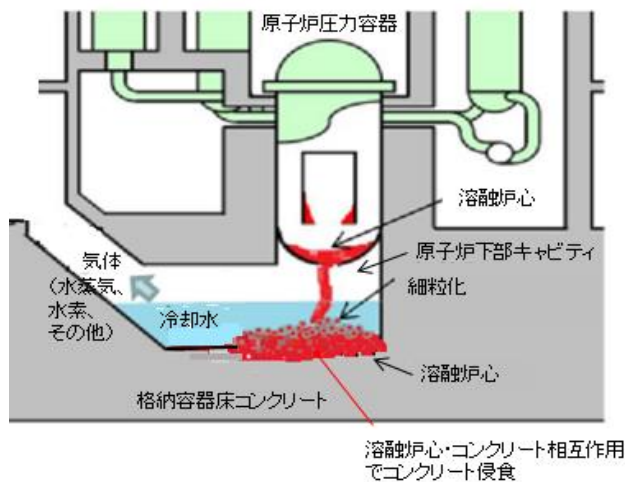
この反応は、ジルコニウムの温度が1200K（絶対温度。摂氏で927℃）程度から顕著になり、1500K（1227℃）以上で急激に進む。

イ 溶融炉心・コンクリート相互作用

溶融炉心が原子力圧力容器の破損箇所から落下して格納容器内の床や壁のコンクリートと接触すると、コンクリートが熱分解により侵食される。これに伴い、水分と炭酸ガスが発生する。これらが溶融炉心に含まれるジルコニウムなどの金属成分と接すると、酸化・還元反応により水素と一酸化炭素が発生する。

なお、この相互作用は、落下する溶融炉心の量、周囲の水量など様々な要因が関係するきわめて複雑な現象であり、国内外を通じての実験研究などの数が限られて、実機規模での現象が十分に把握、解明されるには至っていない。このような実情から、MCCIの進行を定量的に評価するために使用される解析コードもまだ未成熟であり、その解析結果には大きな不確かさ（誤差幅）を伴っている。

溶融炉心・コンクリート相互作用の説明図（甲199・16頁の図2）



ウ 水の放射線分解

放射線エネルギーにより水が分解して水素が発生する。

エ ジルコニウム以外の金属－水反応

構造材に含まれる亜鉛，アルミニウム，鉄などの金属が高温の水や水蒸気と接すると，水素が発生する。

これらア～エのうち，事故発生直後から水素発生量が最も多いのがアのジルコニウム－水反応であり，次いで，イのMCCIである。これらに比べると，ウ，エによる水素発生はかなり少ないので，以下では，アとイに着目して論じる。

(2) 水素の爆発現象について

水素は，空気雰囲気中で酸素と反応して熱を出す。この反応形態は反応速度に応じて，次のように分類される。

反応速度が遅い—燃焼

早い—爆発—爆燃（火炎の伝播速度が亜音速）

└爆轟（火炎の伝播速度が超音速・衝撃圧）

福島原発事故で生じた爆発現象は，このうち「爆轟」である。構造物や建物の壊滅的破損を避けるためには，強烈的な圧力を発生する爆轟の防止が必須となる。

新規制基準では，「格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること」を求め，その判断基準は，「原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件（水蒸気存在を除外して算定すること）に換算して13%以下又は酸素濃度が5%以下であること」としている。本件原発のようなPWRでは，水素濃度13%以下が爆轟防止の判断基準となる（以上甲199・3～5頁「2. 水素の発生と爆発現象について」）。

2 PWRで水素爆発が発生した場合の結果について

(1) 福島原発事故の場合

福島原発事故では、事故の過程において、1号機、3号機及び4号機の原子炉建屋内で大規模な水蒸気爆発による建物破壊が生じ、大量の放射性物質が大気中に放出された（甲199・15頁の写真参照）。

(2) PWR では格納容器が損壊するおそれがあること

本件原発は、PWR であり、BWR の福島第一原発とは型式が異なるが、過酷事故時に原子炉内及び原子炉外で大量の水素が発生する危険性がある点においては全く同じである。

それどころか、BWR では、事故時に格納容器内での水素爆発を防ぐ対策として、通常運転中の格納容器内の雰囲気気を空気に替えて窒素を封入して酸素欠状態にしているため、水素爆発の生じるおそれのある場所は、格納容器内ではなくて、水素が格納容器の破損部から流出してくる空気雰囲気中の原子炉建屋となる。他方で、PWR では、通常運転中の格納容器内は空気なので、水素爆発が格納容器内で生じるおそれがある。その場合、PWR では、格納容器が損壊して、（福島原発事故のような）原子炉建屋内での水素爆発とは比較にならないほどの大量の放射性物質が大気中に放出されることになる。

(3) 放出が予想されるヨウ素とセシウムの量

どれほどの量が放出されるかについては、本件原発のいずれか1基で過酷事故発生後の2時間程度以内の早期に格納容器損壊が生じると、ヨウ素とセシウム-137の炉内蓄積量（それぞれ約31,000PBq, 約430PBq）のうち大半が大気中に放出される。これに対して、福島原発事故で大気中に放出されたヨウ素とセシウムの総量はそれぞれ500PBq, 10PBqとされている。そのため、ヨウ素、セシウムともに福島原発事故を一桁以上も上回るおそれがある。

(4) 小括

したがって、本件原発において、格納容器内での水素爆発を確実に防止する対策をとることは、過酷事故時に住民の安全を守る上できわめて重要であ

る（以上甲199・2～3頁「1. はじめに」）。

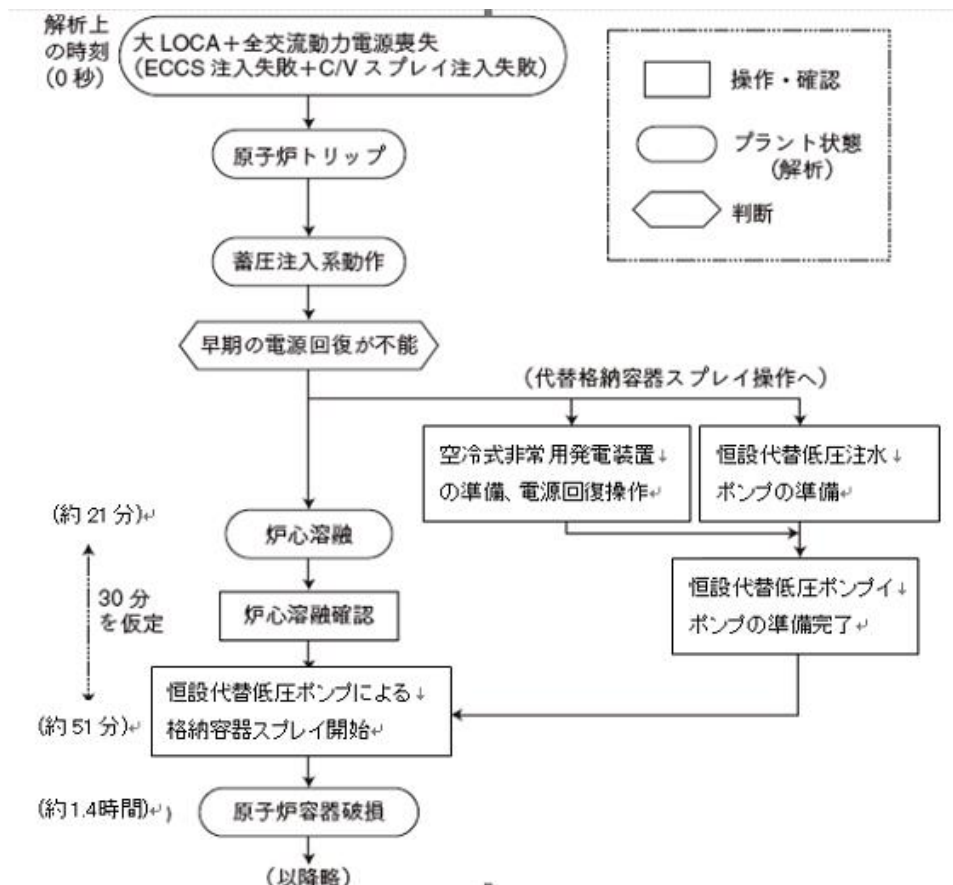
3 格納容器内での水素爆発防止対策

(1) 過酷事故時に想定されるシナリオについて

本件原発において、一審被告の設置変更許可申請書では、過酷事故の代表事故として、「大破断 LOCA（冷却材喪失事故）+ECCS（非常用炉心冷却設備）注入失敗+格納容器スプレイ注入失敗+全交流電源喪失」を想定して、対応を策定している。

このような過酷事故では、事故発生後、解析では約21分というごく短期間のうちにそれぞれ炉心溶融に至り、約1.4時間後にそれぞれ原子炉压力容器下部の破損に伴い溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下し始める。

格納容器過圧破損事故対策手順の概要（甲199・17頁の図3）



(2) 格納容器内での水素爆発防止対策について

本件原発での格納容器内での水素爆発防止対策は、以下の3種類である。

ア 原子炉下部キャビティの水張り

原子炉圧力容器の破損箇所から溶融炉心が落下し始めるまでに、格納容器スプレイを作動させて原子炉下部キャビティを十分な水位まで水張りする。それにより、溶融炉心を冷却することにより、MCCI（溶融炉心・コンクリート相互作用）によるコンクリート侵食の進行と水素発生量を抑制する。

ただし、MCCIの抑制対策としてのこの水張り方式には、高温の溶融炉心が水中に落下する際に「水蒸気爆発」が生じるリスクがあることについては、既に述べたとおりである。なお、このリスクをなくすとともに溶融炉心とコンクリートの接触を避けるために、フランスとロシアの新型炉では、原子炉圧力容器外に「コア・キャッチャー」を設置する方式を採用している（甲199・21頁の図参照）。

イ 静的触媒式水素再結合装置の設置

これは、白金系金属の触媒を用いて、水素と酸素を結合させるものである。5基設置することにされているが、その処理能力からいって炉心溶融時に大量に発生する可能性の高い水素を短時間に処理することはできず、長期的に徐々に除去する目的で設置されている。

ウ イグナイタの設置

イグナイタとは点火装置と訳されるが、これは電気ヒータに通電して水素を燃焼させるもので、12基設置される。もともと、機能の信頼性が十分ではないこともあって、水素爆発対策の有効性評価においてはこのイグナイタを考慮に入れていない

（以上甲199・5～6頁「3. 格納容器内の水素爆発防止対策」）。

4 水素爆発防止対策の審査ガイド

原子力規制委員会は、「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」において、主要解析条件を「3.2.3 (4) 水素燃焼」の箇所で、概ね以下のとおり定めている。

「(a) 炉心内の金属-水反応による水素発生量は、原子炉压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%が水と反応するものとする。

(b) 原子炉压力容器の下部の破損後は、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガス等の発生を考慮する。」

5 水素濃度の解析評価結果について

(1) 基本解析について

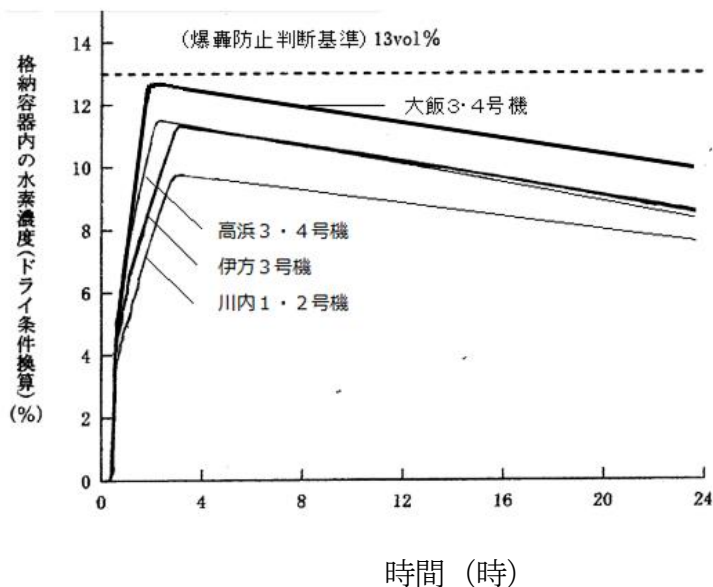
ア 基本解析の説明

一審被告を含む電力会社各社は、PWR 再稼働のための審査申請において、炉心熔融と原子炉压力容器破損に伴う格納容器内の水素濃度の時間的变化を、解析コード MAAP (過酷事故時のプラント内の様々な物理量の時間的推移をコンピュータでシミュレーション計算するソフトウェア (=解析コード) の名称であり、米国の電力中央研究所が所有している。) を使用して解析評価している。

ここでの留意点は、この解析ケースでのジルコニウム反応量を、上述の審査ガイドの主要解析条件 (a) に記載された全炉心内存在量の75%としていることである。この解析ケースを便宜上「基本解析」と呼び、不確かさの影響を評価する後述の解析と区別する。

格納容器内水素濃度の時間的变化

(基本ケース：全炉心ジルコニウム量の75%が反応) (甲199・19頁の図5)



イ 爆轟防止の判断基準値に対する余裕が大飯3・4号機では僅か0.2%しかないこと

この基本解析による本件原発の水素濃度(ドライ条件換算)の最大値は以下のとおりである。なお、参考として既に審査書が確定された高浜3・4号機、伊方3号機及び川内1・2号機についても併記する。(甲199・19頁の図5)

- ① 大飯3・4号機 (110万kW) 約12.8%
- ② 高浜3・4号機 (87万kW) 約11.5%
- ③ 伊方3号機 (89万kW) 約11.3%
- ④ 川内1・2号機 (89万kW) 約9.7%

いずれも格納容器破損防止対策の評価項目である水素爆轟防止の判断基準値13%を下回ってはいる。

しかしながら、注目すべきは、①の本件原発では、爆轟防止の判断基準値13%に対する余裕が僅か0.2%しかないことである。そのため、後述するとおり、水素発生量に対する不確かさの影響を厳しく考慮した場合には、水素濃度の最大値が判断基準の13%を超えるという重大な問題が生じる。

ウ 基本解析では MCCI による有意な量の水素発生がないとされていること

この基本解析は、前述の審査ガイドの主要解析条件 (a) に従って、「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% が水と反応して水素が発生する」としている。

しかしながら、主要解析条件 (b) にある「原子炉圧力容器の下部の破損後は、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガス等の発生を考慮する」については、この基本解析は、格納容器スプレイ注入により、原子炉下部キャビティには熔融炉心が落下する時点において十分な水量が確保されて熔融炉心の熱が除去されるので、床コンクリートには有意な侵食は発生せず、それに伴う有意な量の水素発生はしないとしている。これについては、次に述べるように大きな問題がある。

(2) MCCI の不確かさを顧慮した感度解析について

上述のとおり、一審被告は、解析コード MAAP を使用して MCCI (熔融炉心・コンクリート相互作用) の評価を行い、MCCI に伴う水素発生量を見捨て、ジルコニウム反応量を全炉心存在量の 75% として水素濃度を求めている。

しかし、MAAP は、MCCI の解析に際して不確かさがきわめて大きい解析モデルを使用している。そのため、感度解析等による不確かさの影響評価を行い、その結果に基づいて水素爆発防止対策の有効性判断をする必要がある。

本件原発に関しては、現在審査中で、どのような感度解析評価結果が提出されるのかまだ明らかではないが、これまでに審査書が確定した川内 1・2 号機と高浜 3・4 号機の感度解析結果を踏まえると、以下の問題が明らかとなる。

ア 川内 1・2 号機ではジルコニウム反応量を 100% としたこと

原子力規制委員会は、最初に終了した川内1・2号機の適合性審査において、九州電力に対して、MCCI（熔融炉心・コンクリート相互作用）の感度解析を踏まえた水素発生について検討することを求めた。そのため、川内1・2号機の審査書においては、全炉心内のジルコニウム100%が水と反応すると仮定して水素濃度を計算した（甲199・14頁の「表1 川内審査書でのジルコニウム反応量の取扱い」「3. 審査過程における主要な論点」「②」に「さらに、上記を上回るものとして、全炉心内のジルコニウムが水と反応すると仮定した場合において」とあるのはそのことを指し示す）。その結果、川内1・2号機では、水素濃度は最大で約12.6%となり、爆轟防止判断基準の13%以下を満足する。

イ ジルコニウム反応量を100%とする川内1・2号機の審査基準を本件原発に適用すると防止基準値13%を超えること

この川内審査書の「全炉心内のジルコニウムが水と反応する」との仮定を、本件原発に適用すると、格納容器内の水素濃度は最大約16.4%となり、爆轟防止の判断基準値13%を上回る（甲199・25頁の「付録3」に具体的な計算根拠を示す。ここで、全炉心内のジルコニウム反応量100%の内訳は、原子炉圧力容器の下部が破損するまでに75%、原子炉圧力容器が破損した後のMCCIにより残りの25%である。）。

すなわち、MCCI（熔融炉心・コンクリート相互作用）による水素発生の不確かさを解析コードに依拠することなく最大限に考慮すると、本件原発は水素爆轟の防止基準を満足できずに、水素爆発による格納容器の損壊とそれに伴う放射性物質の大量放出という具体的危険性があることになる。

ウ 高浜3・4号機ではジルコニウム反応量を81%としていること

川内1・2号機の審査書ではジルコニウム反応量を100%としていることは既に述べたとおりである。ところが、これに対して、高浜3・4号

機の審査書では、MAAP 解析に依拠して MCCI（溶融炉心・コンクリート相互作用）に伴うジルコニウム反応量を約 6% とし、ジルコニウムの総反応量は 81%（75%+6%=81%）とした。このように、ジルコニウム反応量を川内審査書の値よりも緩めて大幅に小さい値に変更した高浜 3・4 号機についての一審被告の評価を原子力規制委員会が承認したことは、審査に科学的・論理的な一貫性を欠いていることが明らかである。

エ ジルコニウム反応量を 81% として算定した高浜 3・4 号機の審査基準を大飯 3・4 号機の審査に適用しても防止基準値 13% を超えること

念のため、高浜 3・4 号機の審査と同じ、ジルコニウム反応量を 81%（MCCI による反応量を 6% とする）とする審査基準を、大飯 3・4 号機の審査に適用して計算したところ、水素濃度が最大で約 13.7% となった（甲 199・26 頁「付録 3」「2. 大飯 3・4 号機についての算出」「(2) ジルコニウム反応量 81% の場合の水素濃度」）。

すなわち、ジルコニウム反応量を MAAP 解析に依拠して川内審査よりも緩めた値 6% を採用した場合においてすら、本件原発は水素爆轟の防止基準値 13% を満足できないことが判明した。

6 結語

以上のように、本件原発は、MCCI による水素発生の不確かさの影響評価について、川内 1・2 号機審査を踏まえて、解析コードに依拠しないで、全炉心内のジルコニウム量の 100% が水と反応すると仮定した場合、水素濃度は水素爆轟防止の判断基準値 13% を超える。仮に高浜 3・4 号機審査と同様に、解析コードに依拠して、全炉心内のジルコニウムの 81% が反応するとした緩めた条件のもとでも、水素濃度は判断基準値を超える。

したがって、過酷事故時には、水素爆発による格納容器の損壊とそれに伴う放射性物質の大量放出という大事故が発生する具体的な危険性があることが

明白である（以上，甲199・11～12頁「5. 結語」）。

以 上