

平成 29 年（㉔）第 2 号 玄海原発再稼働禁止仮処分申立事件

債権者 長谷川 照 ほか

債務者 九州電力株式会社

補充書面 8

水蒸気爆発対策の不備

2017（平成29）年5月8日

佐賀地方裁判所 民事部御中

債権者ら訴訟代理人

弁 護 士 板 井 優

弁 護 士 河 西 龍 太 郎

弁 護 士 東 島 浩 幸

弁 護 士 椛 島 敏 雅

弁 護 士 田 上 普 一

外

第1 はじめに

玄海原発 3・4 号機には原子炉建屋がないため、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。格納容器が破壊されると、放射性物質の拡散を防ぐ方法がなくなり、甚大な規模の事故となる。

格納容器の破壊の要因としてまず挙げられるのは、格納容器内部の圧力・温度の比較的ゆっくりとした上昇と、極めて急激な爆発的上昇である。後者の原因の主なものは、水素爆発や水蒸気爆発である。

本書面はこのうち水蒸気爆発について論じるものである。

格納容器の破壊を防ぐためには、格納容器内部において水蒸気爆発が起きることがないよう十分な対策がとられる必要があるが、玄海原発 3・4 号機においては、後述のとおり対策をとるところか、水蒸気爆発が起こる可能性が極めて低いために対策が不要とされているのである。

本書面では、水蒸気爆発のメカニズムとその危険性を説明したうえで、玄海原発 3・4 号機において水蒸気爆発が起こる可能性が否定できないことを明らかにし、少なくともその対策がとられないままでの再稼働は許されないことを論じる。

第2 水蒸気爆発のメカニズムと危険性

1 福島第一原発事故で明らかになった水蒸気爆発の潜在的危険性

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る。過酷事故が発生した場合、溶融炉心が落下して水と接触すると、水蒸気爆発が起きる可能性がある。

福島第一原発事故では、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、福島第一原発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高いため、常に水蒸気爆発の危険性は避けられない。福島第一原発事故は、改めて炉心溶融後の水蒸気爆発の潜在的危険性を思い起こさせる事故であった。

玄海原発はいずれも PWR（加圧水型炉）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とき、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。即ち、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、債務者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。しかしながら、そのようなシナリオでは、過酷事故の際に水蒸気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、福島第一原発事故によって水蒸気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、債務者は、過酷事故対策として、それらの教訓を無視するかのときシナリオを描いて、原発再稼働を開始せんとしている。

また、以下に述べるように、債務者の描くシナリオでは、過酷事故の際に、水蒸気爆発が発生して、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、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、しかも、原子力規制委員会がその申請を許可している。これでは、福島第一原発事故の際の教訓を生かすことができず、福島第一原発事故と同様な、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、過酷事故の際における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 A 352 号証）及

び「原子炉格納容器内の水蒸気爆発の危険性についての補足」（甲 A 353 号証）の内容に沿って、それら水蒸気爆発の危険性について説明を行う。

2 水蒸気爆発のメカニズム

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、金属工場において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、よく知られている。

液体の水が大気圧下で蒸発すると、その体積は理論上 1600 倍にもなる。この体積の急膨張が水蒸気爆発といわれる現象である。

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 A 352 号証）。

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）に接触した場合、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、高温液体が水（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水蒸気の膜（膜沸騰）で覆われる初期の混合状態（粗混合状態）が生じる（a）。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（b）。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）（以上の点につき、「水蒸気爆発のメカニズム」（甲 A 352 号証））。

3 水蒸気爆発の危険性

福島第一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、大量の放射性物質が格納容器外に放出された。

これと比較すると、原発過酷事故時に水蒸気爆発が発生して格納容器が破壊された場合には、キセノン、セシウム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、甚大な被害をもたらしてします。

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。

福島第一原発事故を起こした原子炉は BWR のマーク 1 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。

しかし、もし日本原電の東海第二原発のようなマーク U 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溜まり、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 A 352 号証）。

第3 過酷事故の際に債務者が想定するシナリオとその問題点

1 過酷事故の際に債務者が想定する対応（シナリオ）について

玄海 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+全電源喪失（緊急炉心冷却系失敗+格納容器スプレイ失敗）」である（ここに、「大破断冷却材喪失事故」は「LOCA:Loss of Coolant Accident」、「緊急炉心冷却系」は「ECCS:Emergency Core Cooling System」と言い慣わされている。）。

このような過酷事故に対して、債務者は、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 A 352 号

証)。

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、断定的に記述できない。

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イ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。以下「MCCI」という。）を防ぎ、安定的に溶融炉心の冷却を行う（甲 A 352 号証）。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（乙 2 号証の 1・190 頁）。

そして、これら債務者が想定する対応（シナリオ）を、原子力規制委員会は無条件で追認している（乙 2 号証の 1・193～194 頁）。

しかし、これらの過酷事故時に債務者が想定する対応（シナリオ）には、いくつかの重大な過誤がある。その問題点を要約すると、以下の 2 点になる。

ア すなわち、まず 1 点目は、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、計画したとおりには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という点である。

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。

イ 次に 2 点目は、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という点である
(以上、甲 A 352 号証)。

2 玄海 3・4 号機の適合性審査で水蒸気爆発の可能性が考慮されていないこと

ここで、玄海原発 3・4 号機の審査書の内容を検討する。

審査書には、「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」の箇所において、過酷事故時に原子炉圧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

原子力圧力容器外の 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と考えられるため、圧力スパイクについて考慮する（乙 2 号証の 1・190 頁）。

(2) 審査結果

原子力規制委員会は、上述のように、債務者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（乙 2 号証の 1・193～194 頁）。

(3) 審査過程における主な論点

原子力規制委員会の指示により、債務者は、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、債務者は、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。

原子力規制委員会は、JAEA報告書（甲A355号証）に基づくJASMINコードを用いた水蒸気爆発の評価を提示し、債務者の見解を求めた。

それに対して、債務者は、この論文における評価想定は、実機での想定と異なることを示した。

この債務者の摘示を受けて、原子力規制委員会も、原子炉压力容器外のFCIで生じる事象として、水蒸気爆発を除外して、圧カ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（乙2号証の1・193～194頁）。

3 実験結果の不合理的な選択と適合性審査

(1) 過酷事故時には様々な外部トリガーがありうること

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、溶融物が現実的な温度と思われる 2910K（絶対温度。摂氏で 2637°C）（TROI 装置）と 2958K（絶対温度。摂氏で 2685°C）（KROTOS 装置）でそれぞれ水蒸気爆発が発生している。確かに、これらの実験では、外部トリガー（誘因）を加えて実施されたと思われる、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、溶融温度の低い錫や鉛を除いて、溶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、100t に及ぶ溶融物が水プールに落下した場合には、①少量の水を溶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。

さらに、過酷事故時の水素爆発対策として、イグナイタにより人為的に水素の燃焼を行うという対策方法がとられているが、これはいわば小規模の水素爆発を起こすということであり、これが外部トリガーとなる可能性は十分に考えられる。

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（以上、甲 A 352 号証）。

ところが、過去には、これら水蒸気爆発事故は現実には発生している。

実際に、2015（平成 27）年 8 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ており、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）への一斉指導を始め、溶解炉周辺に水気や可燃物がないかを点検している、と報道されている（2015（平成 27）年 9 月 8 日付け西日本新聞朝刊）。

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。

また、国は、労働安全衛生法に基づき「鉄鋼業における水蒸気爆発の防止に関する技術上の指針」（甲 A 354 号証）を公開しており、鉄鋼業の現場において水蒸気爆発が発生する可能性を考慮している。

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、その対策をしない債務者の申請書や、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。

(2) TROI 装置の実験データが無視されていること

ア 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。

債務者は、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。

イ 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債務者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 60kg、KROTOS では約 3kg の試料を使用している。他方、申請で無視された TROI 装置では 10～20kg 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。

従って、実験の規模からいっても、また、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全く理解できない。

ウ 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、溶融物

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（以上、甲 A 352 号証）。

第4 水蒸気爆発の対策が必要であること

1 JAEA 報告書が水蒸気爆発の可能性を否定していないこと

原子力規制委員会が債務者に対して確認した JAEA 報告書に基づく JASMIN E コードを用いた水蒸気爆発の評価では（甲 A 355 号証）、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、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」、（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員のシナリオは、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 2kg から約 180kg 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。

従って、IAEA 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、しなかったりする確率現象である（甲 A 352 号証）。

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。

2 IAEA 安全指針 NS-G-2.15

過酷事故時の水蒸気爆発の危険性は、諸外国では深刻に認識されている。

たとえば、IAEA 安全指針 NS-G-2.15「原子力発電所のシビアアクシデントマネジメント計画」（日本語訳）には、キャビティの冠水が「圧力容器外での水蒸気爆発が起こり得るというマイナスの影響がある」と指摘している（甲 A 356 号証）。

3 諸外国の原発における水蒸気爆発対策

諸外国では、水蒸気爆発を避けるために、各種のコアキャッチャの開発実験が精力的に進められている。チェコのデウスピヴァによる説明資料（甲 A 357 号証）がその現在の状況を示している。

4 柏崎刈羽原発においては水蒸気爆発対策がとられていること

前述のとおり、玄海原発 3・4 号機の適合性審査においては、外部トリガーがない限り水蒸気爆の可能性は極めて小さいとして、その対策は不要とされている。

しかし、柏崎刈羽原発の適合性審査においては、水蒸気の可能性が検討され、水蒸気爆発を回避するための措置までとられているのである。

柏崎刈羽原発の適合性審査会第 274 回議事録（甲 A 358 号証）72 ページには、「水蒸気爆発に関しましては、溶融物が落下した際に水蒸気爆発が発生した実験例というのは非常にわずかであること、及びそれらに関しましても、外部のトリガーですとか、そもそも溶融物の温度が溶融炉心の温度を上回るほどの極端な過熱度で実験した場合に限られて

いるということから、繰り返し御説明させていただいたところでございますが、これは非常に起きにくいと。水蒸気爆発は非常に起きにくいというふうに考えてございます。」との記載があり、「圧カスパイクに関しましては、初期水張りの水位が高いほど、水の顕熱による熱の吸収に期待できるということから、ピークは初期水張りの水位が高いほうが小さくなるのではないかとというふうに考えてございます。」と、圧カスパイクは水位が高いほうが起こりにくいと説明されている。

一方で、同議事録の資料 2-3「重大事故等対策の有効性評価について（補足説明資料）」（甲 A 359 号証）の通しページの 71～78 ページには、水蒸気爆発の可能性は水張りの水位が高いと大きくなり、圧カスパイクの可能性は水位が高いと小さくなると説明されている。

そのうえで、万一水蒸気爆発が起きた場合の事を想定して、水位と水蒸気爆発圧力の関係を検討し、水位は 2m 以下にするとの結論を出しているのである。

仮に水蒸気爆発が起こる可能性を考慮しなくてよいとするのであれば、圧カスパイク防止のために水張り水位を高く設定することが合理的ということになるはずであるが、これを敢えて、水位を 2m 以下に設定するとしているのは、すなわち、水蒸気爆発の起こる可能性が無視できないからにほかならない。

第5 結語

以上のとおり、玄海原発 3・4 号機においては、水蒸気爆発の起こる可能性が否定できず、格納容器破損防止のためには、水蒸気爆発の対策を講じる必要がある。

しかるに、債務者においては、対策を講じるどころか、水蒸気爆発の起こる可能性が極めて低いとして、対策の必要性自体を否定しているのであり、このまま玄海原発 3・4 号機の再稼働を許せば、過酷事故時に放射性物質が大量かつ広範に拡散することを防ぐことができない。

したがって、玄海原発 3・4 号機の再稼働は認められるべきではない。

以上