

平成28年(ワ)289号

原告 〇〇〇〇外66名

被告 四国電力株式会社

準備書面15

(水蒸気爆発)

広島地方裁判所 民事第2部 御中

平成30年 3月15日

原告ら訴訟代理人弁護士 能 勢 顯



同 弁護士 胡 田 敢



同 弁護士 前 川 哲



同 弁護士 竹 森 雅



同 弁護士 松 岡 幸



同 弁護士 河 合 弘



原告らは、本書面において、新規制基準の下での過酷事故対策が水蒸気爆発の発生という大きな危険を孕むものであることを明らかにする。

目次

第1．はじめに	4
第2．新規制基準の規定	5
1．5号規則とその解釈	5
2．技術的能力の審査基準	6
第3．溶融炉心による水蒸気爆発（甲E 1～8）	6
1．水蒸気爆発に対する各国の取組	6
(1) 水蒸気爆発に対する認識	6
(2) 実験結果	7
ア クロトス	7
イ ファロ	7
ウ コテルス	7
エ トロイ	8
オ OECD	8
カ 小括	9
2．トロイに対する評価	9
(1) 被告あるいは規制委員会の評価	9
(2) トロイによる実験とレポートの検討	11
ア 2002年レポート	12
イ 2003年レポート	12
ウ 2007年レポート	13
(3) トロイに対する国際的評価	13
(4)	14
3．水蒸気爆発とトリガー	14
(1) 水蒸気爆発のメカニズム	14
(2) トリガーの必要性	14

4. OECDセレナレポート	15
(1) 2004年レポート	15
ア セレナプロジェクト	15
イ 各機関のコメント	15
(2) 2007年レポート	16
(3) 2014年レポート	16
5. 技術的能力に係る審査基準	17
6. 小括	18
第4. コアキャッチャー	19
1. MCC I対策とコアキャッチャー	19
2. 世界の状況	20
第5. まとめ	20
1. 自発的水蒸気爆発	20
2. トリガー	21
3.	21

第1. はじめに

福島第1原発事故では、コア・コンクリート反応（MCCI）が発生した。この対策として、被告は原子炉下部キャビティーに水を張って水プールを作り、メルトスルーした溶融炉心を水中に落として冷却する方法を採用した。しかし、この方法は格納容器を破損させる水蒸気爆発の危険を孕んでいる。

水蒸気爆発とは、高温溶融物と接した水が瞬時に気化する物理現象である。この急激な蒸発過程の初期反応は、100万分の1秒以内という短時間で起こり、爆発が全体に及ぶ時間も数十分の1秒程度に過ぎない。このわずかな時間に気化による体積の膨張は理論上1600倍になるという。（甲E1）

水蒸気爆発は溶融金属を扱う金属工場などでしばしば見られる現象で、昔から恐れられてきた。表1のとおり、統計的にも工場等における爆発・火災災害の原因物質として、常に上位を占めている。また、火山のマグマが地下水に接触して起こる水蒸気爆発もよくテレビ・新聞等で報道され、その威力の大きさは我々の実感するところでもある。しかし、水蒸気爆発は複雑系の現象で、実験室における再現も容易ではなく、いかなる条件の下で水蒸気爆発が起こるのかは、未だ、十分に解明されているとは言い難い。（甲E1）

表1 爆発・火災災害件数

爆発・火災災害の原因物質の年代別順位と件数

()内は件数 半括弧は同順位

順位	昭和30～39年	昭和40～49年	昭和50～59年	昭和60～平成5年
1位	アセチレン(240)	LPG(124)	LPG(64)	シンナー、溶剤(50)
2位	ガソリン(130)	シンナー、溶剤(108)	シンナー、溶剤(52)	LPG(40)
3位	火薬、爆薬類(111)	水蒸気爆発(97)	ガソリン(40)	水蒸気爆発(31)
4位	水蒸気爆発(100)	ガソリン(88)	水素(35)	ガソリン(21)
5位	煙火、花火(90)	アセチレン(82)	水蒸気爆発(34)	煙火、花火(20)
6位	シンナー、溶剤(89)	都市ガス(39)	穀物・有機物粉(33)	穀物・有機物粉(19)
7位	LPG(76)	重油(39)旧	メタン(24)	アルコール類(18)
8位	重油(29)	穀物・有機物粉(39)	トルエン(22)	水素(17)
9位	水素(28)	水素(37)	アセチレン(22)	メタン(15)
10位	都市ガス(27)	原油、ナフサ(34)	都市ガス(20)	都市ガス(14)

(板垣晴彦「爆発・火災災害の統計分析」1997年 産業安全研究所)

原発における水蒸気爆発についても事は同様であり、実機において想定される溶融物（二酸化ウランと二酸化ジルコニウム（ジルコニア）の混合物）を用いた実験については、わずかな国で数えるほどしか行われていない。このような状況の中、OECDは、水蒸気爆発対策として、2002年1月、セレナプロジェクトを計画・実施し、さらに、2007年から2012年にかけて欧州JRC（European Community Joint Research Centre）のクロトス装置と韓国のトロイ装置を使用して各6回計12回の実験をセレナプロジェクト2として行った。これにより一定の成果はあったが、未だ評価は定まらず、十分な知見が得られたとは言えない。即ち、水蒸気爆発がどのような条件の下で発生するのかは、未だに解明されていないのである。

第2．新規制基準の規定

1．5号規則とその解釈

福島第1原発事故では、コア・コンクリート反応（MCCI：溶融炉心・コンクリート反応）が発生した。MCCIが起こった以上、これに対する対策は必須になる。そこで新規制基準においては、その中核をなす「実用発電用原子炉及びその付属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、5号規則という）第51条が、MCCI対策を以下のとおり定めた。

原子炉格納容器下部に溶融炉心を冷却するための設備の設置を求め、「発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、溶融し、原子炉格納容器の下部に落下した炉心を冷却するために必要な設備を設けなければならない。」と規定し、この規定を受ける「5号規則の解釈」は、「第51条に規定する『溶融し、原子炉格納容器の下部に落下した炉心を冷却するために必要な設備』とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。・・・a) 原子炉格納容器下部注水設備を設置すること。・・・」としている。

この結果、被告を含む加圧水型原子炉を持つ電力会社は、いずれも格納容器下部に水を張り、そこに圧力容器を溶かしメルトスルーした熔融炉心を落とし込むことでMCCIに備えることとした。しかし、この方法はMCCI対策にはなるが、熔融炉心と水の接触による水蒸気爆発という大きな危険を孕むものである。

2. 技術的能力の審査基準

原子炉等規制法第43条の3の6第1項第3号に規定する技術的能力の審査を行う際の審査基準として、原子力規制委員会は、平成25年6月19日、「実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準」を定めた。同審査基準は要求事項として、1.8で原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための手順等が適切に整備されているか、又は、整備される方針が適切に示されていることを要求し、要求事項の解釈1.8〔解釈〕1(2)aは、「熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下を遅延又は防止するため、原子炉圧力容器への注水する手順等を整備すること。」と定めている。

本書面では、この規定も守られていないことを明らかにする。

第3. 熔融炉心による水蒸気爆発（甲E1～8）

1. 水蒸気爆発に対する各国の取組

(1) 水蒸気爆発に対する認識

ヨーロッパでは比較的早くから水蒸気爆発の危険性は認識され、その対策を立てるべく実験等が行われてきた。しかしながら、熔融炉心と成分が類似した熔融物を使用した実験は少なく、結果が公表されているものは、実験名クロトス、ファロ、コテルスの3実験、これに1997年から始まった韓国の実験名トロイ、2002年1月、OECDが主催して始めたセレナプロジェクトである。

なお、ロシアではチェルノブイリ事故の教訓からかなり進んだ調査・研究

が行われてきたようであるが、実験結果を公表していない。

(2) 実験結果

クロトス・ファロ・コテルス・トロイ・セレナプロジェクトの各実験の条件および結果は別表2～6のとおりである。いずれも、全実験について記載されている訳ではなく、一部は省略されているようである。これらの表は東京電力外3電力会社が共同名義で作成した「重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第5部MAAP）添付2 熔融炉心と冷却材の相互作用について」から引用した。この表からは、次のことが判る。

ア クロトス

クロトスは、1999年までの数年間、欧州JRCがイスプラ研究所において、一次元形状の水槽による圧力波の伝播現象を観察する目的で行われた実験である。

クロトス実験においては、二酸化ウランとジルコニアを熔融物とする10ケース中、外部トリガーを加えなかった2ケースでは水蒸気爆発はなかった。外部トリガー（ガス放出）を加えた8ケースのうち、水蒸気爆発を発生したものは3ケース（K46、K52、K53）、発生しなかったものが5ケースであった。

イ ファロ

ファロも、クロトス実験と同時期、欧州JRCがイスプラ研究所において行った実験である。

ファロ実験では、外部トリガーを加えた1件を含む12件全件で、水蒸気爆発は起こっていない。但し、外部トリガーを加えたL33では高い圧力値が測定されており、爆発と看做せるものと思われる。

ウ コテルス

コテルスは、1998年、日本の原子力発電技術機構（NUPEC）が

カザフスタン国立原子力センターの装置を借りて行った実験である。日本にはUO₂（融点2865℃）やジルコニア（ZrO₂）を溶融して実験する装置は無かった。

コテルス実験の結果は、外部トリガーを掛けない8ケース全部で水蒸気爆発は起こらなかった。

エ トロイ

トロイは1997年に始まった。韓国原子力研究所が加圧水式原発の第3世代原子炉開発のために原子炉压力容器外水蒸気爆発実験である。

トロイ実験では、二酸化ウランとジルコニアを溶融物とし、外部トリガーを掛けない4ケースで水蒸気爆発が発生し、2ケースでスチームスパイクが、外部トリガーを掛けた6ケース中5ケースで水蒸気爆発が、残1ケースでスチームスパイクが発生した。

オ OECD

OECDは、水蒸気爆発により格納容器に損傷が生じると、爆発によって発生する大量の核燃料の微粉が大気中に放散し、耐え難い大被害が発生することを危惧して、セレナプロジェクトを企画・実施した。このプロジェクトには世界各国の原子力関係の組織から参加があった。日本からはJAEA（日本原子力開発機構）とNUPEC（原子力発電技術機構）の2組織が参加している。

OECDが国際的プロジェクトを組んだ理由は、原発事故の特性を背景に、未だ水蒸気爆発の解明が充分ではないこと、新型炉の過酷事故対策の設計や現在運転中の原子炉の過酷事故対策が不十分であることから、各国に認識を一致させ、知見を共有し、有効な事故対策等を共通にしようという意図からである。

OECDセレナプロジェクトにおいては、クロトスとトロイで各6回計12回の実験が行われた。いずれも外部トリガーを加えている。結果はト

ロイ 6 件中 5 件で水蒸気爆発が発生し（S/E）、残 1 件でもスチームスパイクが起きている。クロトスでは 6 件中 3 件で水蒸気爆発が、1 件で局所的水蒸気爆発が、1 件でスチームスパイクが発生した。なお、1 件は結果が得られていない。

カ 小括

以上から、外部トリガーが存在すると、高い確率で水蒸気爆発が起こることが明らかになった。同時に、トロイ実験では外部トリガーの無い自発的水蒸気爆発も発生した。にもかかわらず、被告は水蒸気爆発の可能性は無視していいほど小さいと言い、規制委員会もこれを追認した。そこで以下に、まず、自発的水蒸気爆発が起こったトロイ実験について論じ、次いで、トリガーについて検討する。

2. トロイに対する評価

(1) 被告あるいは規制委員会の評価

トロイ実験において、自発的水蒸気爆発が発生したことに対し、規制委員会は、「トロイ装置による実験のうち、自発的に水蒸気爆発が発生した実験においては、溶融物に対して融点を大きく上回る加熱を実施する等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。」との理由で、水蒸気爆発の可能性を否定したまま、加圧水型原子炉の運転再開を認めた。言うまでもなく、被告を含む電力会社もトロイ実験は温度計測に問題があるとして、その結果を完全に無視する態度をとっている。

規制委員会や被告が問題にする温度計測とは何かを、別表 5 に基づいて説明すると、溶融物温度が実験番号 10・12 では 3800 K（0℃は 273 K）と極めて高いこと、番号 13 では 2600 K と記載されているが、実際には 3500 K と推測されること、これらはいずれも実機では有り得ない高温であること、さらに、ケース 14 は二つの温度計が異なる最高温度（4000 K と 3200 K）を記録し計測の不確かさが大きいということである。

温度計測の誤りについては、その後、適切に修正されているが、この点は次項で述べるとして、ここでは、第9回適合性審査会合（平成25年8月15日）における九州電力のMCCI対策についての質疑を通して、実は、委員会自身が水蒸気爆発について大きな不安を持っていることを紹介する。

更田委員：キャビティーに水を張るとするのは・・・MCCIを未然に防ぐという観点からは、戦術の一つだとは思いますが、一方で水蒸気爆発はもう起きないという決心が無いと、なかなか水を張り難いですよね。解析では起きてない。それはMAAP（という解析プログラム）のモデル次第の話であって、・・・。躊躇なくキャビティーに水を張るといふ方向で行くのか。・・・その辺りは、これはその時のその時の運転員の判断になるのか・・・。

九州電力：・・・手順書に基づいて運転員は操作します。・・・もう規定している、社内決定しているということでございます。

更田委員：今、申し上げたように、MAAPの解析では、スチームスパイクは起きてないからFCIは起きていません。それはこの解析では起きていないということですが、実際にその事態に出会ったときに、FCIを恐れずにキャビティーに水を張る。それが九州電力の判断というふうに考えてよろしいですか。

九州電力：我々としてはそう考えております。（甲E6）

更田は、「水蒸気爆発はもう起きないという決心が無いと、なかなか水を張り難いですよね。」と尋ねている。恐らくこの時、「果たして自分であったらその決心がつくだろうか」と心配しているのである。背景には「水蒸気爆発が発生するんじゃないか」「MAAPの解析には不安がある」と葛藤し

ているのである。その質問には苦笑を誘われるが、事は極めて深刻である。

実は、更田は、2012年2月28日の第7回東海フォーラム『事故の教訓と安全研究の方向性』で、ソースターム（環境に放出された放射性物質）の解析例を示しながら、格納容器破損モード（壊れ方）の違いによる放射性物質の放出量と時間について、次のように話している。

福島第1原発事故の放射性物質の放出を「格納容器の加圧破損による後期大規模放出」（長時間にわたり放射性物質の放出が行われる）とし、これに対し、「水蒸気爆発による早期大規模放出は、水蒸気爆発が格納容器を同時に破壊して、大半の放射性物質が数時間以内に出てしまい極めて厳しい事故であることが分かる。事故後数時間で大量の放射性物質を放出してしまうこのような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」と説明している。

以上より分かることは、水蒸気爆発が発生し、早期に格納容器が破損し、短時間に大量の放射性物質が放出する事態を、更田自身が恐れていることである。その更田は、現在、原子力規制委員会委員長に就任している。

因みに、MAAPは急激な変化を模擬できず圧力スパイクが再現できないことが、国会事故調の報告書p168（甲E9）などで指摘されている。

(2) トロイによる実験とレポートの検討

トロイ実験は1997年に開始され、その報告書は2002年、2003年、2007年に提出されている。また、2002年に始まり、2007年から2012年にかけて行われたOECDセレナプロジェクト2でも6回の実験を行っている。被告が主張し規制委員会が自らの判断の根拠とした計測温度は、2002年レポートの中で報告されたものであるが、その後の検討・検証過程で修正され、2003年レポート及び2007年レポートでその旨が報告されている。

トロイ実験の結果如何は、本訴の結論を左右する最重要争点の一つであ

る。そこで、次にこの点を検討する。

ア 2002年レポート

2002年レポートでは、疑似材料を用いた実験において、チノ製2色高温計で熔融物の温度を測定したところ、2色高温計の測定上限温度（3100℃）を越えていたことから、熔融物は融点より400℃以上過熱されていたと思われると報告され、熔融物温度は3100℃以上とされた。しかし、トロイ11の実験では、熔融物温度が3100℃を越えていたのに自発的水蒸気爆発は起こらなかった。実験後の熔融物調査では、二酸化ウランのペレットが元の形状のまま多数観察された。そこで、熔融物の表面温度は模擬材料を熔融するには十分高いが、完全に熔融するには時間が短すぎたとして、熔融物の測定温度に問題があると報告している。

因みに、2色高温計は表面温度を測定するものであり、「二酸化ウランのペレットが元の形状のまま多数観察された」という事実は、加熱時間が充分ではなかったことを意味している。

イ 2003年レポート

上記レポートでは、自発的水蒸気爆発が起こったトロイ13・14・15の各実験について報告されるとともに、上記熔融物温度「3100℃以上」が修正されている。トロイでは上記高温計による測定温度が高すぎることに疑問を持ち、トロイ14の実験では温度測定にチノ製高温計とイルコン製高温計の二つの高温計が使用された。結果はイルコンが2927℃、チノが3527℃で、600℃の違いがあることが判明した。そこで検討のうえ、チノに比較してイルコンの信頼性が高いと評価された。以後、トロイにおける実験にはイルコン高温計が使用されるようになった。2003年のレポートでは、実験温度はトロイ13が3300Kから2600K（2327℃）に修正され、トロイ14の実験温度は3000K（2727℃）、トロイ15は3750K（3477℃）とされた。

ウ 2007年レポート

上記レポートでは、さらに溶融物温度の検討が行われている。トロイ14の実験以後は、高温計にはイルコン製が使用されているようだが、温度測定の検証は引き続き行われた。その結果、「温度測定はまた、高温計と溶融物の間に取り付けられた覗き窓の影響を受ける。従って、パイロメーター（高温計）は実験後に較正された。高温計がガラス窓の為に実際の温度よりはるかに高い温度を示した。ガラスの分光透過率は波長に大きく依存し、2色の高温計の測定値が歪んでいた。窓ガラスを通した測定値は1500～2700℃の範囲で較正された。」と報告されている。

(3) トロイに対する国際的評価

トロイの実験装置は、ソビエト連邦科学アカデミーの実験装置を参考にし、独力で開発した試験装置である。水蒸気爆発実験装置としては最先端技術の結晶と言えるものである。そのことは、OECDがセレナプロジェクトにクロトスとともに選んだことから理解できる。

さらに、セレナプロジェクト2004年報告書では、「既に実施されているTOROI-13は、自発的な水蒸気爆発を発生させるプロトタイプのコリウムが持つ能力に関する最初の情報を与える」（p13）と報告し、積極的な評価をしている。また、後述するようにアメリカのコメントでも高く評価されている。

確かに、実験の初期において、その温度測定に問題があったようではあるが、それは検討のうえ、短期間に修正されていることは前述したとおりである。

- (4) トロイ実験において発生した自発的水蒸気爆発は、「実機では有り得ない高温な溶融物」だから起こったとは言えない。実機条件でも自発的水蒸気爆発は起こり得ることを原告らは明らかにした。温度問題についての立証責任は被告に移った。

3. 水蒸気爆発とトリガー

(1) 水蒸気爆発のメカニズム

水蒸気爆発は、例えば、溶融した金属が水中に落下したときのように、温度の異なる2種類の液体が接触したときに、瞬時に起こる現象である。現在までに次の四つのステージをたどることが明らかになっている。水蒸気爆発は、まず、①高温の液体が低温の液体中で膜沸騰を伴う粗混合状態となる、次いで、②膜沸騰蒸気膜を破壊するトリガーが存在すると、③膜沸騰が破壊され、この現象が伝播する、すると、④高温液体の微粒化をともなう爆発的蒸発が発生するという経過をたどる。しかし、何がトリガーになるか、どのような条件がそろえば水蒸気爆発が起こるかは未だ解明されていない。

(2) トリガーの必要性

水蒸気爆発はトリガーが無ければ起きないと言われている。トリガーには自発的なものと外部から加わるものがある。トリガーの発生源及びその大きさや立ち上がり速度の定量化については、現在までの研究では極一部を除き判っていない。水蒸気爆発の破壊力を調査するための実験等では、水蒸気爆発を確実に起こさせなければならないため、人為的に極めて大きな外部トリガーを掛けるが、その場合、少量の火薬、高圧気体の開放（例えば、アルゴンガスの吹込み）等の方法を使用しているようである。

被告は、格納容器下部キャビティにはトリガーとなるものはないから水蒸気爆発は起きないと主張する。しかし、それは「実験で使用するようなトリガー（火薬やアルゴンガス）は無い」ということを言っているに過ぎない。福島第1原発でも複数回発生した水素爆発を原因とする大きな圧力パルスに

よる蒸気膜の破裂、急激な水温の低下による蒸気膜内の水蒸気の凝縮、高速の流動による蒸気膜の剥離、容器壁と有用物に閉じ込められた水の沸騰蒸発による外力など、外部トリガーと成り得る現象を想定することは容易である。

4. OECDセレナレポート

報告は2004年、2007年、2014年の3回に亘り行われている。

(1) 2004年レポート

ア セレナプロジェクト

セレナプロジェクトの開始について、上記レポートは、2000年まで各国がそれぞれ水蒸気爆発の研究を進めてきた、しかし、未だ不確定なことが多い、新型炉の過酷事故対策や現在運転中の原子炉の過酷事故対策には現在の到達点では不十分である、そこで、国際的なセレナプロジェクトを結成し研究を進めることにした、と説明している。セレナプロジェクトは、水蒸気爆発実験とこれに基づくシミュレーションコードの開発を目的としている。

繰り返すが、このレポートはこれまでの世界中の水蒸気爆発の研究の到達点から、原発にメルトダウンが発生し、格納容器内に大量の水が溜まってしまったときや高温度の溶融デブリを水で冷却しようとしたときに、格納容器内で大水蒸気爆発が起き、格納容器を破損し、デブリダストが格納容器外に漏洩する危険性は大きく、現在の到達点ではそれらを防止するための適切な手段はまだ見つかっていない、だからセレナプロジェクトを行うのだ、とその動機を説明しているのである。OECDは水蒸気爆発と爆発による格納容器の破損、その結果としてのデブリダストの環境への拡散を「あり得ないもの」と考えてはおらず、メルトダウンが起きれば当然に起こり得る具体的危険だと認識しているのである。

イ 各機関のコメント

次にセレナプロジェクトに参加した各機関のコメントを紹介する。

フランスの I R S N / C E A は、水蒸気爆発に厳しい態度を保持し、自発的水蒸気爆発の存在を認めている。

ロシアは、M C C I 対策をコアキャッチャーで行う方針を採っている。

ドイツのカールスルーエ工科大学は、各国の研究機関が実施している水蒸気爆発実験について、未だ実験結果が不十分であり、もっと厳密な実験が必要だと提言している。

アメリカの原子力規制委員会は、これまでの水蒸気爆発とその研究は論文などで発表されている情報から考察されてきたもので、不十分なものになっている。O E C D セレナプロジェクトのような国際的プロジェクトが必要だとしたうえで、ファロ実験については水蒸気爆発を解明するにはまだまだ不明な点が多いとし、クロトス実験については、試験に使用した溶融物の重量が少なく実炉の水蒸気爆発を解明するには相関性に劣るとし、トロイ実験については、温度測定の不確かさを批判しつつ、溶融物の重量がある程度あること、溶融物として $U O_2 + Z r O_2$ を使った実験数が多いこと、さらに疑似デブリで自発的水蒸気爆発を初めて観測したこと等を評価している。

(2) 2007年レポート

上記レポートでは、セレナプロジェクトに参加した各機関のシミュレーション結果に大きな差異があること、これまでの実験で開発された水蒸気爆発の解析コードには不備があること、原子炉下部キャビティーに満たされた水の中で水蒸気爆発が起こるとキャビティーが破壊される危険性が大きいこと、水蒸気爆発実験が不足しており未解明な部分が多いこと等が確認され、O E C D セレナプロジェクト2の必要性が報告された。

(3) 2014年レポート

従来行われてきた実験にはかなり大きな不備があることが確認され、クロトスとトロイによる各6回計12回の実験結果について報告が行われた。

セレナプロジェクトでは、メルトダウン時には外部トリガーが存在する可能性は当然にあるとの前提で実験が行われる。従って、上記12回の実験においても総て外部トリガーが与えられた。その実験結果が別表6である。水中での爆発圧力はトロイが最大25メガパスカル（MPa、約250気圧）、クロトスが最大44.7MPa（約447気圧）であった。

この実験の主要な目的は、解析コードの有用性の調査にあり、水蒸気爆発時のデータが必要なため、外部トリガーが加えられた。水槽の形状は水蒸気爆発の威力に影響するところ、クロトスとトロイはその形状がかなり異なっており、上記目的に適していた。

5. 技術的能力に係る審査基準

上述したように、上記審査基準の要求事項の解釈1.8〔解釈〕の1(2)aは「熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下を遅延又は防止するため、原子炉圧力容器へ注水する手順等を整備すること。」と定めている。しかるに、被告のMCCI対策では、原子炉圧力容器への注水は行われないことになっている。

次に記載する質疑は、第9回適合性審査会合（平成25年8月15日）における九州電力のMCCI対策についてのものである。（甲E6）

金子管理官補佐：炉心溶融を判断した後、容器が破損するまでに、このフローですと、原子炉容器に対して何も対策ってどうか、作業しないように見えるんですけど。

九州電力：全交流電源喪失という事象でさらに大破断が起きているという非常に厳しい事象でございます。・・・具体的に炉心側を守る手段が外にあるということに関して考えますと、・・・この条件内で炉心に大量の水を注入する設備がございません・・・。

金子管理官補佐：同時並行的に炉心を守る、原子炉容器を守るための作業というのは、手段としては一切しないということ

でよろしいでしょうか。

九州電力 : 全交流電源喪失という条件の下では炉心損傷を防止するためにとれる手段というのは、現状、無いというふうに考えております。

これは九州電力の答弁だが、被告も全く同様であろう。金子管理官補佐の質問には明らかな驚きと戸惑いがある。原子炉圧力容器を冷やすなど、メルトスルーを防止・遅延させるための措置を採れ、というのが新規制基準の要求である。平然と無視する電力会社とこれに狼狽えながら、許可してしまう規制委員会の産業界への配慮（あるいは政治的配慮）が垣間見える瞬間である。

6. 小括

軽水炉の安全性についての研究において世界的な権威である B. R. Sehgal 教授の編集による最新の報告書：Nuclear Safety in Light Water Reactors ; Severe Accident Phenomenology (Academic press, 2011) の中で、D. Magallon は次のように述べている。

「これまでの議論から、実機の中で水蒸気爆発が誘発されるか否かを予測することは事実上不可能であると結論することが出来る。このことは水蒸気爆発を防ぐ対策を明確にすることを非常に困難にする。実際、沸騰膜が支配的である様な冷却材の沸騰の状況にある、どんな熔融燃料と冷却材の混合物でも十分なエネルギーが供給されれば、水蒸気爆発が発生し得る。問題は、与えられた系や状況に関してどれだけのエネルギーがあれば十分か、また、実験系の中で水蒸気爆発を発生させるに必要な外部刺激のエネルギーが、原子炉事故での炉心熔融の間に生じる内部事象の中に見出せるかどうかを確かめることである。過去の研究は、このような点について結論が出ておらず、そして、FCI 研究についての現状から言って、近い将来においてもこの分野での研究の進展はほとんど期待できない。このことが、次のように考える理由である。即ち、水蒸

気爆発リスクについての現在の研究ではFCIがあれば水蒸気爆発は必ず起きると考える（即ち、発生確率は1）、そして、周辺の構造に関する結果を査定する。このことが水蒸気爆発に耐性を持つ構造をデザインし、さらに、それに応じて過酷事故処理戦略を明確にする助けとなる。」

ここには、どのような研究を行わなければならないかが具体的に指摘されている。水蒸気爆発の発生の危険につき、研究すべきテーマが明らかであり、しかし、その結論が出ていない現時点において、水蒸気爆発は起こらない、あるいは、無視していいほどその可能性は小さいと言い切ることは許されない。

最判平成4年は「原子炉施設の安全性に関する審査は、・・・原子力工学はもとより、多方面にわたる極めて高度な最新の科学的、専門技術的知見に基づく総合的判断が必要とされる」と判示している。

D. MagallonはOECDセレナプロジェクトにおいて、中心的役割を担っていた人物であり、彼が述べてところこそが、極めて高度な最新の科学的、専門技術的知見というものである。水蒸気爆発は起こらないという結論を導く知見は無い。

第4. コアキャッチャー

1. MCC I対策とコアキャッチャー

コアキャッチャーは、メルトスルーにより压力容器底部下部キャビティーに落下してくる溶融炉心をキャッチする耐火煉瓦製の受け皿である。コンクリートが溶融炉心と接触することを防止するためのコンクリート保護装置であり、同時に水素ガスの発生や再臨界の防止機能を備えた装置でもある。コアキャッチャーの設置により、水蒸気爆発の危険は容易に排除できる。コアキャッチャーの設置は今や世界の趨勢と言ってよい。

しかるに、我国では、メルトダウンもメルトスルーも有り得ないという安全神話の下、過酷事故対策を怠ってきた。この為、福島第1原発事故ではMCC Iが起り、放射性物質の環境への拡散という深刻な事態を招いた。こうして

初めて過酷事故対策として、新規制基準によりMCC I対策が定められたのだが、採用されたのはコアキャッチャーではなく、水蒸気爆発の恐れがある「熔融炉心を水プールへ落とす」という極めて荒っぽい方法であった。要するに、安全を無視して安価で簡単なMCC I対策が採用された訳である。

2. 世界の状況

チェルノブイリの事故でコア・コンクリート反応（MCC I）を経験したロシアは、早くから対策を考え、るつぼ型コアキャッチャーを開発した。ロシアは水蒸気爆発でもMCC Iでも、その研究と対策において、最先端を走っている。

他のヨーロッパ諸国でも水蒸気爆発への危惧の念は強く、MCC I対策として、主流はコアキャッチャーである。中国・インドもロシアからコアキャッチャー設備のある原発プラントを輸入する等している。水蒸気爆発が脅威でなければ、高い費用をかけて大規模なコアキャッチャーをつける必要などないはずである。日本は明らかに過酷事故対策後進国であり、世界の水準から遅れている。

第5. まとめ

1. 自発的水蒸気爆発

自発的水蒸気爆発は、トロイ実験において、発生している。温度測定に問題はあったが、過熱があった訳ではなかった。このことは、2003年レポート及び2007年レポートにより、理由を付して修正されている。

上記したところに対し、熔融温度が実機では有り得ないほど高温であったことを、電力会社あるいは規制委員会は根拠をもって反論していない。トロイ装置は韓国が建設を予定している新型原子力発電所建設の安全性確保のため開発した新鋭機であり、これによる実験はOECDセレナプロジェクトに選ばれるなど、十分な信頼性を持っている。

被告はトロイ10・12～14の自発的水蒸気爆発が実機では有り得ない高

温であったことを主張立証するべきである。

2. トリガー

何がトリガーになるかという問題は未だ解明されているとは言えない。被告は格納容器下部キャビティーにはトリガーになり得るものはないというが、それは、実験において外部から人為的に加えるトリガーと同じものが無いという趣旨に過ぎない。コリウム等炉心溶融物と近い疑似材料を使った実験は、数えることが出来る程度の回数しか行われていない。それで十分な知見が得られたとは到底言えない。

OECDはトロイ装置とクロトス装置を使って合計12回の実験を行った。その総てに外部トリガーを加えた。現実には発生する可能性の無い水蒸気爆発であれば、起こしてみても仕方がない。水蒸気爆発の可能性があるのでこそ行われた実験である。水蒸気爆発が起こり得るものであることを前提に、その対策を検討するべく、OECDはセレナプロジェクトを実施した。各国のセレナプロジェクトにおける評価も水蒸気爆発の危険を十分に認識するものである。

世界は外部トリガーを特定しないで、それでも水蒸気爆発は起こるとの前提でその防止策を考えている。これが世界標準の考え方である。

3. 新規制基準が定めるMCCI対策は、水蒸気爆発の危険を孕むものであり、それ自体合理性に欠け、また、被告の申請した水プール落下方式を容認した審査も合理性を欠く。さらに、技術能力に関する審査基準にも反する方法を容認した審査も合理性を欠いている。

原告らの安全は保障されていない。

以上

表 3-3 KROTOS 試験の主要な試験条件及び試験結果[3][4][5]

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー 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	

表 3-4 FARO 試験の主要な試験条件及び試験結果[4]

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	-

表 3-5 COTELS 試験の主要な試験条件及び試験結果[7]

試験名	試験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	-

表 3-6 TROI 試験の主要な試験条件及び試験結果 (1/2) [8] [9] [16] [17]

試験名	試験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガ-	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	-

(注1) 参考文献[16]によれば温度計測に問題があり、実際には3500K程度以上と推測されている。
 (注2) 参考文献[16]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

表 3-6 TROI 試験の主要な試験条件及び試験結果(2/2) [8] [9] [16] [17]

試験名	試験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
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	-	

(注1) 参考文献[16]によれば温度計測に問題があり、実際には3500K程度以上と推測されている。

(注2) 参考文献[16]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

Table 2. Main results of experimental tests - KROTOS and TROI-SERENA Phase-2 (*: rapid instrumentation failed for KS-5)

Test ID	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5	TS-6	KS-1	KS-2	KS-3	KS-4	KS-5	KS-6
Delivered Melt Mass (kg)	15.4	12.5	15.9	14.3	17.9	9.3	2.4	3.9	0.8	2.3	1.7	1.7
Melt Temperature (K)	~3000	3063	3107	3011	2940	2910	2969	3049	2 850	2958	2864	2853
Melt Superheat (K)	145	228	272	171	140	239	109	189	-	38	64	182
Melt Composition (wt%) UO ₂ ZrO ₂	73.4/26.6	68.0/32.0	71.0/29.0	81.0/19.0	76.0/18.3 5.0	73.3/18.5	70.0/30.0	70.0/30.0	70.0/30.0	80.0/20.0	80.1/11.4 8.5	73.0/20.4
Zr					0.7							
U												
Fe ₂ O ₃						4.9						4.1
FP						3.3						2.5
Water Depth (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Water Temperature (K)	301	334	331	333	337	338	302	333	332	332	327	340
Sub-cooling (K)	115.9	61.7	65.1	64.0	57.7	56.9	118	60	-	62	67	54
System Pressure (MPa)	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2		0.2	0.2	0.2
Fall Distance (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	-	0.8	0.8	0.8
Jet Diameter (mm)	50	50	50	50	50	50	15	10	30	30	30	30
Triggering Time After Release (ms)	939	875	.875	1 040	1 046	1 050	931	922	-	851	1127	1542
Location of Melt Leading Edge at Trigger Time (m)	~0.3	~0.4	~0.4	~0.4	~0.1	~0.4	0.5	0.0	-	0.0	0.0	0.0
Void at Triggering (vol %)	~4	~3	~2	14-24	12-34	4-10	6.7	27	1	6	16	12
Max. Pressure (MPa)	17	10	12	20	7	25	34.7	23.3	-	44.7	*	9.4
Impulse (N.s)	6640	>8000	~9000	>>9000	4680	>>9000	584	743	-	898	*	~0
Steam Explosion	S/E	S/E	S/E	S/E	Steam Spike	S/E	S/E	S/E	-	S/E	Energetic event*	Located S/E
Conversion Ratio (%)	0.12	0.28	0.22	0.35	0.06	0.66	0.10	0.08	-	0.18	-	~0