

過酷事故時の水蒸気爆発リスク対策において瑕疵がある

平成29年1月18日の原子力規制委員会による別紙3「九州電力株式会社玄海原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書（3号及び4号発電用原子炉施設の変更）に関する審査書」（以下、「審査書」）の193ページから194ページにおいて「水蒸気爆発が実機において発生する可能性」について以下のように述べている。

申請者は、原子炉容器外のFCIのうち、水蒸気爆発は、実機において発生する可能性は極めて低いとしている。その根拠として、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及びTROIを挙げ、これらのうち、KROTOS, TROI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すとともに、水蒸気爆発が発生した実験では、外乱を与えて液-液直接接触を生じやすくしていること、あるいは、溶融物の初期の過熱度を高く設定し、溶融物表面が冷却材中で固化しにくくさせていることを示した。さらに、大規模実験の条件と実機条件とを比較した上で、実機においては、液-液直接接触が生じるような外乱となり得る要素は考えにくいこと、実機で想定される初期の過熱度は実験条件よりも低く、冷却材中を落下する過程で溶融物表面の固化が起こりやすいことを示した。

加えて、申請者は、JASMINEコードを用いた水蒸気爆発の評価では、水蒸気爆発の規模が最も大きくなる時刻に、液-液直接接触が生じるような外乱を与え水蒸気爆発を誘発していること、融体ジェット直径分布として、0.1～1mの一様分布を与え、流体の運動エネルギーを大きく評価していることを示し、これらの評価想定は、実機での想定と異なることを示した。さらに、上記の水蒸気爆発に関する大規模実験の知見と実機条件との比較及びJASMINEコードにおける評価想定と実機での想定との相違を踏まえ、実機においては、水蒸気爆発の発生の可能性は極めて低いとする根拠を示した。これにより、規制委員会は、原子炉容器外のFCIで生じる事象として、水蒸気爆発は除外し圧力スパイクを考慮すべきであることを確認した。

そして、この「水蒸気爆発はほぼ起きない」との想定を根拠とし、審査書は、もし何かの原因で水蒸気爆発が起きた時に、格納容器が爆発損傷するかどうかの審議を放棄している。このことは、2017年2月22日に開催された佐賀県主催の玄海原発再稼働の武雄会場住民説明会の佐賀県の「書き起こし」に以下のように記録されている。

○質問者：つまり、その水蒸気爆発が起きるといふ最悪事態は想定

していないということですね。もう一度確認しますが、

- 原子力規制庁（市村原子力規制部安全規制管理官）：この原発については、水蒸気爆発が起こったときの影響の評価というものを審査の中で確認をしたものではないです。

原子力規制委員会は、玄海原発に過酷事故が発生し、メルトダウンをしたデブリ（熔融燃料）を大量の水で冷却しても、実炉では実験で使用したトリガー（引き金）は有り得ず、また水蒸気爆発も有り得ないので、水蒸気爆発が起きた時、格納容器が破裂するかどうかの検討はしていないとの見解を示した。

このような、玄海原発3，4号炉の適合性審査において、過酷事故時に格納容器が破損して、福島第一原発の過酷事故発生時の放射性物質放出量を超えるような格納容器破裂事故が有るか無いかの審査を行わずに適合性審査が認定された遠因は、新規制基準の策定に大きな抜け穴があったからである。

日本の新規制基準は「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」に原則が規定されているが、それを実際に施工するのは「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」であり、次のアドレスに掲示されている。

<https://www.nsr.go.jp/data/000069150.pdf>

IAEA の深層防護の第4層にあたる安全規則は、この規則のなかの第37条（重大事故等の拡大の防止等）で71ページから79ページに記載されている。そして、75ページに非常に重要な項目が以下のように規定されている。

(a)必ず想定する格納容器破損モード

- ・ 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）
- ・ 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
- ・ 原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用
- ・ 水素燃焼
- ・ 格納容器直接接触（シェルアタック）
- ・ 熔融炉心・コンクリート相互作用

この項目の中の「原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」とは、英文では、” Molten Fuel Coolant Interaction”，略してFCIである。FCIは、「圧力スパイク」や「水蒸気爆発」などの事象につながる。「水蒸気爆発」とは、水中に落下した熔融燃料が小豆（あずき）程度の粒径に成った時、何かの衝撃により周りの安定した水蒸気膜がはがれ、超音波を発生し、約1000分の1秒程度で10ミクロンほどの超微粉になるときに起きる爆発である。「圧力スパイク」とは、小豆（あずき）程度の粒径になった熔融燃料が周りの水と接触した時、水蒸気膜を通した大量伝熱で急激な水蒸気の発生が起き、1秒から3秒ほどで急激な圧力上昇が起きる現象である。

加圧水型原発を所有する電力会社の主張は、以下の通りである（注1）。

国内外の実験で水蒸気爆発が起きているのは、実験の為にトリガー（何かの衝撃）を与えたため、実際にメルトダウンが発生し、水中に2600℃程度のデブリ（熔融燃料）が100トン程度落下するときには、トリガーに成る物は全く有り得ないので、実炉での水蒸気爆発は起こり得ない。圧カスパイクは必ず起きることなのだが、圧カスパイク対策はMAAPのシミュレーションで格納容器が破裂しない事が証明されている。

IAEAの「(a)必ず想定する格納容器破損モード」には、「水蒸気爆発」が含まれているが、日本の新規制基準では「水蒸気爆発又は圧カスパイク」とし、水蒸気爆発対策は絶対に必要なわけでは無いとの抜け道を作っていたのである。そして、新規制基準には、水蒸気爆発対策の項目が無い、基本的な欠陥がある。

「九州電力株式会社玄海原子力発電所3号及び4号炉の発電用原子炉設置変更許可申請書に関する審査書案に対する意見募集等について（案）」に対して多数のパブリックコメントの提出があった。その中に、水蒸気爆発問題についてのパブリックコメントがかなりの数提出されている。

そのパブリックコメントに対して、平成29年1月18日、原子力規制委員会の「九州電力株式会社玄海原子力発電所3号及び4号炉の審査書案に対する意見募集の結果等及び発電用原子炉設置変更許可について（案）」の資料の別紙1に「九州電力株式会社玄海原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書（3号及び4号発電用原子炉施設の変更）に関する審査書（案）」に対する御意見への考え方が説明されている。

この資料の中で「水蒸気爆発対策問題」の考え方が説明されているが、殆どがパブリックコメントの論旨とは別の論旨にすり替えての考え方の説明で有り、審査書の正当性の説明が殆ど無い。

そもそも、熔融燃料－冷却材相互作用（FCI）は、複雑系に関わる現象であり、条件のほんの微小な変化により結果が大きく変わることが分かっている。審査書で述べられているような、KROTOSなど幾つかの「大規模実験」の結果で、FCIの全容が分かるわけではない。さらに「大規模実験」といっても、それは実機での過酷事故に比べれば、比較にならないほど小規模なものである。審査書で「実機条件」とか「実機での想定」が既知のものであるように論じているのは、ナンセンスである。

KROTOSなどの「大規模実験」とは比較にならないほど大規模な実機でメルトダウンを伴う過酷事故が起きたときには、何が起きるのかは分からないのが現状である。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) (注2) では、以下のように論じている。

FCIを引き起こしたメルトダウンの実際の状況では、水蒸気爆発を誘引する外乱や内乱があるかどうかは、これまでの研究では確定的なことは言えない。さらに、近い将来の研究でもこの点についての進展が期待できない。従って、水蒸気爆発についての現在の解析では、FCIがあれば水蒸気爆発が必ず起きると考えよう (p.265～266)

すなわち、この分野における専門家の国際的合意は、FCIを伴うメルトダウンの実際の場面（「実機条件」）では、「水蒸気爆発は必ず起きると考えよう」であるのだ。この点を考えれば、原子力規制委員会の審議ではこの点で瑕疵がある。

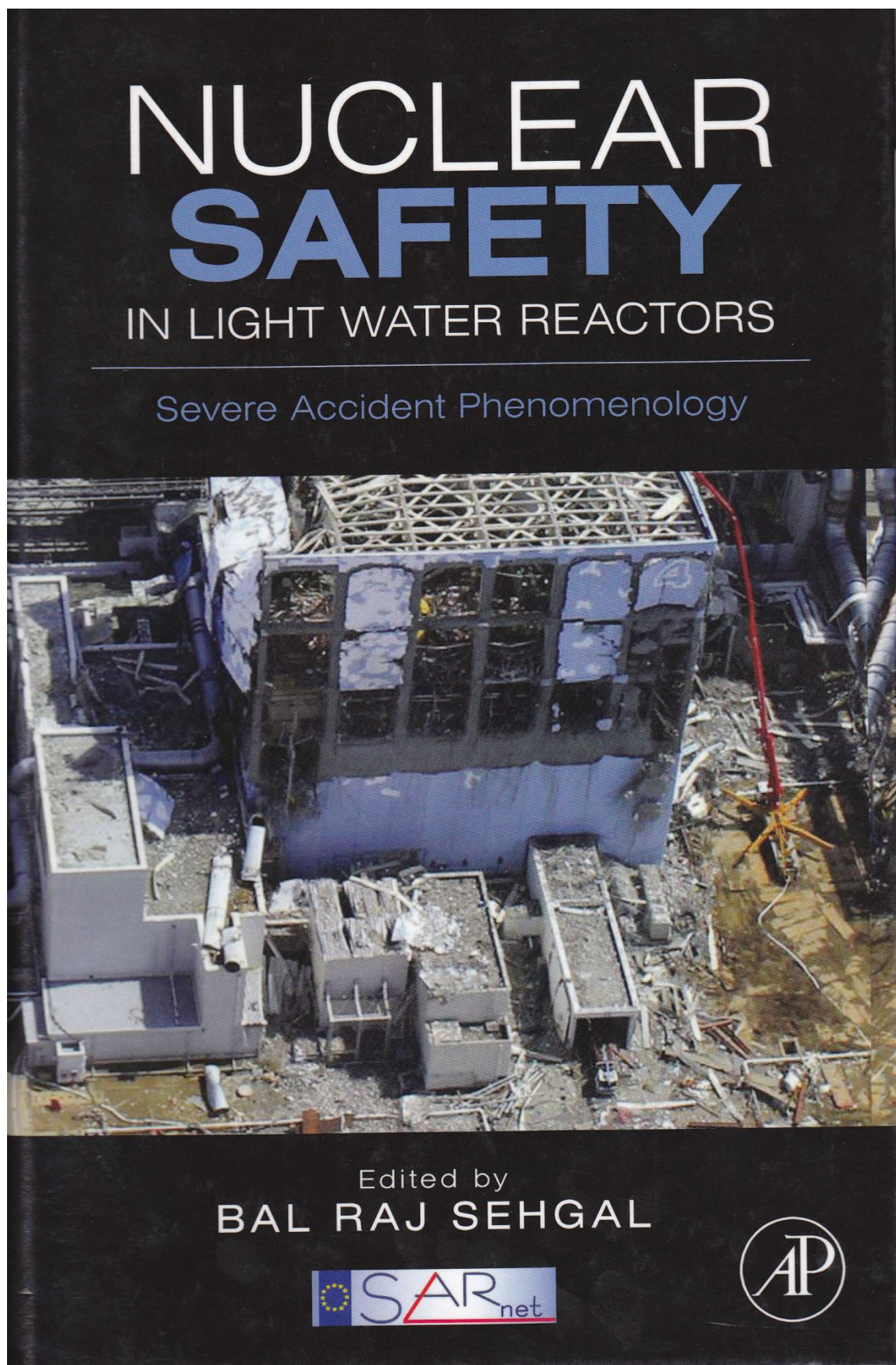
審査書では、溶融した炉心を水で張った格納容器に受けて冷却するという事故対策を容認している。しかし、この事故対策は、明らかに「液-液直接接触が生じるような外乱を与え水蒸気爆発を誘発する」ことに他ならず、この分野における専門家の国際的合意から判断して水蒸気爆発が起ることを覚悟しなければならない。爆発が起きれば、福島原発事故をはるかに越える放射性物質を環境に放出することになる恐れがある。このように過酷事故をさらに酷くする水蒸気爆発を誘発する恐れがある今回の審査書は、到底容認できるものではない。

以上のように水蒸気爆発リスク対策には、大きな瑕疵がある。

（注1）原子力規制委員会「第108回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合」（2014年4月24日）における資料1-2-7「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3部 M A A P）添付2 溶融炉心と冷却水の相互作用について」

<https://www.nsr.go.jp/data/000035733.pdf>

(注 2) 同書の表紙には以下のように福島事故の写真が使われている。



そして、その 3.3 節 軽水炉における水蒸気爆発（Steam Explosion in Light Water Reactors）における “Conclusion on Triggering”（p.265~266）において、以下のような文章がある（和訳をあとに付けている）。

From the preceding discussion, it can be concluded that it is practically impossible to predict whether or not a steam explosion will trigger in a real situation. This makes the definition of countermeasures to prevent steam explosions very difficult. Actually, any melt/coolant mixture involving high-temperature melt such that film boiling is the dominant boiling regime of the coolant may generate a steam explosion if a sufficiently energetic trigger is provided. The problem is establishing how energetic is energetic enough for a given system and/or situation, and whether energies of external triggers necessary to generate an explosion in experimental systems can be found in internal events occurring during core meltdown in reactor accident sequences. Past studies have been inconclusive in those respects, and, according to the present situation of the FCI research, little progress is expected in this area in the near future. It is the reason why present analyses of the steam explosion risk postulate that an explosion always occurs during an FCI (triggering probability equal to 1) and assess the consequences it may have for the surrounding structures. This helps to design structures that can withstand a steam explosion and define severe accident management strategies accordingly.

（和訳）

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、膜沸騰が支配的であるよう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うる。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、実験系のなか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。すなわち、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（すなわち、誘発確率は 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。