

第 145 回エネルギー問題に発言する会 座談会議事録

議事録 針山日出夫

日時 場所：平成 26 年 6 月 19 日（木） 16:00～18:00 @JANSI 会議室
座談会演題：「考証 福島原子力事故、炉心溶融・水素爆発はどう起こったか」
講師：石川迪夫氏
座長：宅間正夫
参加者：会員約 50 名

座談会趣旨『考証 福島原子力事故、炉心溶融・水素爆発はどう起こったか』
が出版され、福島事故の真相に迫る渾身の書として関係者で話題を
呼んでいる。今回はその著者である石川先生に登壇願ひ、この話題
の著作に込めた先生の思いなどを腹藏なく開陳いただき、事故の全
貌を理解し炉心/燃料挙動についての先生の実証的見識に学ぶ事が
狙いである。今回の石川先生の講演を拝聴するに際しては、眼目で
ある「炉心溶融」につき、ご著書を予め読了し、理解の素地につき
予習した方に限らせて頂いた。「炉心溶融現象」のメカニズム考証
は眼から鱗でした。

【座談会の概要】

石川先生からのお話の流れは、今般の著作/出版に当たっての前置きのと、
過去の各種実験による炉心溶融挙動についての実証的知見の要約説明とこれ
ら知見を踏まえた TMI 事故の実相考証の要点説明があった。その上で、福島
事故の事象進展について、炉心溶融と水素爆発に着目した考証の説明があっ
た。以下に説明項目と特記事項を列記する。

(1) 前置き

- 執筆の段階ではいろんな方から貴重なヒントを貰い、又、出版後の立花隆氏（週刊文春）の書評等有難い示唆や激励をいただき感謝している。（元東電 T 氏、M 氏、元東芝 M 氏、元日立 H 氏、元三菱 M 氏の実名を挙げて謝意表明あり）
- 今般の著作は、重大な原子力の事故とはいえ人様の発電所のことを他人が勝手に考証するもので、いわば他人様のお座敷に土足であるような心苦しさを感じていた。出版後に発電所のメーカ、電力関係者へ本の説明をさせていただき、ご理解頂いたこともあり漸く心苦しきから解放された所だ。
- 燃料挙動に造詣の深かった三島先生や大久保先生、また一緒に研究した内外の友達がこのところ相次いで亡くなった。残されたものの責任としてとして、事故時の燃料挙動についての過去の研究の成果と過去の事故事実を基礎に考えれば、東電に残された事故時のデータに基づいて事故経緯が説明できたので、出版したものである。

(2) 過去の実験による炉心溶融挙動の知見と TMI 事故の理解について

- TMI2 号機炉内状況：

溶融炉心は、卵の殻に包まれたような形で、もとの炉心位置に固化して残っていた。一部は横に流れて底に落下していたが、全てが圧力容器の中に留まっていた。制御棒案内管 (G/T) などがきれいに残存しており、事故による熱的な擾乱が(水蒸気爆発など)がなかったと判断。これらから、炉心溶融は金属水反応で静かに進展したと推定。

- 国内 NSRR、米国 SPERT での反応度投入実験等からの知見の総括：

□SPERT - PBF では Burnout Heat Flux の 5 倍の熱負荷で 15 分間実験。

この実験条件は、最大熱発生点では UO_2 ペレットの 80% が融点に達し、燃料被覆管の表面温度は約 $2000^{\circ}C$ と計算されていた。しかし軽水炉燃料は実験中その形態を保っていた。実験終了による炉停止で異常が起きた。ポンプ吐出圧が急上昇し、ループに多大の放射能が放出された。炉停止による急冷で燃料棒が分断したため。言い換えれば、バーンアウトに達しても軽水炉燃料は熔け落ちなかったのである。軽水炉は過酷な熱的環境でも極めてタフな設備といえる。

□NSRR 実験は、パルス照射である代わり、広い発熱条件下で数多い実験がおこなえる。軽水炉燃料を UO_2 の融点以上の高温にすると、粉々に噴出して水蒸気爆発を起こす。とろとろと液状に溶けるのではない。

それよりも少し発熱量が低いと、PBF 実験同様、バラバラに分断して崩壊する。その理由は、被覆管が高温になるとその表面に薄い酸化ジルコニウム(融点約 $2700^{\circ}C$)の被膜が形成される。次いで管内面にも、高温の UO_2 (融点 $2880^{\circ}C$) から酸素を奪って酸化ジルコニウムの被膜が形成される。被覆管ジルカロイは、この二つの酸化被膜に挟まれたサンドイッチ状態となる。さらに温度が上昇し、被覆管ジルカロイの融点 $1800^{\circ}C$ を超える状態となると、管本体のジルカロイは被膜の間で溶融落下し、所々に集まりを作る。このため円い燃料棒の形状は変形し、でこぼこした筋肉を持つ腕の様になる。一方、ジルカロイが溶融硫化した酸化被膜は、2枚の膜が1つになり、 UO_2 ペレットを薄いラップで締めつけたような作用をする。これが PBF 実験で、実験中燃料形態が保たれていた理由でもある。

酸化被膜は低温になると靱性を失いもろくなる。PBF 実験で、原子炉の停止に伴う急冷で燃料棒が分断したのは、酸化膜が収縮して破れたため、多くはペレットとペレットの間で分断することが NSRR 実験から分かっている。

□事故時の被覆管温度と燃料棒の状態(エネルギー添加量の増加により

燃料の変形が始まり脆性破壊で燃料棒の分断が発生することを詳しく説明)：～800℃で燃料外面に、～1200℃で内面に、酸化ジルコニウムの被覆形成。燃料棒外圧で被覆管は UO_2 に圧着される。ジルカロイの融点(1800℃)から被覆管温度約2000℃ぐらいでジルコニウム本体は液体状になる。(PCM-1の実験)

- TMIの事象推移についての説明：

TMIの炉心損傷状況を理解するうえでのキーポイントは、水ジルコニウム反応による発熱量が崩壊熱の約10倍以上であること。(崩壊熱は炉心全体の発熱であり部分的には少量。一方反応熱は水と高温の出合ったところでの部分的な発熱。この差を考えると、局所では100倍を優に超える発熱となり、 UO_2 を溶融させることもあれば、U, Zr, Oの三元素合金(融点約2200℃)をつくる原動力となる。この反応で出来た物(合金)が、薄い膜を形成して、更なる水と燃料材料の反応を阻止する。逆に見れば、燃料材料は、ジルカロイを中心とした合金膜に覆われて保護される。この保護膜の完成がTMIの卵の殻となって残った。

卵の殻の外表面は水で冷却される。内表面は崩壊熱が溜まって燃料材料を徐々に溶解し、溶融炉心を作る。

TMIでは、燃料温度が上昇した後、急冷による熱衝撃で、まず燃料棒はバラバラに分断。分断した口から溶融状態のジルカロイが水と接触し、発熱反応が始まる。この熱で酸化膜を中心とした合金膜(卵の殻)が生まれ、内部の燃料材料が反応熱により溶融。⇒同時に、水ジルコニウム反応で大量の水素ガスが発生。⇒炉心全体は卵の殻の中で、比較的安定な状況に落ち着く。軽水炉の過酷状況下における強靱性の証左と言える。

卵の殻の上にある燃料デブリは、殻に包まれ損なった、分断燃料の名残。 UO_2 ペレットもあれば、薄い酸化皮膜に覆われた分断燃料片、さらには多少の合金部分、などがある。この重みで、出来たばかりの柔らかい卵の殻の上面が圧され、内部の溶融燃料を横に押し流して、ステンレス鋼製の炉心バレルに接触して溶かしたと言われている。炉心溶融後、約20分くらい後の出来事である。

(3) 福島事故の事象進展について

—福島第一事故の事象経緯全般：

3月22日に仮設電源が敷設開始され、不安定な事故状態から脱出。6月頃に循環冷却設備が動き出してSC水の沸騰が停止し、事故はほぼ収束状態となった。

RCICの系統機能の説明、2号機の主パラメータの推移と炉心状況の進展説明。水が完全になくなり、炉心が灼熱状態になっても、注水が始まるまでの間

は燃料の崩壊は起きていない(データ上何らの変化なし)。注入された海水が炉心下端に達した時、燃料の分断崩壊が発生し水ジルコニウム反応で最初の炉心溶融発生(14日22時頃)。大量の水素が発生し、格納容器上蓋が押し上げられて、その隙間から水素が5F運転フロアーに漏洩。

2号機場合、減圧した直後(炉心温度が低下する)に注水ができていたら、炉心溶融は回避できていた。注水、約3時間遅れが、燃料温度を再上昇させた。

1号機並びに3号機事故進展の説明。詳細省略。

水素ガスが5F運転フロアーへ流入した道筋。

炉心溶融により発生した水素ガスは、格納容器上蓋のフランジ部分を押し上げ(温度上昇による締めつけボルトの伸び、および圧力上昇)、ボルト部に流れ込んで、5F床のシールドプラグを持ち上げて流入。

圧力上昇についての考察。事故時のDW圧力(容量6700m³)は約8気圧まで上昇し、この結果、フランジ部からの漏洩を考慮するとボルト部(容量約200m³)の圧力は、容易にプラグを持ち上げる静圧0.5気圧以上になる。1, 3号機の場合、水素を爆発させた着火源は、持ち上がったシールドプラグが落下した時の衝撃と推定している。なお、チェルノブイリ事故では、重さ1600トンの遮蔽プラグが、約10メートルくらいの高度にまで持ち上げられ、空中で1回転した事が確かめられている。

チェルノブイリ事故では火災(約1500℃)による余熱の影響があり、炉心部床コンクリート(約3m厚さ)の約4分の1象限が溶けた。福島では格納容器床コンクリートの温度は低く、鉄筋による熱伝導を考えれば、床が大きく溶融したことは考えられない。但し、床上に落ちた高温の炉心材料の塊の中で崩壊熱で溶け、低所に流れ出た事は考えられる。

<質疑応答>

(1) 炉心溶融と再臨界について

Q: 炉心が形状を保ったままかろうじて屹立していても、十字形の制御棒(BWRだから)は溶け落ちていて存在していない。そのような状況で水を注入して再臨界の心配はないのか。

A: 原子炉は元来余剰反応度が少ないようギリギリで臨界設計をしている。分断によって燃料形態が崩れれば、再臨界は、実際的にはほとんど考えられない。事実これまで、TMIも、福島も、いずれも再臨か臨界が形成されていない。

(2) 減圧注水と高圧注水システムについて

Q：先生は減圧後間をおかずに注水せよと仰るが、そもそも高圧注水システムの更なる信頼性アップを図るべきかと思うが、先生の御見解は如何か。

A：ご指摘の趣旨は理解するが、そもそもシビアアクシデントのために安全設計設備の増設などのグレードアップを図ることは、安全上余計な設備を加えて却ってプラント全体としての信頼性を損なうことにもなりかねない。この点を十分注意する必要がある。

(3) TMI 炉心崩壊図について

Q：TMI の炉心崩壊図は 30 年前先生が書かれた「軽水炉燃料のふるまい」の中の図とは違う。その後、TMI ではどのような技術を使って炉心崩壊プロセスを見直したのか？また、物が先にあって、計算機に頼るなどの先生のご意見の通りと思うが、もう少し説明して欲しい。

A：TMI の炉心崩壊図は、私が原研から北大に転職した後に知った。TMI のその後については十分に知悉していない。逆にご存じなら教えてください。従って、TMI の炉心状況進展図の解釈は自分の推定に基づくものである。

また、計算機問題については、計算機は事実を確かめるための補助的手段である。基本は現象の把握とそれに基づく工学的知見、判断が基礎であると考え。計算機は現象に合わせたチューニングが出来るが、それが誤っていれば全体を損なう。今回の事故説明がこれまで出来ていなかった理由はそこにある。計算機は、複雑な現象解明に頼るものではなく、あくまで補助手段である。

(4) 学会事故調とのマッチング

C：先月、学会事故調に事故調査結果を説明してもらった。是非、学会事故調とも意見交換して成果のマッチングを図ってください。

A：学会から声が掛かれば万難を排して協力を惜しまないし、これまで田中委員長とは折に触れて話している。

(5) 水素ガス爆発とバックグラウンド放射能

Q：水素ガスと FP は一体であると思う。どうして 2 号機の際に大きくバックグラウンドが上昇し、1, 3 号機の際はそれほどでなかったのか？

A：2 号機は S/C を介していない。即ち、ウェットベントの DF が如何に大きいかということとが一つ。また、2 号機では吹き飛んだブローアウトパネル部からブルーム(気流の塊)として、熔融炉心からの放射能が直接外部に放出されてしまった所為だと考える。

(6) 英訳版

Q：海外にもぜひ知って頂きたいと思いますが、英訳版の発行予定は？

A：そのように言って頂く方は多いが、翻訳に数百万円かかる事、また出版費用が必要な場合さらに数百万円が掛かるので、今の所目途は立っていない。

以 上