

福島第一原子力発電所 1 号機 格納容器内部調査写真からの随想推理

24.5.31 石川迪夫

要旨

福島第一原子力発電所の事故から 13 年が経った。米国のスリーマイルアイランド (TMI) 事故を含めて、これまで 4 基の軽水炉が、炉心溶融に加えて水素爆発を起こしている。中でも水素爆発は、安全審査の審議すら行われていない事項で、原子炉安全についての盲点でもあった。

僕はこの点に着目して福島事故を調べた。原子炉材料の中で、水と反応して大量の水素を発生させる材料は、燃料棒の被覆管ジルカロイが高温になった時だけだ。高温の燃料棒に冷却水をそそげば、表面にできた酸化膜が破れて、高温のジルカロイが直接水と接触して反応し、水素ガスの発生と大きな発熱を伴う「ジルカロイ燃焼」が生じることに気付いた。この反応を取り入れて福島事故を分析したところ、原子炉の水が減少して高温となった炉心に、冷却する目的で入れた水が炉心に達した直後に、炉心溶融と水素爆発が起きている事が全てに共通していた。事故の経緯説明も合理的にきるので、2014 年に、「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」と題して出版した¹⁾。

昨年 4 月、東京電力が発表した福島第一発電所 1 号機の格納容器内部の写真は、事故究明の材料となる痕跡を数多く提供しているが、その一つに、原子炉を真下から支えるコンクリートの壁（ペDESTAL）全面に渡って、床上高さ 1～2m ほど、奥行き深さ 50 cm 程が空洞化して、中にある筈のコンクリートの砂利はどこかへ失せて、鉄筋のみが残るという、前代未聞の壊れ方を写した写真があった。この壊れた壁は、压力容器内部に置かれた炉心から 15 m も下にあるから、壁を破損させた発熱は、原子炉の中で起きた炉心溶融で損傷したのではなく、炉心冷却の注水がペDESTAL 床上に落ちて溜まり、そこに高温の燃料棒が落下して、ジルカロイ燃焼を起こしたと考える以外に説明が付かない。ジルカロイ・水反応は水中発熱であるから、壁全面わたってほぼ同一の空洞を作ったのも、同時に説明できる。

ペDESTAL 床上に出来た空洞の写真は、1 号機事故の発生原因がジルカロイ・水反応にあることを証明してくれた。この証明は、1 号機より爆発時間の遅れた 2, 3 号機の事故原因が、ジルカロイ・水反応にある事の証明であり、広く信じられている崩壊熱による溶融でないことを裏付けている。崩壊熱により炉心溶融が起きると考えるのは、誤りである。

ジルカロイ燃焼の発熱は、温度が高く大量であるから、恐るべき災害をもたらすが、防止対策は存在し、その有効性が既に実証されている。この防止策は、事故により炉心が高温状態になった時に、冷却で炉心を急冷するのではなく、減圧沸騰で一旦徐冷した後に冷却水を入れて長期冷却に移るもので、ジルカロイ燃焼は生じない。それは、徐冷されることによって内部の被覆管温度が低下しているので、酸化膜が破れてもジルカロイは水と反応できないからだ。この知見を現行の LOCA-ECCS 指針に盛り込み、運転員に周知させれば、類似の事故は二度と起きなくなる。

目 次

1. 映像全体の概要.....	3
2. 三点の写真.....	4
2. 1 空洞写真.....	4
2. 2 ハウジングの落下状況.....	5
2. 3 突起状堆積物.....	7
3. ペDESTAL壁の空洞化は、どの様にして起きたか.....	9
3. 1 1号機事故の概要.....	9
3. 2 事故に関与したジルカロイ量.....	11
3. 3 事故に関与した水量.....	13
3. 4 ジルカロイ・水反応の特徴.....	15
3. 5 ジルカロイ酸化物の脆化破損.....	17
3. 6 ジルカロイ燃焼の防止法；徐冷.....	17
3. 7 圧力容器の破損に伴う炉内状況の変化.....	19
3. 8 ジルカロイ・水反応による1号機の破壊エネルギー量.....	19
3. 9 1号機の炉心溶融と水素爆発.....	20
3. 10 ペDESTAL壁の損傷と空洞.....	22
3. 11 3000Kの輻射熱.....	23
4. 写真からの随想.....	24
4. 1 福島事故におけるジルカロイ燃焼事故防止の実例.....	24
4. 2 溶融炉心は流れない.....	28
4. 3 ペDESTALの中の嵐.....	31
5. LOCA—ECCS 指針との関係.....	32
6. 結言.....	36
参考文献.....	36

1. 映像全体の概要

昨年4月、東京電力は福島第一発電所1号機の格納容器内部の撮影に成功し、写真を公開した。その状況はマスコミ各社から報道されたが、掲載写真が不鮮明でかつ説明内容が舌足らずであったため、その実体は理解できなかった。同様の思いの読者も多かったであろう。

そこで、東京電力（TEPCO）に依頼して映像の説明をお願いすると共に、撮影を実施した国際廃炉研究開発機構（IRID）社に出向いて、撮影の状況や苦労話をお聞きした。両社のご協力によって、映像の実体が理解できると共に、過去の原子力事故には現れなかった、珍しい災害状況を知ることができた。本稿は、これら写真の説明と合わせて、新しく分かった事実について述べる。

今回発表された写真は、1号機の格納容器ペDESTALの内部写真が主体である。その多くは既に発表された映像と類似のものが多く、中には思いもよらない驚き写真も少なくない。その説明に入る前に、ペDESTALという聞き慣れない用語の説明をしておく。（図1参照）

ペDESTALとは原子炉圧力容器を支える鉄筋コンクリート基礎の名称である。内径5mの円筒形の壁で、中心には分厚い円筒形の鉄板が配されている。ペDESTALは圧力容器の真下にある円筒形の部屋と考えても良く、ペDESTALの床から圧力容器の底までの高さは約8.5mある。ペDESTALの天井は圧力容器の底で、底には約100本の制御棒駆動機構のハウジング（覆い）が、整然と並んで取り付けられている。壁の中間には制御棒駆動機構を交換するための開口部があり、床には人の出入り口が設けられている。

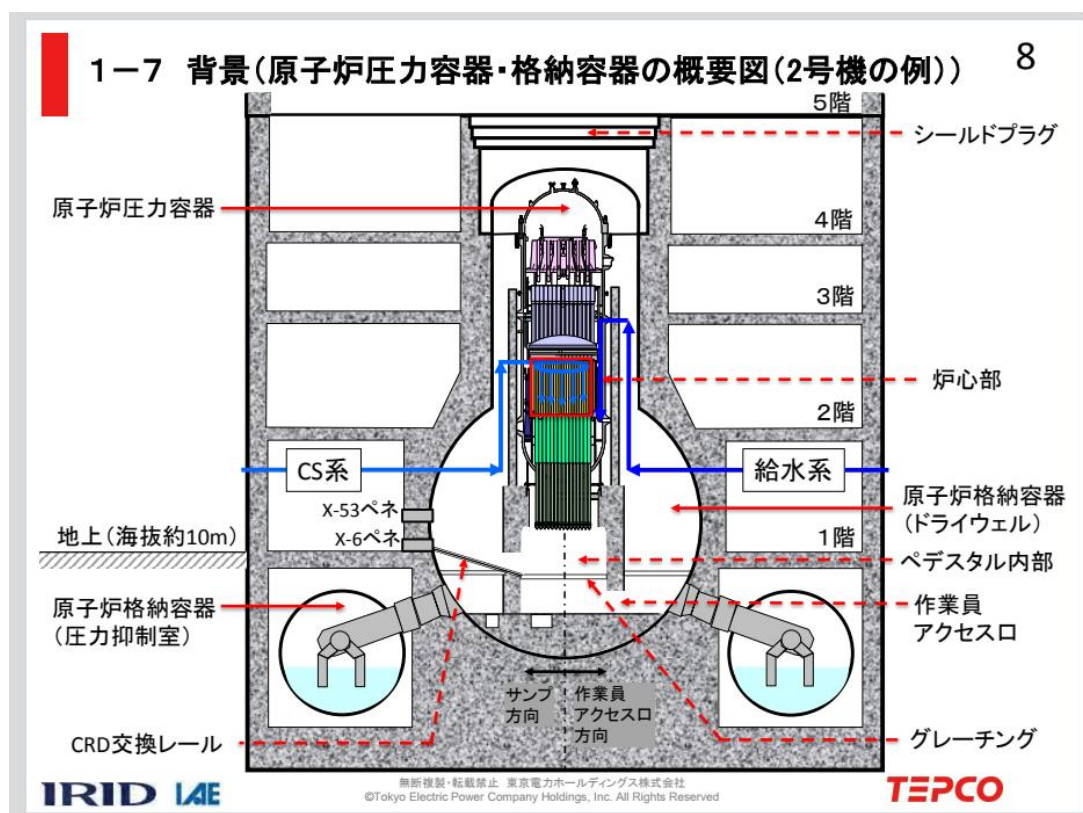


図1 原子炉圧力容器・格納容器の概念図

ペDESTALの外側はご存知の格納容器である。耐圧・密閉に作られた格納容器格納容器の間は、原

子炉に冷却水を送る再循環ポンプ室となっていて、大きなポンプを中心に配管や測定機器などが設置されている。

以上を簡単に纏めれば、BWR の格納容器は、原子炉直下のペDESTAL空間と、その外側にある再循環ポンプ室に分かれた、二重構造の造りである。従って、ペDESTAL内部を撮影するには、格納容器の外側に用意された入口からカメラ・ロボットを装入し、水中を遊泳させてペDESTAL床上の出入り口を通過して所定位置に到着させた後に、ピントを目標に合わせて撮影するのだから、大変な仕事だ。撮影に適した場所にロボットを誘導することが写真の出来を左右するから、操作の練度熟達で撮影の成否を分けるといえる。

今回見せて貰った写真は非常に鮮明で、マスコミに掲載された不鮮明な写真とは天地雲泥の違いであった。何故だろうか。

本稿に掲載した写真は、炉心溶融に伴って起きた破損状況が中心である。難点を言えば、遊泳ロボットが持つ照明能力に限りがあるために、狙った焦点の周辺は鮮明だが、焦点から少し外れると映像は薄くぼけ、遠い部分は真っ黒になっていることだ。写真に写っている部分には限りがあるため、以下論じる事柄は全てが正しいとは言えない。本稿の表題を「随想推理」としたのはこの故だが、中身は真面目な科学分析である。

今回発表された内部写真の中で、目を引いた写真が 3 点あった。それは、

- ① ペDESTAL外側の機械や壁に付着した突起状堆積物の写真（突起物写真）
- ② 原子炉を支えるペDESTALコンクリート壁の底部が全周に渡って損傷し、鉄筋が露出した空洞が出現している、ペDESTAL壁の破損写真（空洞写真）、
- ③ 制御棒駆動機構が形体を崩さずに、集団で落下したとみられる写真（落下写真）、

である。この写真 3 点は、福島事故で始めて起きた災害光景から選んだ、びっくり写真である。世界最初のびっくり痕跡であるから、その発生原因や理由については、十分な調査と検討をして欲しいと思う。

これから写真の紹介と説明に入るが、写真の発表者は東京電力（TEPCO）であり、撮影者は国際廃炉研究開発機構（IRID）であることを記して、謝意に換える。

2. 三点の写真

2. 1 空洞写真

写真 1 は、ペDESTAL床の中央にカメラを置き、事故で出来たペDESTAL壁の損傷、壁に出来た空洞を撮影した写真である。真ん中に写っている林立した白くて短い棒は、空洞に残る鉄筋の残骸である。中に有ったコンクリートの砂利は、そのほとんどが流出して、鉄筋だけが空洞に残っているのだ。これまで見た事のないコンクリートの壊れ方で、周囲に存在していた砂利は一体どこへ行ったのか、まだ分っていない。空洞は、床上高さ 1~2m くらい、深さ 50cm くらいの大きさで、ペDESTALの壁全面に亘って造られている。

なお、写真左下にある大きく四角い物体は不明である。

損傷した壁の高さは、1mとも 2m とも言う。だが、林立した鉄筋の長さから見て 2m もあるとは

見えないが、撮影に携わった全員が、空洞の高さは壁全面に亘ってほぼ一様であると言うので、破損高さは1~2m くらいと、曖昧なまま話を進める。



写真1 ペDESTAL内部空洞の写真

映像の説明はこれで終わりだが、壁の破壊理由について、少し考察を述べておこう。

破壊された壁の高さが全面に亘ってほぼ一様であるとの話から推して、破壊の原因は爆発とか叩き壊したと言った、物理的な力が作用した動的な破壊ではない。酸やアルカリに浸蝕されたように、液体が関与した静的な破壊に見える。

だが、格納容器の中には酸やアルカリと言った薬品類は一切なく、水すらも、原子炉の冷却水は全て蒸発してなくなり、12日朝5時まで、水は原子炉に一滴も入ってない。この間、原子炉冷却水が行った仕事と言え、安全弁から吹き出した原子炉の蒸気が格納容器のウェットウエルに入って貯蔵水を蒸発させて、格納容器圧力を6気圧程に上昇させた事だけである。原子炉の冷却水がペDESTALの壁の損傷に関与したとは考えられない。

損傷の原因は、12日午前5時46分より始まった炉心注水が流れ落ちてペDESTAL床面に水の溜まり、炉心から落下した高温の燃料棒と水との反応が起きて発生したジルカロイ燃焼の熱によって、壁面のコンクリートが損傷したものである。これについては、第3章で詳しく述べることとし、次の写真説明に移る。

2.2 ハウジングの落下状況

第二の写真は、制御棒駆動機構ハウジングの落下写真である。

1号機の制御棒駆動機構は約100本あるが、ペDESTAL内で確認されたハウジングの数は、壁周辺に寄りかかって立っている十数体に過ぎない。確認されたものではないが、炉心燃料の重量を支えていた炉心中央部の炉内構造物は高温の炉心燃料からの輻射熱で強度を失い、炉心燃料と共に下落す

るに従って、その熱で順次ハウジングは溶融されていったのではないかとと思われる。だがその証明は、後日を待たねばならない。

写真2は、制御棒駆動機構ハウジングが一本ずつ落下したと見られる写真である。ハウジングの背後にある黒色部分はペDESTALの壁面と註釈記載があるので、落下したハウジングは床上に転がっているのではなく、壁にもたれて立っている状態と推察される。この写真から、ハウジングの1本々が個別に落下したと見られる。1本々の落下ではなく、数本が一緒になって落下し、落下の衝撃でバラバラになったとも考えられるが、ここでは1本ずつの落下と見て話を進める。



写真2 制御棒ハウジングの落下写真

なお、制御棒駆動機構の長さは約4mであり、ペDESTALの内径は5mにすぎないから、長い制御棒に取ってはペDESTALは広い部屋ではなく、寸が詰まって転がり難い空間である。ハウジングが立っている理由は、こんな所に潜んでいるのかも知れない。

後述するが、ジルカロイ燃焼が生じた10分から15分くらいの間は、水素ガスの発生に伴う大嵐がペDESTALの内部で発生したと考えられている。壁に寄りかかったハウジングは、嵐によって吹き寄せられて集合したとも考えられる。これは第4章で詳しく述べる。

写真3は、3本のハウジングが一体となって落下したと見られる写真である。ハウジングの全長が写っていないので正確な判断とは言えないが、ハウジングの底を形成する盲フランジ3枚がすべて同じ方向を向き、かつ同列に並んでいる事に加えて、3本のハウジングの間隔がほぼ同じで平行しているように見える事から、この一組のハウジングは相互の体形を崩さず、一体となって落下したと思われるのである。



写真3 3本一組で落下したとみられる制御棒駆動機構ハウジング写真

写真2と写真3を比較すると、ハウジングの落下状態の相違は、一目瞭然である。

もし写真3の集団落下が事実とすれば、これまで言い伝えられてきた炉心溶融についての定説——液化した高温の溶融炉心が圧力容器の中を流れ落ちて容器の底を溶かすという——原子力の常識が崩れる。圧力容器の底が溶融したのならば、制御棒は溶けた所から一本ずつ個別に脱落していくはずだから、3本の制御棒が形体を崩さずに一体となって落下すると言う説明は出来なくなる。

仮に、底板が完全に溶融していない状態であったために、3本一組となって落下できたと仮定しても、圧力容器の底からペDESTALの床までは、高低の差が8mもあるから、高温で柔らかくなった底板が落下の衝撃に耐えることは考えられないから、3体一組の形状が正常に保たれたまま残るということは考え難いのである。

また、途中までしか落下せず、途中でハウジングの支持構造物等の構造物にぶら下がっているとしたら、溶融炉心はこれらのハウジングも溶かしたはずだし、溶かすまでいかにくても、表面に溶融した炉心燃料が付着しているはずであるが、そのようなものは表面には観察されない。

3本一組の制御棒の落下写真は、上述の様に、従来の炉心溶融についての定説を覆す可能性を持っている。この問題は4.2節で更に詳しく述べるが、輻射熱の大きさから考えても、溶融炉心が流れて落下するというこれまでの定説は、誤であると僕は思っている。

2.3 突起状堆積物

先ず、写真をご覧頂きたい。

ペDESTAL出入り口の外側に出現した突起状の堆積物である。格納容器の内部には、この様な堆積物が数多く存在して、壁や機械類に付着していると言う。その中で最も有名なものが、突起状堆積物と名付けられた写真4に示す堆積物である。



写真4 突起状堆積物の写真

突起状堆積物は、まるで生えているかのように、壁から水平に突きだした突起である。突起は、酸化物で出来たと思われる多重の層で、層の中には多数の小穴が点在している、軽くて脆いものらしい。写真にあるように、格層は洋菓子のケーキのように着色している。突起状堆積物の場合、最上層が白色、真ん中は分厚い灰色で、下層は黄色い層が部分的に付着している。厚みは、層全体で数 cm もあろうか。

この様な腰掛け茸を連想させる棚状堆積物は、格納容器の中では随所に見られるという。堆積物の化学分析がまだ行われていないので、何者であるのかは今の所不明だ。

分析前の不確かな憶測を述べると、棚状堆積物の出自は、セメントが持つ化学物質や格納容器内の機器を覆う保温材などが、高温の熱で溶たり分解して灰汁と化し、格納容器床に溜まった水中で比重による層分離を起こし、化学反応を起こした上澄み液が冷えて出来上がったのではないかと想像している。

廃炉を経験した者としての注意を述べておくと、これらの堆積物は、格納容器の廃炉工事が始まれば真っ先に処理・処分されるものである。堆積物は、放射性物質の多い格納容器の中で水が関与して誕生したと考えられる物体であるから、その内部には有害な放射能が多量に含まれていると考えられる。

写真4に見られる様に、突起状堆積物に穴が沢山みられるのは、生成の途中に大量の水素ガスが混入した痕跡と思われる。後述する様に、水素ガスは炉心溶融を引き起こしたジルカロイ燃焼により発生したガスであるから、天然には存在しないアクチニド元素を含んだ放射能で、強く汚染されていると考えて間違いはない。再処理工場と同じように、人体に対して強い毒性を持つと想定されている汚染物質と考えて、取り扱うしかない。十分に注意して取り扱う事だ。

これまでに会った諸外国の、厳しい放射線作業経験者の幾人かから聞いた話であるが、汚染の高い格納容器内の廃炉作業は、使い勝手の悪い放射線防護服や過重装備の着装を出来るだけ避けて、可能

な限り軽装で、素早く作業を実施する事が、有害な被曝を最も少なくする望ましい作業方針である、と話していた。

経験の少ない堆積物の取り出しに際しては、その毒性や汚染状況を、作業の前に十分に調査して、作業が素早く行えるような準備と訓練を十分に施した上で、実施して欲しい。

3. ペデスタル壁の空洞化は、どの様にして起きたか

ペデスタルの破損写真について、我々は独自で検討を試みた。その結果、ペデスタルの損傷は、ペデスタル床上におきたジルコニウム・水反応の発熱によると、確信するに至った。

注意しておきたい事は、1号機の炉心位置からペデスタルの床上までは、約15mの大きな落差があることである。この15mもある落差を越えて、圧力容器の中で起きる（と言われている）炉心溶融と、ペデスタル床下の壁の損傷がどう結びつくのか、この謎解きが本章の目的であり、福島原子力事故解明の鍵となる。本章は、その謎解きと、定量的な分析を行う。

なおこの謎解きの過程で、福島2、3号機、並びにTMI事故の炉心溶融並びに水素爆発の過程もより明確となったので、それも随所で触れる。

当然の事ながら、事故解明を行っていると、事故記録の不明確な部分にぶつかる事が多い。事故解明を試みるには、それら不明な部分を出来るだけ明確にする必要があるが、事故最中の繁多な作業の中で、連絡間違いや操作の記入漏れなどが起きるのは、止む得えない事であろう。だが、これによる間違いや不正確な事柄は訂正しておかねばならない。加えて、原子力関係者がこれまで等閑視してきた、被覆管材料のジルカロイと水の間に生じる大きな発熱を伴う化学反応、ジルカロイ・水化反応の説明も必要である。

この説明や事情解説のために、多くの紙幅を要とした。難しい話ではないのだが、読者には始めて見聞きする事が多いので、本論に入るまでの説明が長くなる。だが読者が、本論に入る前の説明で、読み草臥れて終っては何にもならないので、本章では結論を先に述べて、説明を後にする書き方を多く採用した。

読み通して貰うための配慮であるが、通例を破って、結論を先行する失礼をお詫び申し上げる。

3. 1 1号機事故の概要

本章は、「空洞化」を作った現象説明が主体である。

結論から先に述べると、ペデスタル壁の空洞化の原因は、ペデスタルの床に溜まった水に、高温の燃料棒が落下して発生した、激しいジルカロイ燃焼の発熱である。

以降はその説明であるが、なぜ原子炉の事故が15mも下に離れたペデスタルの床壁に損傷を及ぼしたのか。それには、事故時の炉心状況の変の把握と、その変化を追いながらの謎解きが、自ら答えとなる。従って、1号機事故の概要と、炉心からペデスタルにいたる間の内部空間の構造について知っておかねばならない。

まず、1号機の事故経緯を表1に示す。

表 1 1号機の主要な事故経緯

1. 地震発生：3月11日14時46分、
震度、マグニチュード9.0——原子炉緊急停止
イソコンによる原子炉冷却の開始、14時52分
津波襲来、15時27分頃——全電源喪失発生
停電によるイソコン停止
(停電の回復：3月20日頃)
1号機は、全電源喪失に続く、緊急炉心冷却系の不作動と考えれば良い
2. 1号機の冷却状況
原子炉の水位
11日18時頃——炉心頂部
20時頃——炉心下部（炉心温度上昇）
24時頃——炉心の水なくなる（炉心・輻射冷却のみ）
（格納容器圧力0.6MPaに上昇）
空っぽ炉心
12日2時半頃——原子炉底のクリープ破損発生
原子炉圧力低下、格納容器圧力上昇（約0.85MPa）
12日5時頃——消防車による原子炉へ試験注水（6回、1トン/回）
（格納容器圧力0.8MPaに一時上昇）
12日9時——消防車による原子炉注水（2回、75トン）
（格納容器圧力0.75MPaから上昇気味）
12日14時半——崩壊熱とジルカロイ・水反応により炉心温度上昇
燃料棒の落下、ペDESTAL床上で、ジルカロイ燃焼の発生
15時36分——原子炉建屋の水素爆発

津波で全電源喪失状態となった1号機は、炉心冷却のための水の補給が出来なかったため、事故当日の11日の深夜には、原子炉の水は全て蒸発してなくなり、原子炉圧力容器は文字通り空っぽになっていた。炉心の冷却は輻射熱の放熱のみとなり、炉心に発生する崩壊熱によって炉心温度は徐々に上昇して、12日午前2時半頃には、圧力容器の底は、後述する高温クリープ破壊を起こして破れ、底に穴が開いた。破壊時点での炉心温度は、高温部分では2000℃を少し越えていたであろう。なお、この時点での崩壊熱は、原子炉出力の0.6%程度まで低下していた。

2000℃の炉心高温部が放散する輻射熱を受けて、圧力容器内部にあるステンレス鋼製の炉心構造物は、溶融したり、変形したりし始めていた。溶融した炉内構造物などは、圧力容器の底に流れ落ちて、高温となった圧力容器底の荷重を増加させて、クリープ破壊を起こす原因となった。

炉心直上に配備されていた炉心スプレー配管も同じで、2000℃の炉心輻射熱を受けて溶融したり変形したりして、仮に原子炉に水が送られても、満足にスプレー水を炉心に放散する状態ではなくなっていた。

午前5時頃、東京電力は消防車を使って、空っぽの原子炉への送水を開始した。送水には、上記の炉心スプレー配管が使われた。詳細は後に譲るが、炉心スプレーとして注入された水約21トンは、そのほとんどが壊れた配管から外に流れ出て、圧力容器の壁を伝って流れ下り、壊れた容器の底を通ってペDESTALに流れ落ちて、床上に水溜まりを作ったと考えられる。配管の壊れた炉心スプレーは、炉心を冷やすという本来の目的を果たせなかった。

だが、この床上に溜まった水が、後述のペDESTAL損傷の原因となるジルカロイ燃焼を引き起こし、1号機爆発を起こした水素ガス発生のもととなった事は、記憶に留めておいて欲しい。

3. 2 事故に関与したジルカロイ量

ペDESTAL壁の損傷原因はジルコニウム・水反応であるから、反応に関与した水とジルカロイの量は詳しく調査をして、ある程度の目安を持たねばならない

先ず、ジルカロイの量から。1号機の炉心には、二酸化ウラン（ UO_2 ）燃料を内蔵した被覆管とチャンネルボックスを合わせて約32トンのジルカロイを内蔵していた。だが、このジルカロイの全量が反応に使われたかと言えば間違いである。その推定には、一寸した考察と計算を必要とする。

原子炉の底が壊れた12日午前2時半頃、炉心中心部の高温部分の温度は 2000°C を越えて、 UO_2 ペレットも幾分柔らかくなっていたであろうと考えられる。燃料棒の長さは4mもあるから、柔らかくなり始めた中心部分のペレット（長さ1cmくらい）は、その上に積まれた数多くのペレットの重みで幾分変形して横に膨らみ、隣あった燃料棒同士が接触するに近い状態になっていたであろう。この燃料の膨らみは時間と共に徐々に増加して、中心部分は接触・合体して変形し、炉心外周部にある温度の低い燃料集合体とは別に、輻射熱の放散によって下部にある炉心支持板を徐々に溶かして、圧力容器の底に向けて緩やかに降下し始めたと思われる。緩やかな降下の原因は、下部支持板を支える制御棒ハウジングの存在である。これが、11日深夜から、12日2時半頃までの炉心内の変化だ。

なお、炉心を支えている制御棒駆動機構や制御棒ガイドチューブなどは、熱容量が余り大きくないので、降下する高温燃料棒の合体との接触によって、ゆっくりと熔融していったと考えられる。

高温の燃料棒が降下すれば、水がなくなって空っぽになった圧力容器の底部に降りそそぐ輻射熱は増大する。圧力容器の底部温度は上昇し、 1000°C を越えたと推定される。降下して来る燃料に、制御棒、制御棒ガイドチューブ、炉心支持盤などの熔融物の重量も加わって、温度が上昇した圧力容器の底はクリープ破損をするに到ったと考えられる。これが、12日2時半に生じた圧力容器の破壊である。

なお、3本組の制御棒を下方から写した写真は、制御棒の背面が真っ黒であった。写真撮影者によれば、圧力容器底の破損部の中まではロボットからの光が届かぬので、背後が真っ黒になるとのことであった。圧力容器の底が破れて、ある程度の大きさの穴が開いたと考えて、間違いないであろう。

多くの読者は、崩壊熱によって溶けた炉心が圧力容器の底に流れ落ちて、容器の底を溶かしたと聞いているであろうが、残念ながらそれは間違いである。熔融した炉心が流動、流下したのは、融点の低い金属燃料棒を用いた開発初期の研究用原子炉に起きた事故の知見にはあるが、その記憶がトラウマとなって原子力関係者の頭の中に残渣として残っていて、融点 2880°C の UO_2 燃料炉心も、融点 600°C の金属燃料と同様に、熔融すれば溶けて流れると思ひ込んでしまった。僕も、昔はそう教えられたのだから、人ごとの話ではない。

融点の高い UO_2 炉心が熔融した時の、輻射（放）熱の大きさについて考慮を払わなかった事によるうっかりミスで、基で言えば大ボカの類いである。

UO_2 炉心は高温時の輻射（放）熱が大きいので、仮に UO_2 燃料棒が溶けて液化しても、流下すれば発熱源から離れるので、輻射熱の放散によって冷えて直ちに固化する。流動しながら落下するとい

う、水の流れの様な現象は、我々が住む低温世界では生じる現象であるが、融点 2880℃の高温世界では生じない。この点については、4. 2 節で詳しく述べるが、熔融炉心の流動・流下は、UO₂ 炉心では起きないのだ。

さて、炉心全体から分離した高温燃料部分は、压力容器底の破壊によってペDESTALの床上に落下した。压力容器の底からペDESTAL床までの距離は約 8m あるから、落下の衝撃で燃料棒はバラバラになって床上に飛び散ったと思われる。

一説には、温度が 2000℃を越えると、UO₂ 燃料はジルカロイ被覆管と溶着し合って、U、Zr、O の三元素共晶体（合金）になるとも言われている。この問題は、専門家の判断を待つ以外にないが、いずれであれ、炉心高温部分がペDESTAL床に落下したことに変わりはない。

この落下時刻は1 2 日朝の 2 時半だ。1 5 時半に起きた 1 号機の爆発までの間には、半日以上の間がある。飛び散った燃料棒であれ、三元素共晶体であれ、温度の低かったペDESTALの床や格納容器の雰囲気によって冷やされて、数時間後にはジルカロイ水反応を起こさないまでの低い温度（約 600℃）以下にまで下がったと考えられる。従って、先行落下した炉心の高温部分は、輻射（放）熱によって冷却し、ペDESTALの壁の破損には関与しないと判断できる。

とすると、爆発を起こしたのは压力容器内に残った温度の低い炉心燃料棒となる。この状態について、十分注意して調べておかねばならない。まず、残留した燃料棒の量だ。先に落下した高温部分を、平均温度より少し高い 1500℃以上の燃料、量的には炉心の 1/3 程と仮定して話を進める。

以上の仮定から、残留炉心の量は炉心の 2/3 となり、その温度は 1000～1500℃くらいの範囲となる。残留炉心の温度はそれほど高くないので、燃料棒の形体はまだ確りと保たれており、輻射熱で熱せられた暖かい压力容器の中で、元の形状のまま、元有った場所に存在していたと考えて良いであろう。敷衍すれば、先行炉心の落下によって炉心の中心部分の燃料が抜けたので、残留炉心の形状は同心円形状であつたろう。炉心形状の変化により、崩壊熱による温度上昇や輻射熱の放散状況には変化が起きたであろうが、炉心注水の始まる 5 時頃までは、変化の大きさはそれほどでなく、安定した状態が持続したと考えられる

なお、この時刻の崩壊熱は 0.6%にまで下がっているので、新たに高温部分を作る余力はなかったと考えられる。

残留炉心の仕事は、残留炉心内にジルコニウム・水反応を再発させる事にある。

断定的に書いたのは、反応の再発がなければ、1 5 時半の水素爆発は起き得ないからだ。これは事実反するから、残留炉心にジルコニウム・水反応が再発した事は間違いない。この再発にどれほどの燃料棒が関与したか、この検討から入る。

先に落下した高温部分の燃料棒はペDESTALの床上で冷えたので、除外される。次に、压力容器に残る燃料の測定のために 4～5 年前実施されたミュオン検査は、1 号機の炉心外周部分に燃料棒が残っている可能性に言及している。その燃料棒を全体の 1 割と仮定して除外すれば、ジルコニウム・水反応に関与した残留炉心の燃料棒は、炉心全体の 5 割強から 6 割弱と推測出来る。

炉心全体のジルカロイ量の総計は 32 トンであつたから、その 5 割から 6 割、重量にして 16 トンから 19 トンのジルカロイが水との反応に使われたと言うことになるが、以降の計算では、16 トンと仮定して計算を行う。

3. 3 事故に関与した水量

ここで、ジルカロイ水反応の相手役、炉心への注水量を確かめておこう。

東電の事故調査報告書（22年6月）には、炉心への80トンの注水を完了したと記載してあるのだが、発表された各種の公式レポートに記載の乱れがあり、いずれも明確でないので、どれを信用して良いか分からない。加えて、「3月21日まで注水はなかった」とのフェイク情報までが原子力界に飛び交う始末で、1号機炉心への注水量については東電の記録を全面的に信用する事が出来ないのので、後述する様に独自に推定して、その値を用いた。

なお、この随筆は、1号機への注水量を除いては、全て東電の事故報告書に基づいて考察・発表していることを述べておく。

ところで、上記フェイク情報を信じる人が原子力界にも幾人かいるらしいので、その人達に申し上げておこう。その人達は、12日の水素爆発を起こした水素が、どこから来たと考えているのであろうか。原子炉建屋を壊すほどの大量の水素は、ある程度大量の水がなければ作り得ない。21日まで注水が無かったと主張する人は、12日の1号機爆発を否定することに等しい。フェイク発表と書いたのは、現実にそぐわない主張であるからだ。

東電の事故調査報告書³⁾には、表2に示すように80トンの水を注入したとあるが、この水は、全てが原子炉に入ったのではない。水を注入したスプレー配管の途中には3ヶ所の分岐管があつて、原子炉圧力容器にどれだけ注がれたかは推量するしかない。

東電の1号機原子炉注水量報告書⁹⁾によれば、1号機の炉心に水が注入されたのが12日朝5時頃からで、消防車を使って、1回当たり約1トンの注水を6回行なっている。この注水は、試し運転と考えて良いであろう。午前9時15分より本格的な注水に移り、爆発直前の14時53分の注水停止までに注水を2回行なっている。その合計が74トンとある。

しかし、炉心への注水を急ぐために格納容器のベントを14時頃に開いたと書きながら、1時間後の14時53分には注水を停止しているのは、明らかに目的に反する操作で、注入量も定かでないが、注水目的も定かでなかった。調査するにも頼るべき資料が無いのだが、16年に東電が発表した1号機炉心への注水資料⁹⁾に消防ポンプの性能曲線などが添付されていたので、これらを使って推量したのが下記の注水量だ。これとて、信頼の置ける値ではないが、説明は可能だ。

我々が推量した原子炉圧力容器への注水量は、格納容器の圧力が約7.5気圧であった14時までの注水量が約14m³、1号機の格納容器ベントが開いた14時頃から注水を停止した14時53分までの1時間の注水量が約5m³で（生き残った圧力計データでは約5気圧）、合計約19m³の注水量となったが、経緯並びに仮定が不確かなので、炉心注水量は20トンと仮定して以降の話を進める事とする。

表 2 消防車による代替注水

イベント				最大注 水時間 (*1)	注水量 (記録)	最低消防車 吐出流量 (積算注水 量から算出)	解析消防車 吐出流量 (吐出圧力 1MPa から算出)	
No.		日時	操作	備考	(min)	(L)	(m³/h)	
注水 2	[a]	3/12 5:46	注水開始		6	1,000	10	28.5 (注水中)
		5:52	注水停止	1,000L 注水完了				
	[b]	5:52	注水開始		(38)	1,000	>1.6	
		6:30	注水停止	1,000L 注水完了				
	[c]	6:30	注水開始		(85)	1,000	>0.7	
		7:55	注水停止	1,000L 注水完了				
	[d]	7:55	注水開始		(20)	1,000	>3	
		8:15	注水停止	1,000L 注水完了				
	[e]	8:15	注水開始		(15)	1,000	>4	
		8:30	注水停止	1,000L 注水完了				
	[f]	8:30	注水開始		(45)	1,000	>1.3	
		9:15	注水停止	1,000L 注水完了				
	[g]	9:15	注水開始		(25)	15,000	>36	
		9:40	注水停止	15,000L 注水完了				
		9:40	注水開始					
	[h]	14:53	注水停止	80,000L (累計) 注水完了	(313)	59,000	>11	

ではこの 20 トンの注水は、原子炉の中で何時から行動を起こしたのであろうか。

1 号機の原子炉圧力容器の水が全て蒸発したのが 11 日の深夜、圧力容器の底がクリープ破壊したのが午前 2 時半、約 7 0 気圧有った圧力容器の圧力は格納容器圧力の 7.5 気圧にまで減少している。原子炉に注水を始めたのが 5 時頃、注水前の前の原子炉状態は以上の様な状況にあった。これから述べる本格的な注水 75 トンが、2 回に分けて始まるのは 9 時 15 分からだ。

以降は本格注水についての状況の再確認である。炉心直上にある炉心スプレー系統の配管類は溶融・変形して、20 トンの水のほとんどが炉心に届かず、壊れた配管から圧力容器の壁を伝わって流下し、ペDESTAL 床に溜まって行った。この溜まり水が、15 時半に起きた水素爆発の元凶で、ペDESTAL 壁の損傷の主役であることも、既に述べた。

なお、ペDESTAL と格納容器の出入り口の床は、同一のレベルで繋がっている。このため、ペDESTAL に降りそそいだ 20 トンの水は、格納容器の床にも流れ出て溜まる。そのため、ペDESTAL に溜まった水の深さは 25cm ほどとなる。この水量と水深は、今後の謎解きに使われるので、記憶に止めておいて欲しい。

3. 4 ジルカロイ・水反応の特徴

いよいよ本論の、ジルカロイ・水反応の話となる。3. 2 節及び3.3 節の検討から、反応に関与してきた水量は約 20 トン、ジルカロイ量は 16 トンであった。ジルカロイの組成の 98%はジルコニウムであるから、ジルカロイ・水反応は一般にジルコニウム・水反応として記述されている。

ジルコニウムのグラム等量は 91 g である。ジルコニウム・水反応の化学方程式は $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ であるから、16 トンのジルコニウムが全て反応すれば、反応に使われた水量は約 6.3 トン、発生した水素ガス量は約 0.7 トンとなる。

次に、ジルカロイとその酸化膜についての性質について述べる。

ジルカロイは、温度が低いときは極めて安定した合金であるが、NSRRの実験の結果から見て、燃料棒の表面温度が約 800℃程度に上昇すると水との酸化反応が顕著となり管表面は酸化膜に覆われ、銀色であったジルカロイ被覆管の表面は黒く変色する。これがジルカロイ・水反応の始まりである。

ジルカロイ・水反応という酸化反応自体は、一般金属の酸化反応と変わるところはない。だがこの反応並びに酸化膜には、大きな特徴がある。

その一番手が、反応熱の大きさだ。ジルカロイ・水反応の発熱量はべらぼうに大きい。ジルコニウム 1 モル (約 91 g) 当りの発熱が、586kJ (140kcal) もある。メノコ話をすれば、燃料棒の被覆管が全て反応すれば、その発熱で、中の UO₂ ペレット (融点 2880℃) は完全に溶けるという大きさである。

この大きな反応熱が、ペDESTALの壁に空洞を作ったのだが、それは後程。

ジルカロイの酸化膜 (二酸化ジルコニウム) は、特徴が多い。その第一は、酸化膜が非常に緻密であることである。燃料棒表面に出来た酸化膜は、管表面を流れる水や水蒸気の侵入をほとんど許さないほど緻密である。原子炉の燃料は、温度 300℃くらいの冷却水の中で沸騰を起こしながら 3 年ほど運転に使用されるが、薄い酸化膜に覆われた燃料棒の皮膜の厚さに変化はなく、3 年経っても被覆管表面の色に大きな変化は見られない。

だが、温度が高くなると、酸化反応は増大する (表 3 参照)。被覆管温度が 1500℃以上になると、酸化膜を通しての酸素侵入速度は著しく増加し、反応速度も上昇する。温度が 1800℃近くになると、反応熱がジルカロイ温度を上昇させ、その温度上昇が酸化速度を速めるといった、正の温度上昇状態が——と言うより悪循環が——ジルカロイ被覆管に生じる。こうなると、ジルカロイが燃え尽きるまで反応は継続し、短時間に大きな発熱が生じる。この発熱を爆発的なジルカロイ燃焼と呼ぶ人もいる。これが、ジルコニウム・水反応の発熱の特徴である。

ついですが、軽水炉の最悪事故と言われる大口徑破断冷却材喪失事故 (LOCA) の規制基準は、この悪循環を防止するために、被覆管表面温度を 1200℃以下と規定し、酸化膜厚さが被覆管の 15% 以下であることを要求している。この点については、5 章で述べる。

なお、第 3 表に、ジルカロイ温度と、酸化速度の関係を示す。

表3 ジルカロイ・水反応
(反応速度に及ぼす温度の影響)

温度 (℃)	ジルカロイ表面から 1mmが酸化する時間
1000	246h(約10日)
1100	87h(3.6日)
1200	36h(1.5日)
1300	16h
1400	8h
1500	4.4h
1600	46分
1700	25分
1800	14分
1852(MP)	11分

ジルカロイ被覆管温度が 1000℃の場合は、1mm のジルカロイを酸化させるのに 10 日を必要とするが、温度が 1800℃になると必要な時間は僅か 14 分である。これは酸化膜内での酸素の拡散速度が温度上昇と共に急速に大きくなることに起因している。

今一つの特徴は、酸化皮膜が非常に強靱な事である。その具体例として、米国の PBF-PCM 実験を紹介する。

PCM 実験は、原子炉の中で燃料棒表面温度を 2000℃近辺に加熱して膜沸騰状態におき、15 分間その状態を続けた。その間、被覆膜は破れず、少量の放射能が実験ループの中に漏れ出ただけであったという。酸化膜はこれほど強靱なのだ。その理由を僕は知らないが、酸化ジルコニウムの融点が 2700℃ほどもあり、UO₂ の融点に匹敵するほど高いことに由来していることが原因かも知れない。ジルカロイの酸化膜は融点が高く、強靱である。これも特徴の一つだ。

以上の様に、ジルカロイの酸化膜は緻密で、強靱で、融点も高い。従って、ジルカロイ被覆管は温度上昇に対して強く、事故時も強靱であると信頼されて、燃料の被覆管として使われてきた。

ところが、TMI 事故も、福島事故も、この強靱なジルカロイ被覆燃料棒を用いていたにも関わらず、炉心溶融を起こしただけではなく、全く予期していなかった水素爆発まで発生した。

問題が存在していたのだが、思考上の欠落によってそれが分からず、問題点が認知されないまま使われたために、原子力発電所の安全が損なわれた。

問題点とは何か、それがこれから述べるジルカロイ酸化膜が持つ弱点にある。

但し、この弱点は防ぐことが出来る。それも容易に。

防護策は設計上の対応ではなく、運転員による事故時の対応操作により達成されるものである。防護策を実行すれば、炉心溶融も水素爆発も、同時に防げる。ジルコニウム・水反応が起き得る状態が出現した時に、その状態を運転員が見つけて（これも容易である）、沈着に防護対策を実行すれば、事故は事故でなくなる。以下、数節にわたって、そのことについて述べる。

3. 5 ジルカロイ酸化物の脆化破損

一般に、酸化物は低温では脆いといわれる。例えば、乾物屋で売っている湯葉は脆くて壊れやすいが、お湯で暖めて本来の薄皮に戻すと、中に具を入れて煮炊きができる。湯葉は温度が高いと強靱となり破れなくなるからだ。ジルカロイの酸化膜も湯葉に似て、温度が 200℃ほどに低下すると脆くなり、壊れ易くなる。これがジルカロイの弱点であり、事故を起こした原因でもある。

原子炉を使った実験（炉内実験という）で、燃料棒をある程度の高温で照射したのち、放射能の強さを弱めるため時間をおいて取り出すと、UO₂ ペレットのつなぎ目で燃料棒が折れて出てくる事が多くある。燃料棒が冷えると、ジルカロイの酸化膜が脆くなるので、ペレットのつなぎ目で酸化膜が割れて、燃料棒が折れるのだ。これを我々は、燃料棒の分断と呼んでいる。

燃料棒温度を更に上昇させて実験すると、酸化膜の厚さが増すから、分断の数は多くなる。この実験例が示すように、ジルカロイの酸化膜は、冷えると脆くなり、壊れやすい。

軽水炉で使っている燃料棒は、UO₂ ペレットを被覆管に封入した構造であるから、原子炉の運転中は、被覆管は常に原子炉の圧力により圧迫されている。通常運転での被覆管温度は大体 300℃程度であるので特段の問題は起きないが、事故が起きて燃料棒温度が上昇すると、柔らかくなった被覆管は原子炉圧力によって圧迫されてペレットに密着し、その表面は黒い酸化膜で覆われる。このような状態の燃料棒に冷たい水に入れると、何が起きるか。

被覆管表面の酸化膜は水で冷やされて収縮しようとするが、密着した UO₂ ペレットに阻まれて収縮できない。このため、冷えて脆くなった管表面の酸化膜は、ヒビ割れを起こして破れる。この破れ目は、燃料を取り巻く水や水蒸気にとっては、高温のジルカロイと直接接触できる自由広場であるから、反応は一挙に増大して、急激な発熱が起きる。これがジルカロイ燃焼の出発点だ。

先ほど、酸化膜の厚さが大きくなれば燃料棒の分断本数が多くなると書いたが、これは酸化膜の破れと共通したことで、燃料棒が高温となり表面の酸化膜が厚くなるほど、冷却による酸化膜の分断も多くなる。後述するが、LOCA-ECCS の安全基準に、酸化膜の厚さを被覆管厚さの 15%以下に保つ制限条件があるのは、ジルカロイ燃焼の防止の基準といえる。

爆発的なジルカロイ・水反応の発生、これが今まで知られていなかった、——正確に言えば知られてはいたが、忘れられていた——ジルカロイの弱点である。水で冷やされると、燃料棒の表面を覆っている酸化膜が破れ、高温のジルカロイが水や水蒸気と直接接触できるので、激しい化学反応を引き起こす。以降この現象を一般のジルカロイ・水反応と区別して、ジルカロイ燃焼と呼ぶこととし、4. 4 節で詳述する。

3. 6 ジルカロイ燃焼の防止法；徐冷

ジルカロイ燃焼によって生じる水素発生量は非常に大きい。ペDESTAL の様な狭い空間では、それによる圧力上昇は想像を超える。この事については 4. 2 節で述べるが、先述の PBF—PCM 実験にも、その具体例が、実験に後続する事故物語りとして現れている。

実験を終えた PBF は、原子炉を停止して、実験ループに水を入れた。途端に、ループの内部の圧力が大きく上昇して、ループへの送水が一時停止した。燃料棒は粉々に壊れて、放射線高のアラームがループに発生した。運転員は驚愕したことであろう。ループを冷やすために水を入れたら、燃料棒

が壊れて、放射能が出てきた。指示されたこととは真逆の、燃料棒が壊れるという事故が起きた。

この PBF—PCM 実験は 1975 年頃に行われた実験であったので、その当時の知識では、事故に到った理由が分からなかった。だが、福島事故を経た今は分かる。

ループに冷水を入れたために、高温の燃料被覆管の酸化膜が破れて、爆発的なジルカロイ燃焼が発生したのが原因だ。激しい反応熱によって燃料棒は溶融し、ループに放射能が放散されたのだ。水素ガスの大量発生によってループの圧力が急激に上昇した結果、ポンプの送水が一時停止した。ジルコニウム・水反応は化学反応であるから、反応時間は短いが、発熱は大きく激しい。

高温の燃料棒を早く冷やそうとして、手順書通り冷水を入れたのが失敗で、ジルカロイ燃焼を招いたのだ。

ジルコニウム・水反応についての特徴——弱点と言っても良い——がもたらす悪戯は、ほぼお分かり頂けたであろう。冷水を入れると、酸化皮膜が破れるのが悪戯の原因だ。ここで、ジルカロイ燃焼の防止対策について述べておこう。

防止対策は、高温の燃料棒に冷水を浴びせないことだ。では、どうすれば良いのか。燃料棒をゆっくりと冷せば良いのだ。燃料棒を徐冷して、ジルカロイ温度を 500℃如何に下げた後から冷却水を入れれば、酸化膜は破れても、ジルカロイの温度が低下しているので、水とは反応しない。反応が起きなければ、炉心溶融は起きず、水素の発生もない。勿論、事故は起きない。これが防止策だ。徐冷されると、ジルカロイは悪戯が出来なくなるのだ。低温の被覆管と水が反応しないことは、日常の原子炉運転で、嫌と言うほど経験しているのではないか。それを実行すれば良いのだ。

ジルカロイの弱点は、被覆管温度をゆっくりと下げた（徐冷）後に、冷水注入を行えば克服出来る。これが事故防止方だ。事故となるか、防止できるかの分かれ目だ。確りと覚えて欲しい。

更に今一つ、注意を。

徐冷を行って燃料被覆管が冷えたことを確認したら、時間をおかずに冷水を入れて、原子炉の冷却を確実に長時間継続する事が必要だ。後ほど述べるが、福島の 2, 3 号機は、燃料棒の徐冷に成功しながら、注水が遅れて炉心温度が（崩壊熱で）再上昇したために、ジルカロイ燃焼が発生した。

徐冷を実行する前に、炉心注水の準備をしておく事が必要だ。徐冷後の冷却水注入がないと、福島 2, 3 号機の二の舞となり、折角行った徐冷が無駄になる。徐冷、温度低下の確認、炉心の冷却、この三位一体の動作がジルカロイ燃焼の防止方法だ。なお、この事は 4. 1 節でも再述する。

以降は余談だ。

ジルカロイは、酸素を欲しがる性質が強い金属であるらしい。添付した表 3 が示すように、例えば、温度 1000℃の被覆管を 1 mm 酸化させるには約 10 日を必要とするが、1500℃になると 4.5 時間でよく、1800℃では僅か 14 分で済む。温度が上昇するほど酸化反応が活発化する事は、前にも述べた。高温になると爆発的な燃焼を起す弱点は、表 3 に示されている。

ついでながら、UO₂ も酸素を欲しがる性質は強いが、ジルカロイの方がその性質はより強いらしい。このため、ジルカロイと UO₂ が接触する境界線付近では、ジルカロイが UO₂ から酸素を奪い取る形となり、ウランとジルコニウムと酸素からなる複雑な化学反応が起こるという。これがまた悪戯を引き起こすかどうか、余りにも専門的にすぎるので、解答は専門家に委ねる。

3. 7 圧力容器の破損に伴う炉内状況の変化

12日2時半、圧力容器の破損は格納容器圧力を6気圧から8.5気圧へと上昇をさせた。この2.5気圧の圧力上昇は、圧力容器の中に溜まっていた高圧蒸気が格納容器に吹き出して上昇させる圧力に等しいから、圧力容器が破損したと考えて間違いはない。この破損がもたらした原子炉の状況と、以降の格納容器内部の変化を調べておかねばならない。

非常用電源が全て停止した1号機は、事故時のデータが残っていない。従って、炉心注水が本格的に始まる9時15分までの原子炉状況は推測するしかないのだが、実は、奇跡的に生き残った格納容器圧力計が一つあって、大切な格納容器の圧力変化を残して呉れた。

上述の圧力容器の破壊によって圧力が8.5気圧に急上昇した事実もその測定記録である。格納容器圧力は、その後7.3気圧までゆっくりと低下して、5時頃に再び約8気圧に上昇して、また7.3気圧まで低下していたことを、記録として残している。手掛かりの全くない1号機の原子炉状態が、おぼろげながら分かるのは、この圧力計のお陰である。

5時という時刻は、消防車を使って1トンの水を炉心に注入した最初の時刻と一致する。圧力が8気圧まで再上昇したのは、小型のジルカロイ・水反応が炉心注水によって炉内で発生したのではないかと考えるが、この圧力上昇は時間を掛けて減衰していくだけで、支配的な変化を事故状況に与えたと思えないので、議論から除く。但し、この小さな変化が記録されていることで、生き残った圧力計の記録が信用できる事を伝えておく。

なお、午前5時に始まった約1トンの注水は6回、9時15分に始まった本格的な注水は2回行われているが、圧力容器の壊れた2時半頃から本格的注水の始まる9時15分までは、炉心の状態は大きく変わらなかったと推測される。

3. 8 ジルカロイ・水反応による1号機の破壊エネルギー量

炉心への注水は、事故状況に変化をもたらす。⊕

3.2節で述べたように、炉心に送られた水のほとんどが炉心の冷却には使われなかったが、炉心に配された全てのスプレー管が溶けて完全に塞がれた訳ではない。注水が始まると、塞がった配管の隙間から、幾つかの細流が吹き出したに相違ない。この水で冷やされた炉心燃料棒も多くあったであろうが、温度の高い燃料棒に吹きつけられた水は、逆にジルカロイ・水反応を復活させて、細々ではあろうが、燃料棒温度を高めたであろう。この様な燃料棒が幾組か存在した事に疑いはない。

随分と断定的に書いたのは、この注水によって、残留炉心にジルカロイ・水反応が復活したと考える以外に、1号機の水素爆発を起こした水素ガスの発生を説明する道がないからだ。

一旦ジルカロイ・水反応が復活すれば、元々崩壊熱で1000℃くらいには温度上昇していた燃料棒だ。反応の復活は、細々から徐々にへと活発化していったであろう。本格的な注水が始まったのが9時15分、爆発が起きたのが15時半であるから、6時間余りを掛けて反応はゆっくりと、炉心内の局所で、反応は活発化して行ったであろう。残留炉心の温度は、注水の始まった9時頃は1000℃を越える程度であったが、15時頃には1800℃前後までに達していたと思われる。

傍証に過ぎないが、午前5時に第1回目のテスト注水1トンを行った時、格納容器圧力が7.3気圧から8気圧まで上昇している。僕は、これを高温の燃料棒にジルカロイ水反応が起きたのではないか

と疑っている。この圧力上昇は継続せず、時間の経過と共に 7.3 気圧まで下がっている事を述べて、後学の研究を待つ。

ここで、ジルカロイ燃焼による破壊エネルギー量の計算をしておこう。

ジルコニウム・水反応による反応熱は、ジルコニウム 1 モル (約 91 g) 当たり 586kJ であったから、反応に寄与した 16 トンのジルカロイ (3. 3 節参照) が発生した総発熱量は、約 1×10^8 kJ となる。この総発熱量から、反応を起すために使われたエネルギー——例えば燃料棒温度を融点にまで昇温させるに必要な熱量——を差し引くと、事故で使えた破壊エネルギーの総量が求まる。

1 号機の UO₂ 燃料の総量は 80 トンであるから、事故に使われた 5 割の燃料重量は 40 トンである。残留炉心の初期温度を 1000℃と仮定すれば、UO₂ の融点 (2880℃) に達するまでの熱量は、比熱を 500J/kg℃として、約 4×10^7 kJ となる。この熱を差し引いた約 6×10^7 kJ の熱量が、事故で使えた破壊エネルギーの総量となる。

このエネルギーが、ペDESTAL内のコンクリートを破壊し、粒状化した砂利を開口部から外に吹き出し、落下した炉内構造物を溶融させるなどの破壊活動に使われたことになる。比較的大量のエネルギーが、狭い格納容器内部で消費し得た事が分かるであろう。

3. 9 1号機の炉心溶融と水素爆発

ペDESTAL内の水は、ジルカロイ・水反応を起こした途端に、水素ガスに変わる。このチェック計算の過程で面白い事に気付いた。

ペDESTALの内側に溜まった水は、深さ 25cm、約 5 トンであった。反応で使われたジルカロイは 5 割の 16 トンであったから、反応に必要とした水は 6.3 トンである。差し引き 1.3 トン、ペDESTALの床上に溜まった水は不足していた。反応での発熱量は大きく、水は沸騰したであろうから、この沸騰量も加えると、水の不足分はもっと大きい。

最初の内は、外側に溜まっている格納容器床上の水が流入して補ってくれると気楽に考えていたのだが、反応によって誕生した水素ガスの体積が余りにも多いことに計算で気付き、愕然とした。誕生した水素ガス量は、ペDESTAL容積の 400 倍もある。格納容器との出入り口を吹き抜けた風速は、後述するように平均で 50m/秒を越える強さであった。愕然としたのは、この風に逆らって格納容器床からペDESTALに水が流れこむのであろうかと言った類いの、疑問である。

後先になったが、水素ガス体積の計算から行っておく。

反応に使われた水量の 6.3 トンから、発生水素は約 700kg であるから、その体積は、常温常圧状態 (NPT 状態) で約 8000m³となる。この水素ガス量は、ペDESTALの容積約 200m³の約 40 倍、格納容器容積 6000m³の 1.3 倍に相当する。

上記の計算は、NTP 状態での勘定であるから、水素温度を発生時の約 3000℃と仮定すると、計算上の体積は約 10 倍増大して、水素ガスの総量はペDESTAL容積の 400 倍にもなる。それだけの気体が床上で発生して、狭い二つの出口から流出して格納容器に内部を駆け巡ると、大嵐と同じになる。

高温の水素ガスは、比熱が小さいから、周辺の物体により早急に冷却されるであろうし、ジルコニウム・水反応の時間は 10~15 分程度と予想されるので、嵐の激しさはある程度は緩和されるであろうが、ペDESTAL内での台風が強風であったことに相違はない。

もし、19 トンのジルカロイが反応したとすると、不足した水はもっと多くなり、嵐はもっと激し

くなる。1号機への注水は、意外に厳しかったのだ。

1号機でただ一つ働いていた忠義者の圧力計は、この大嵐で狂ったと思われる。1号機の圧力計データは、12日15時頃に短時間の急上昇を示した後、指示が途絶えた。この途絶えが、水素ガスの大量発生によるものか、3000℃の熱で計測器事態が壊れたのか分からない。翌13日の昼頃になると圧力計のデータ指示は回復しているが、図2が示す様に、6気圧付近からだらだらと低下しているだけで、何を意味するのか、判定は不可能である。

朝9時15分からの注水で始まった本格的なジルカロイ・水反応は、10分から15分程のジルカロイ燃焼の後、15時半の爆発により終了した。「始めちょろちょろ中ぽっぱ、赤子泣いても蓋とるな」とはご飯を炊く時の教えだが、1号機のジルカロイ燃焼にも当てはまる歌だ。

第一部 炉心溶融・水素爆発はどう起こったか

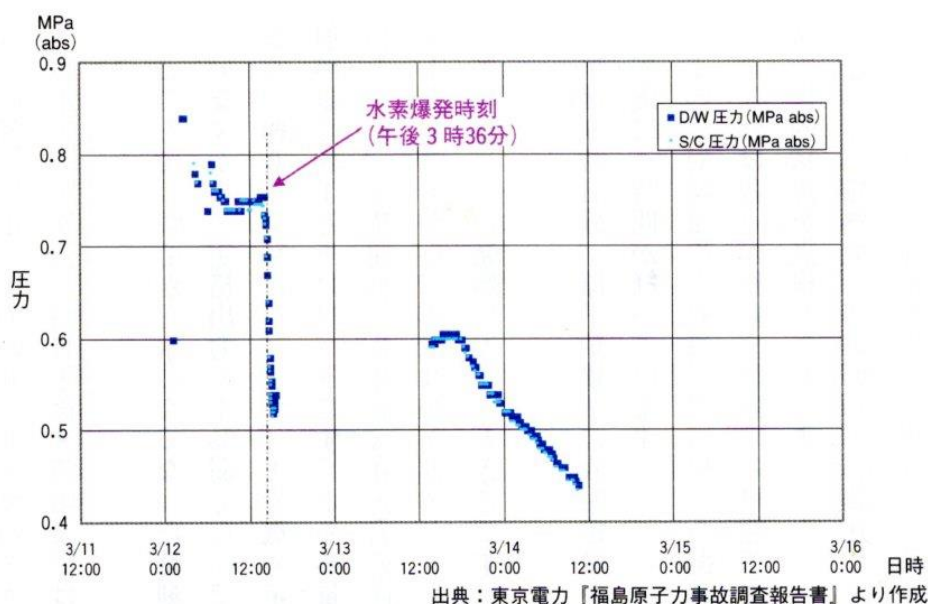


図2 1号機の格納容器圧力の変化（測定値）（参考文献1の図1.2.23より）

朝5時頃の1トン注水で始まり、原子炉内で暖められていた残留炉心の燃料棒で「ちょろちょろ」と再開したジルコニウム・水反応は、9時15分から始まった本格的な注水の継続によって徐々に広がり、燃料棒の分断が始まる程度にまで炉心温度を上昇させたのが「中ぽっぱ」だ。この状態が過ぎると、高温となった燃料棒は、時折、水の溜まったペDESTAL床に落下して、小型のジルカロイ燃焼を起していたかも知れない。

この状態が活発化して、本格的なジルカロイ燃焼が始まったのが、15時頃だ。その頃、ペDESTAL床上の溜まり水は25cmほどの深さにまでなっており、落下してきた燃料棒に燃焼を起こさせるには十分な水深だ。残留炉心内の燃料棒温度は1800℃近くになっていたであろう。次々とペDESTAL床上の水溜まりに落下して、燃料棒表面の酸化被膜は水によってヒビ割れて、床上の水溜まりでジルカロイは激しく燃焼した。大嵐が起きて「赤子が泣いた」結果は唄と違って、水素ガスの温度と圧力

によって、格納容器の蓋が押し上げられて開いた。

原子炉の中で再発したジルカロイ・水反応は、15m 下のペDESTAL床で、本格的なジルカロイ燃焼となって終わった。ペDESTAL床で、水中反応が起きたのだ。ここで始めて、原子炉事故とペDESTAL壁の破損が繋がる。15m上での原子炉内で、ジルカロイ・水反応を起こしていた燃料棒が落下して、床上の水溜まりに入ってジルカロイ燃焼を起こし、燃料棒を溶融させ、水素爆発を起こす水素ガスを大量に発生させたのだ。

高温のジルカロイと水との燃焼（反応）は、TMI の事例から見て、10 分から 15 分くらい続いたと思われる。反応の終了によって水素ガスの発生も終わり、嵐も治まった。嵐が吹く間、高温の水素ガスはコンクリート表面を熱して、堅く固まっていたコンクリートの結合作用を失わせ、砂利に戻した。

この嵐は、圧力容器に中にも吹き込んで、残留炉心の燃料に力を加え、床上に落下させる動力源の役割を果たしたのではないかと、僕は疑っている。

3000℃近い温度の水素ガスは軽いから、格納容器の上部に集まって容器上蓋を急速に加熱した。その熱で、締め込みボルトを温度上昇させて伸ばし、水素ガスの発生で増大した圧力に協力して格納容器の上蓋を押し開いた。水素ガスが、「蓋取るな」の戒めを破って、格納容器の上蓋を開けたのだ。その時点で、格納容器圧力は少なくとも 1MPa ほどは上昇したことであろう。

格納容器から流れ出た水素ガスは、コンクリート製の生体遮蔽プラグを持ち上げて 5 階の運転フロア一室に流れ込み、室内の空気と混合して爆発性ガスと化して、爆発した。爆発の引き金は、持ち上げられたプラグが落下した時の衝撃だ。

以上が、1 号機に起きた事故の概要説明だ。炉心よりも 15m 下の、ペDESTAL床で起きたジルカロイ・水反応が、ペDESTALの損傷を床上の写真に残した状況がお分かり戴けたと思う。

3. 10 ペDESTAL壁の損傷と空洞

1 号機のジルカロイ燃焼は、炉心があった原子炉圧力容器の中で誕生したものではない。ペDESTALの床上に溜まった水の中で発生した。爆発を起こした水素ガスも、同じ床上の水溜りの中で誕生した。激しい水中発熱であったから、ペDESTALの壁が全面に渡って損傷した。

伝聞であるが、専門家によればコンクリートの熱分解現象の関係は表 4 に示す様なものであるらしい。ジルカロイ燃焼は水中発熱であり、水中から発生する水素も UO₂ 燃料棒を溶解しているから、3000℃近い温度であった事に間違いはない。この熱い水素ガスがペDESTALコンクリートの壁面に添って流れて、その熱でコンクリートの結合作用を失わせたのである。専門家の話は傾聴に値するが、我々に取っては初めて知った破壊現象であるから、その妥当性は実験で確かめるのが確実であり、必須である。

ジルカロイ・水反応がペDESTAL床の水溜まりで起きることは、既に拙著¹⁾で述べてはいたが、ペDESTAL壁の損傷については、僕には想定外の驚きであった。壁全面に作られた空洞は、ジルカロイ燃焼の熱が大きな災害を及ぼすことの刻印である。

再度言うが、ペDESTAL床上の水溜まりに発生したジルカロイ燃焼が空洞を作った原因で有る。原子炉圧力容器内部での、崩壊熱による炉心溶融で起きたものではない。ペDESTAL壁の破損原因は、ジルカロイ燃焼による水中発熱にある（表 4 参照）。

表 4 コンクリートの熱分解現象

温度(°C)	主な熱分解反応
～100	コンクリート中の自由水の蒸発
400～600	水酸化カルシウムの脱水
600～900	炭酸カルシウムの分解、CO ₂ ガスの発生
1200～1500	ポルトランドセメントの溶融

空洞は、水を溜めていた円筒形の壁全体に、ほぼ一様の大きさに出来ていた。円筒形のペデスタルの壁が受けた輻射熱は、丸い水溜まり全体から誕生した 3000°C の水素ガスが発する輻射熱であるから、その熱量が壁全面に与える熱はほぼ一様と考えて良い。空洞の高さがほぼ一様に作られたのは、水中発熱による熱の作用が、壁全体に一様であったからであろう。いや逆で、ペデスタル壁の破壊が同一高さである事が、発熱原因は水中発熱にありと教えるメッセージであるといえよう。

なお、後日の検証を待たねばならないが、空洞の奥行きの高さがほぼ同一であるのは、高温発熱の透過浸透能力によるのではなく、高温の熱で壊されたコンクリート表面の砂利やモルタルが、発生した水素ガスの嵐によって吹き飛ばされる結果、熱で照射されるコンクリートの表面が常に新しい固い平面であったからと考えている。

3. 1 1 3000K の輻射熱

ジルカロイ燃焼がもたらした水素ガスの温度は、UO₂ 燃料（融点 2880°C）が溶融したことから判断して、3000°C 程に達していた。3000°C の輻射熱がどのようなものか、僕には想像すらできないが、ふと考えると、我々は毎日、表面温度 6000°C といわれる太陽の輻射熱の恩恵を受けて生活を営んでいる。輻射熱とは我々にとって馴染み深いエネルギーなのだ。

だが、原子力界は、軽水炉の運転温度が約 300°C であるため輻射熱は小さくなく、輻射熱とは関係しないで日常生活が出来る。だが、一旦事故が発生して炉心溶融が起きる状態になると、度々書いたように燃料棒の融点は 2880°C であるから、運転温度の約 10 倍の高温の輻射熱と向き合わなくてはならない。それを忘れて事故現象に向き合うのは蟻の斧、誹りを受けても仕方がない。

第 4 章で述べる一見非常識に見える見解には、水素ガスの台風や、熔融炉心は流動しないなどと言った常識外の事柄を述べるが、それは福島事故で経験した、輻射熱が持つ常識から得られた事柄である。

我々の住む温度 20°C（絶対温度 300K）の低温の世界と太陽の表面温度との差は、絶対温度で 300K と 6000K の違いであるから、比率にして 20 倍もの差である。だがそれが、輻射熱の違いとなると、差は更に増大する。ここで昔習った輻射熱の元祖、ステファン・ボルツマンの法則の登場である。輻射熱の大きさは絶対温度の 4 乗に比例すると法則にあるから、輻射熱の比率は 20 の 4 乗倍、16 万倍の差となる。16 万倍と言う大きさの違いは、大きすぎて感覚的に理解できないから、何を言われても、そうですかと信じる以外にない。

幸いな事に、我々の住む地球は太陽から遠く離れているから、太陽の輻射熱は 16 万分の 1 に減少して届いてくれる。その減少した輻射熱の下で、我々は日向ぼっこをしたり、野菜やお米を育てたりして生きている。時折見舞われる台風や大雨も、太陽の輻射熱が作り出す災害である。このような低温世界に住んでいるから、我々の持つ常識は、300K という低温世界での見聞を基にして作られた常識

で、高温世界とはかけ離れているものが多々ある。例えば、我々低温世界での常識は、水は流れるのが当然だが、太陽の世界では、水が蒸発してしまっていて存在しないから、水は流れるという現象自体がない。水が流れること自体が、間違いなのである。

UO₂ が溶融する 3000K の世界の常識も、我々低温世界での常識とは、当然異なっている。我々の住む温度 20℃（絶対温度 300K）世界と、UO₂ が溶ける 2880℃（3000K）の世界を比較すると、温度で 10 倍、輻射熱では一万倍の差となる。一万倍の差、この差も数字の上では理解できても、感覚的に理解することは難しい。だが、お金の話に例えると、理解できるとも言う。

僕のような貧乏人は、1 万円失えば大騒ぎする。だが、その 1 万倍の 1 億円となると、失う恐れがないので見当も付かないが、仮に手に入ったとすれば有頂天となって、使い方も分からぬままに手の舞い足の踏むところを知らずといった、忘我の状態に陥ることであろう。

UO₂ が溶ける 3000℃ 世界の事柄も同じで、我々の常識だけで判断するのが間違いの元、手足の舞う忘我の世界での常識があると思っておかねばならない。1 万倍という差は、我々の常識で計れない事も多々あるのだ。

UO₂ 溶融の世界と我々の低温世界での輻射熱の相違は 1 万倍あるが、太陽と UO₂ 溶融の世界との相違は僅か 16 倍だ。UO₂ が溶ける世界の輻射熱は、我々の世界より、太陽の方がずっと近い。常識が違うから、間違えるのは仕方ないと覚れば、気持ちが楽になる。翻って、炉心溶融が起こす原子力事故を論じる時は、低温世界の常識が常に正しいと固執すると、大間違いを起こす。ご用心を。

4. 写真からの随想

4. 1 福島事故におけるジルカロイ燃焼事故防止の実例

ジルカロイ燃焼の凄まじさについては良く分かった。だが、何故そんな危ないジルコニウム材料を原子炉の燃料材料に使っているのか、原子力関係者は安全意識が欠如しているのではないかと、お叱りを被るかも知れない。事故が起きた事はご容赦を乞う以外にないが、ジルカロイほど実績があり、発電用原子炉に適した被覆管を、僕は知らないのだ。ロシアや中国でも、燃料棒にジルコニウムの合金を使っている。通常の原子炉運転状態では酸化しないジルカロイは、高温に耐える最適被覆管材料と僕は思っている。

ソ連で火災爆発事故を起こしたチェルノブイリ原子炉は、我々が使っている軽水炉とは似ても似つかぬ黒鉛ガス炉であるが、ジルカロイに似た、ジルコニウム・ニオブという名の被覆管を使っている。この爆発原因も、これまで述べて来たジルカロイ・水反応による水素発生が原因である。

チェルノブイリ事故も、高温状態になった炉心に冷却水を注入したために、水素ガスが発生したのが爆発原因だ。更にチェルノブイリでは、炉心の中に大量の黒鉛が減速材として使われていたため、ジルカロイ燃焼によって黒鉛が着火して、黒煙火災まで引き起した。6 日間に渡って燃え続けた黒鉛火災が、インテルサット衛星で撮影されて我々の目に届き、北半球全体が放射能で汚染された²⁾。

ジルカロイの問題は、事故を起こす可能性にあるのではなく、ジルカロイ燃焼事故を防止出来るか否かにある。3. 6 節で述べた様に、ジルカロイ燃焼事故は運転員の注意で防げる。ジルカロイ・水反応を防ぐ手段は、設計にはないが、運転員の注意により実行できる。

ジルカロイ燃焼は、高温の燃料棒に冷たい水を浴びせることで起きる。高温になった炉心を冷却しようと思って水を入れた途端に、被覆管の酸化膜が破れてジルカロイ燃焼が起きて事故に到るのであれば、炉心に水を入れて急冷するのではなく、ゆっくりと冷やせばどうなるか。

燃料棒温度を 500℃以下にまでゆっくりと冷やした後に、長期の原子炉冷却のための冷却水を入れれば、安全に原子炉を停止・冷却することができる。原子炉を冷やす過程で被覆管の酸化膜にひび割れが生じて、中のジルコニウムの温度が低く水と反応できないから、ジルカロイ燃焼は起きない。ジルカロイが燃焼しなければ、炉心溶融も水素爆発も起きない。この事は 3. 6 節で述べた。

原子炉をゆっくりと徐冷した後に、燃料棒が冷えていることを確認して、直ちに冷水を入れる、これで事故は防げるのだ。

こう書けば、事故状態にある原子炉を徐冷するなど、そんな悠長な操作が実施出来るのか、馬鹿を言うなとお叱りを受けるかも知れない。だが、その悠長な操作が、何と福島 2, 3 号機に実施されていて、徐冷は成功して、冷却水の注入を待つ状態になっていたのだ。操作は単純で、簡単なのだ。福島の事故報告書には、操作と操作後の状態が記録されているが、誰も気付いていないだけだ。

ジルカロイ・水反応の防止対策は、事故状態下においても実施は容易だが、その方法は一つだけではなく、二つの方法で行われた。いずれも別個に、福島の 2, 3 号機で行われたのだが、崩壊熱によって原子炉温度が再上昇するまでの数時間、徐冷後の原子炉には何らの異常も発生していない。徐冷は成功していたのだ。

徐冷に成功しながら事故が起きたのは、冷水注入が遅れたからだ。先ほど、冷却が確認されたら直ちに水を入れよと書いたのは、炉心温度の再上昇を防ぐためだ。成功しながら失敗に終わったのは残念だが、その経緯を以下に述べる。

4. 1. 1 2号機が行った安全弁開放

第一の防止方法は、福島 2 号機で行われた、原子炉の安全弁を開きっぱなしの状態にして、原子炉圧力を下げる方法だ。

運転員の操作は、安全弁を開きっぱなしにするだけだ。安全弁を開きっぱなしの状態に置き、30 分ほど経てば、原子炉圧力が 10 気圧以下（飽和温度約 180℃）に下がるので、それを確認した後、時間を置かずに、冷却水を原子炉に注入すれば良い。注水が遅れると、崩壊熱により炉心温度は元に戻る所以、ジルカロイ燃焼が起きる。

この程度の操作なら、事故時といえども運転員が実施するのは容易だ。現に、福島 2 号機はこの操作を実施している。そして燃料棒の温度低下に成功している。

14 日 18 時 2 分安全弁が開き、70 気圧以上あった原子炉圧力は、10 分ほどの後には 15 気圧程度に、30 分後には約 7 気圧（飽和温度 164℃）に下がっている。（以下略）

安全弁から噴き出す蒸気の流れで、高温の燃料棒はゆっくりと冷やされる。原子炉圧力の緩やかな低下に伴って、冷却水の飽和温度も緩やかに低下するので、それに従って炉心温度もゆっくりと低下する。減圧後 30 分の飽和温度が約 170℃であるから、如何にゆっくりと燃料棒が冷やされたか分かるであろう。

ちなみに、この時刻の崩壊熱温度は 0.6%にまで下がっているから、燃料棒内の温度分布はほぼ同一であり、燃料温度は冷却水温度と同じと考えて良い。

この時、時間をおかずに冷水を原子炉に注入していれば、被覆管の酸化膜にヒビ割れは起きたであ

ろうが、中のジルカロイの温度は 170℃に低下しているから、水と出合っても反応しない。従って、事故は起きなかった。

だが残念な事に、注水が 2 時間遅れた。炉心への注水が始まったのが 1 9 時 5 3 分、2 時間近い遅れだ。この 2 時間の間に、燃料棒温度は、断熱計算では約 1800℃近くになる。輻射放熱による冷却を考慮に入れても 1500℃くらいには上昇していたであろう。ここに冷却水が入ったから、ジルカロイ燃焼の発生は避けられない。2 号機の事故は、かくして起きた。

ジルカロイ燃焼による災害、この事実は拙著¹⁾による福島事故の分析によって始めて分かった事であるから、運転員の操作失敗でもなければ、指導者の間違いでもない。

図 3 に圧力上昇の様子は見られる。ジルカロイ燃焼による圧力の急激な上昇は、2 1 時、2 3 時、翌 1 5 日 2 時頃の 3 回発生している。

圧力上昇の様子が、小一時間ほどの緩やかな上昇であるのは、消防ポンプによる注水能力が小さいために、反応が注水量に支配されたためである。圧力上昇が止まったのは、注水のレベルがジルカロイ燃焼を起こす被覆管温度より下にまで降下したからと思われる。水素ガスの発生による圧力上昇と、水位低下による反応の停止による圧力の低下が、2 号機では明確に示されている。

いずれの圧力上昇の場合も、圧力の上昇が始まった時刻は、高温となった炉心に冷却水が到達した時刻と考えられる。この内、2 3 時に発生した第 2 回目の圧力上昇が最も高く、かつその時刻に正門付近の放射線量が 10Sv に上昇しているので、この時刻に最も激しい炉心溶融が起こり、大量の水素ガスが外部環境に放出されたと考えている。

第 2 章 福島第一原子力発電所事故 1～3 号機編

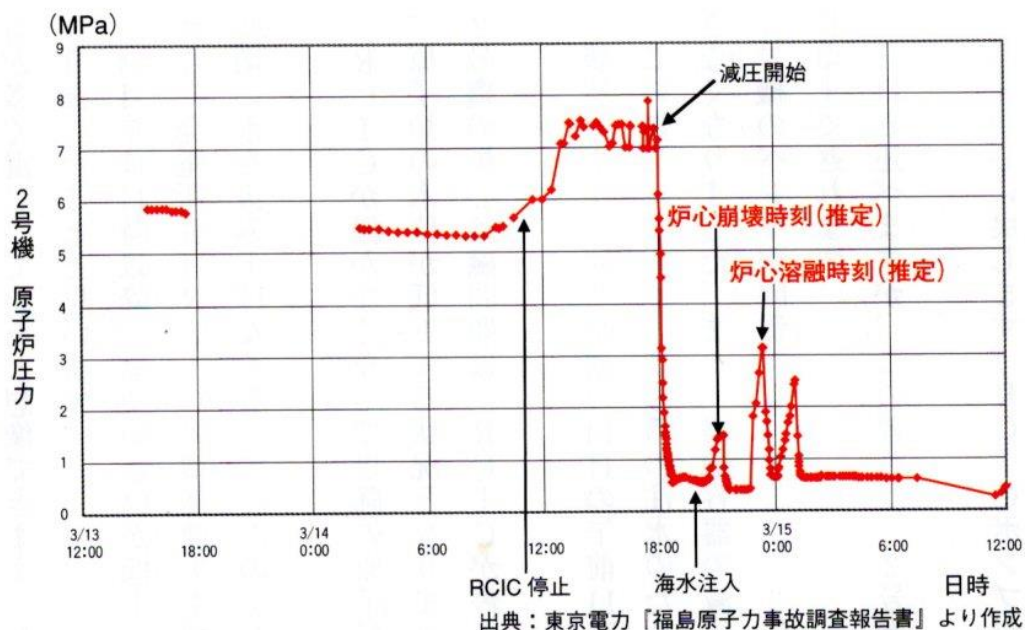


図 3 2 号機の原子炉圧力変化（測定値）（参考文献 1 の図 1.2.9 より）

なお 2、3 号機への炉心注水は、1 号機の炉心スプレー系統を使つての注水ではなく、冷却水再循環系統を使つて炉心の下からの注水である。炉心の下に残る温かい水に混じつて冷却水が下から炉心に入ってくるのが、1 号機と違うところだ。

以上が、2 号機の原子炉ベントにからむ成功と失敗の、残念物語だ。

炉心溶融を引き起こす、ジルカロイ燃焼の防止策について、ここで再度述べておく。

原子炉水位の低下が炉心の半ばを過ぎる前に、運転員が水位の低下に気付くことが必須条件となる。このためには、信頼出来るアラーム付きの炉心水位計を複数設置する事が望ましい。

運転員が取るべき防止手段は、安全弁を開きっぱなしにする事だけだ。炉心から蒸気が放出されて原子炉圧力を低下させるに従って、炉心はゆっくりと冷えてゆく。炉心圧力が 10 気圧以下にまで下がれば、燃料棒温度は 170℃ほどに下がっているから、冷却水を原子炉に入れて支障はない。被覆管温度が低下しているために、酸化膜が破れてもジルカロイ燃焼は起きない。

これが第一の防護手段であるが、減圧で炉心温度が下がったタイミングを逃さず、冷却水を炉心に入れることも、運転員の大切な役目だ。水を入れ損なうと、崩壊熱で炉心温度が再上昇して、ジルカロイ燃焼が復活する。気をつける事だ。

なお、ジルカロイ燃焼は免れても、被覆管が破れれば燃料棒から放射能は出てきて、炉心を流れた冷却水に混入する。TMI 事故では、その放射エネルギーを低減するために一時冷却系の浄化を一月にわたって行い、放射能の浄化と共に水中に混入した水素ガスの抽出に気を使っている。この点に気をつける事を、注意事項として付加しておく。

4. 1. 2 3号機が行った高圧注入ポンプ（HPIC）の活用

第2の防護手段は、3号機が行った高圧注入ポンプ（HPIC）の活用である。但し、この方法は、第一の原子炉ベントより難しく、運転操作も安定していないので、事故時対応としては推薦しない。3号炉では、原子炉隔離時冷却系（RCIC）の停止が起きたので、その対応策として HPIC の代替運転に切り変えたのが、成功したものだ。

3号機は幸運な炉で、津波にもかかわらず直流電源が生き残っていた。従って、事故時の原子炉データも豊富に残っており、事故対応に非常用機器が十分に使用できた。事故状況下におかれた運転員は不安であったのであろう。無駄な操作も幾つか見られるが、それは不問として稿を進める。

原子炉の停止に伴って RCIC 運転に入ったが、12日の昼頃、RCIC は原因不明で停止した。これが事故の発端だ。約1時間後に、原子炉水位低の信号を受けて、高圧注入ポンプ HPIC が起動して、炉心に水を入れ始めた。

RCIC と HPIC との相違は、ポンプの大きさにある。HPIC の吐出量は、RCIC の 10 倍ほど大きい。加えて HPCI は、復水タンクから温度の低い水を汲み上げているので、原子炉の冷却が早い。1時間後に原子炉圧力は約 40 気圧（飽和温度、約 250℃）に下がり、6時間後には 10 気圧（180℃）以下になっている。6時間かけて炉心は徐冷されたと考えれば良く、2号機の冷却に較べると、3号機の徐冷時間は長かった。この理由は後程述べる。

ところが、ここで問題が起きた。原子炉冷却水の温度が冷え過ぎた結果、HPCI の駆動源である蒸気圧力が不足となり、6時間後の HPCI は、何時止まってもおかしくないよちよち運転の状態になっていた。ポンプは廻っているが、水を送らない空回り状態になっていたのだ。

説明は不要であろう。徐冷6時間後の原子炉は、冷えすぎて何事も起きない。この機を逃がさず消防車による海水の注入に切り変えていれば、事故は防げたのだ。海水注入の好機と判断出来た筈だが、準備に手間取っている間に燃料棒温度が再上昇し、ジルカロイ燃焼に到った。

3号機の事故も、消防車による海水注入の遅れだった。それも半日も遅れたのであるから、燃料棒温度は十分に再上昇していた。海水の注入で事故に到った。その経緯の詳細は、拙著¹⁾を参照して戴きたい。

2号機も、3号機も徐冷には成功しながら——当時、成功の意識はなかったであろうが——原子炉への海水注水が遅れたために、事故を呼び戻してしまった。この過ちを繰り返さないための戒めは、転ばぬ先の杖だ。防止対策を実行するに先立って炉心注水の準備を整えて、注水ができることを確かめた後に、防止策を実施する事だ。注水の準備が先、防護策の実施はその後だ。

この手順が大切だ。2号機も、3号機も、この手順の失敗で事故が起きた。

4. 1. 3 注水が手遅れとなった時の対策

さて最後は、この様な注水が手遅れとなった時はどうすれば良いだろうか。僕の答えは、手遅れと分かった時は、水を原子炉に入れずに、原子炉をそのままにしておくことだ。無責任なようだが、水を入れなければ水素爆発が発生しないから、炉心溶融は起きても、被害は少ない。

福島事故の場合は、崩壊熱が低くなっていたから、そのまま放っておいても炉心溶融には到らなかったと、僕は思っている。原子炉の停止後、丸1日後に爆発した1号機の場合でも、崩壊熱は -0.6% に下がっていたから、水を入れなければ水素爆発は起きず、残留炉心は溶融に到らなかったと思っている。その根拠は、全く粗い仮定での計算だが、崩壊熱が 1% 如何になれば炉心は輻射熱で冷やされて、炉心温度は 2000°C を少し越える程度にしか上昇しないと考えているからだ。UO₂が溶融する温度 2880°C と比較すると、輻射放熱の大きさは、その約5分の1に過ぎない。どう考えても、融点 2880°C というUO₂炉心は、崩壊熱で温度が上昇した炉心にジルカロイ・水反応が加わらないと、溶融には到らないのだ。

停止後3日経った2, 3号機は 崩壊熱はもっと少なく、 0.4% 程度にまで下がっていた。ここまですべて崩壊熱が小さくなれば、溶融点に近い炉心が出す輻射（放）熱の方がずっと大きい。水がなくても炉心溶融は輻射熱で防ぎ得た。融点 2880°C の溶融近傍のUO₂炉心が放散する輻射熱は、それほど大きい。

福島事故も、TMI 事故も、炉心溶融が起きたのは、崩壊熱で高温となった炉心に水を入れたために起きた。それによりジルカロイ燃焼の大きな発熱が加わったからだ。この事実さえ知っていれば、手遅れになった場合には水を入れないのが正しいと、納得できるであろう。

4. 2 溶融炉心は流れない

融点の高いUO₂炉心が溶融したとして、溶けた炉心が水の様に流動するのかという疑問を耳にした。それは、原子力とは無関係の、融点の高い物質の液状特性を調べている研究者からの疑問であった。福島事故当時、NHKが毎日の様にテレビで流した、炉心溶融が流れ下る動画映像に疑問を持つてのことらしい。原子力関係者のほとんどが、この映像に対して疑問を抱いていないのも不思議だが、理由は、輻射熱の大きさに対する認識の不足から来ている。

溶融した炉心は、何故か少し横流れして、ダウンカマーを垂直に流れ落ちて、圧力容器の底を溶かし、格納容器の床に流れ落ちる、といった映像だったように記憶している。研究者の疑問は、融点の

高い原子炉燃料が溶けたとして、流動するであろうかとの疑問である。

話によれば、融点が 2000℃以上の高温材料となると、資料を溶融させるのが一苦劳らしいが、溶融した試料の特性測定は、より難しいと言う。試料はレーザー照射によって加熱するのだが、溶けて液体と化した途端に、地球の引力によって流下して、試料は照射範囲外へ出る。その途端に、熱源を失った試料は輻射熱によって冷えて、直ちに固化するので、流れることはほとんどないという。数多い実験を重ねて来た経験に基づく発言で、傾聴に値する。

余談だが、この実験の名は「Thermo-Physical Property Measurements of Refractor Melts」と言うらしく、最近、重力のないスペース・シャトルで実験を行っているという。

溶融した炉心が流動して圧力容器の底に流れ落ちるといふ、炉心溶融についての定説に僕が疑いを持ったのは、福島事故の検討のために、図4のTMI事故の溶融炉心のスケッチ図を見直した時だ。

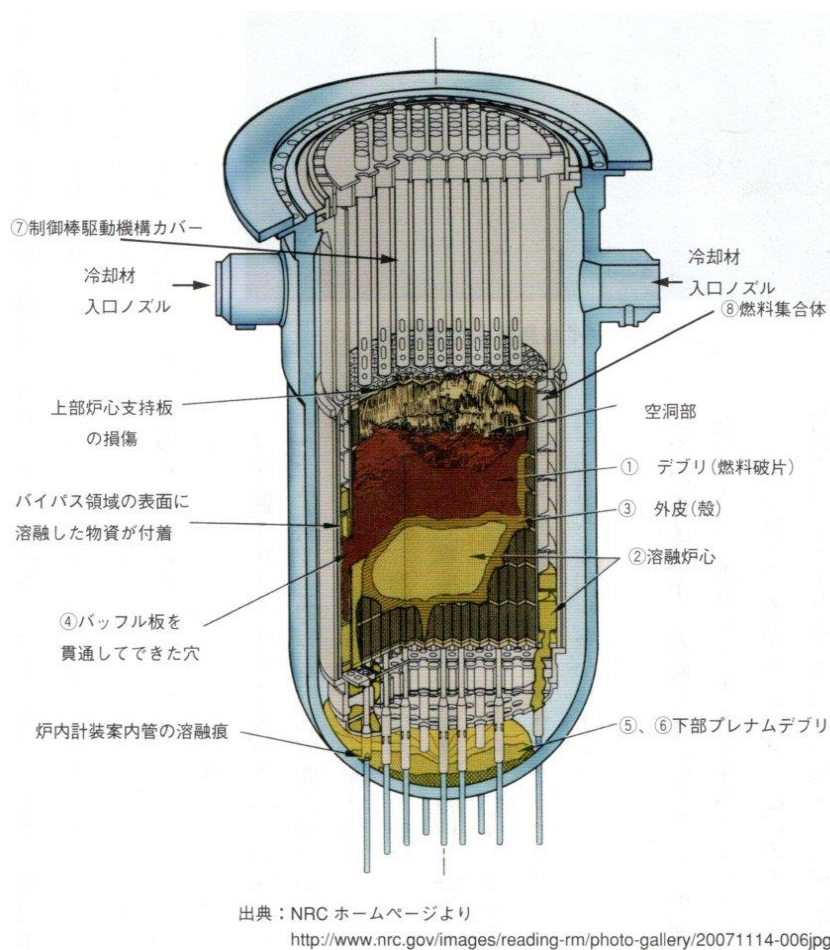


図4 TMI の炉心溶融図（参考文献1の図1.1.1より）

TMI 事故は、加圧器逃がし弁の吹き止まり失敗によって起きた。安全で言う、小口径破断冷却材喪失事故（小口径 LOCA）だが、炉心溶融にまで事故が進展したのは、福島事故と同じジルカロイ燃焼の発生による。詳細は省略するが、水を半分位失った炉心を冷却しようとして、一次冷却材ポンプを動かした途端、熱交換器の中で冷えた水が一举に炉心に流入して、高温の燃料棒と反応したためだ。原子炉圧力が急上昇し、あれよあれよと言う間に安全弁が開き、炉心が溶融して、水素爆発も起きた。以上が、TMI 事故の概要である。

ところがスケッチ図によれば、熔融炉心は元にあった場所に鎮座していて位置は変わっていない。スケッチ図は、解体するドリルの切削速度などを参考にして熔融炉心の材料変化を調べて、忠実に描いたと言われる。炉心が元あった場所を移動せずに、固い殻に包まれた熔融炉心となって固化し、溶け残った燃料棒の上に鎮座している状態も忠実に描かれたものであろう。

表皮とも言える熔融炉心の殻は堅くドリルが中々通らない。この堅い殻は UO_2 が混合して熔融したものらしく、ドリルの通りがスムーズに通る殻の内部の合金とは明らかに違った材料であるらしく、色を塗り分けて描いている。内部の合金は U 、 Zr 、 O の三元素を主体とする共晶体（化合物）と化しているらしい。

殻の上面には、細かく分断された燃料棒の破片（デブリ）が沢山積み重なって乗っており、殻の上面はその重量で平面になっている。この事実は、殻を作った炉心の熔融と、デブリが落下した時刻に時間差がある事を示している。

TMI の炉心熔融は、事故の経緯から見て、崩壊熱で高温となった燃料棒に—ジルカロイ燃焼の発熱が加わって起きたことに間違いはない。熔融した燃料は、燃料棒相互の隙間を通して流れ出た途端に、輻射熱の放散により固化して、隙間を埋めて卵の殻状の外皮になったのであろう。外皮の中に残った燃料や原子炉材料は、卵の殻の中で混合・熔融して均一な共晶体を作ったと考えられる。熔融炉心を刻んだドリルの抵抗の違いが、熔融炉心の内外を分別して、TMI の炉心熔融図は出来た。

別の見方をすれば、熔融した UO_2 は融点の高い坩堝（殻）となり、その中で共晶体中心の合金が製錬されたのだ。この共晶体の一部が、殻の上に落下してきた燃料棒の分断片（燃料デブリ）の重量に押されて坩堝の側面を破り、一部が流れ出て圧力容器の底に溜まった。この流れ落ちた共晶体を除いて、熔融燃料のほとんどは殻の中に残っている。

熔融炉心が流動した痕跡は、スケッチ図には見られない。

熔融炉心が流動しなかった痕跡の第一が、熔融炉心が元の炉心位置で固化している事実だ。融点が高い UO_2 は、熔融はしても流れて落ちずに、ほぼ同じ位置に残っている。

TMI の炉心は、熔融の直前までは崩壊熱によって 2000°C 以上に熱せられていたから、注水によってジルカロイ燃焼が起き、その熱によって溶けた燃料棒は、燃料棒の間にある狭い隙間を少し流れ下ったであろう。流れ下った途端に、熔融した UO_2 は発熱源であるジルカロイ燃焼の場から離れて、輻射熱を放散して冷えて固まり、隙間を埋めて殻を作った。

TMI のスケッチ図には、熔融炉心の底の中央に、殻と同じ色をした短い突起が一本描かれている。恐らくこの突起は、熔融炉心の底に出来た幾本かの突起の代表として描かれたものであろう。突起の寸法は、メノコ測定だが、長さ 60cm、幅 30cm 程である。ずんぐりむっくり型で、氷の様に細長いつららでないのは、流れ落ちる間もなく固化した事実を示している。 3000°C に近い物体が出す輻射熱は大きいので、固化が早いからだ。

熔融炉心は流れない、TMI の熔融炉心のスケッチ図はその事実を示している。

4. 3 ペデスタルの中の嵐

3. 7節で紹介したように、ペデスタルの床上に溜まった水は、ジルカロイ・水反応によって水素ガスとなって気化した。床上に溜まった水は約5トンであったが、ジルカロイ・水反応で必要とした水量6.3トンに及ばず、水は不足していた。最初の内は、格納容器床に溜まっている水が外側から流入して来ると思っていたのだが、これが大変なミスかも知れないと気付いたのは、表題の、ペデスタル内の嵐に気付いたからである。

ペデスタルの容積は 200m^3 と小さいのに、発生した水素ガスの総体積はNTP状態で 8000m^3 と大量で、40倍もある。発生した時点での発生水素温度を 3000°C とすれば、容積は更にその10倍となるから、 8万m^3 の水素ガスが、容積 200m^3 の室内で発生するのだ。容積の400倍もある水素ガスが水の底からわき出てくるのだから、狭いペデスタルの中で嵐が起こらぬ筈がない。

ちなみに、格納容器の体積は 6000m^3 、水素ガス発生による圧力上昇はNPT状態で1.3気圧だから、 3000°C の場合は13気圧の圧力上昇となる。反応が起きる前の格納容器の圧力は約7気圧あったから、ジルカロイ燃焼によって格納容器圧力は、計算上20気圧となる。格納容器はこの圧力に耐えられないが、水素ガスの温度低下と反応時間が10~15分くらい掛かることを考慮すれば、破壊するまでには到らなかったであろう。高温の水素ガスは、1号機格納容器の上蓋を熱と圧力で押し上げて、中の水素ガスを上方の運転フロアに送り込み、そこで爆発を起こしている。

問題は、容積の400倍ものガスが発生したペデスタル中の動乱だ。水素ガスは嵐の様に、ペデスタルの上方に向かって上昇し、二つの出口から格納容器に流出した。この嵐がどのようなものか、経験がないから分からないので、問題だけを整理して述べる。

ペデスタルの天井は圧力容器の底で、塞がれている。格納容器への通り道と言えば、ペデスタルの床にある作業用の出入口と、壁の中間部に設けられた制御棒交換用の開口部の二つだ。この面積は正確には分からないが、約 2m^2 ほどという。

ジルコニウム・水反応の反応時間を15分、発生する水素ガス温度を 3000°C と仮定すると、ペデスタル内部で発生する水素ガス量は、平均 $5300\text{m}^3/\text{min}$ となる。上述の開口部面積を 2m^2 とすれば、開口部の平均風速は 45m/sec となる。非常に強い台風の最大風速に匹敵すると言って良く、人が立ってはいられない状態である。格納容器内部が大荒れ状態に陥ったことは、容易に推測出来る。

この嵐の最中に、風力に抗して、格納容器からペデスタル床へ水の流入は可能であったろうか。それとも、底の抜けた圧力容器の内部へ嵐が吹き込み、残留炉心の燃料棒を落下させたのではないかなど、吹いた嵐への憶測は尽きない。しかし、答えは全て自問自答、勝手な推測でしかない。

東電とIRIDは、最近映像を分析して、写真5に示すペデスタル内部の合成写真を作り、公開している。これによると、ペデスタル内部に設置していた制御棒駆動機構交換機は跡形も無く姿を消し、写真3にあるような制御棒駆動機構ハウジング十数本がペスタル壁の周辺に確認されるだけと言う。制御棒駆動機構の交換機はなくなっているのに、十数本のハウジングが数十本残されているのも面白い事実だ。

これらの事実から見て、12日2時半に起きた炉心高温部の落下によって、炉心の真下にあったハウジング等の構造物は溶けて姿を消し、残っていた十数本のハウジングだけが嵐で落下して、壁に吹き寄せられたのではないかとも思えるが、真相が分かるのは調査が進んだもっと後日の事だ。

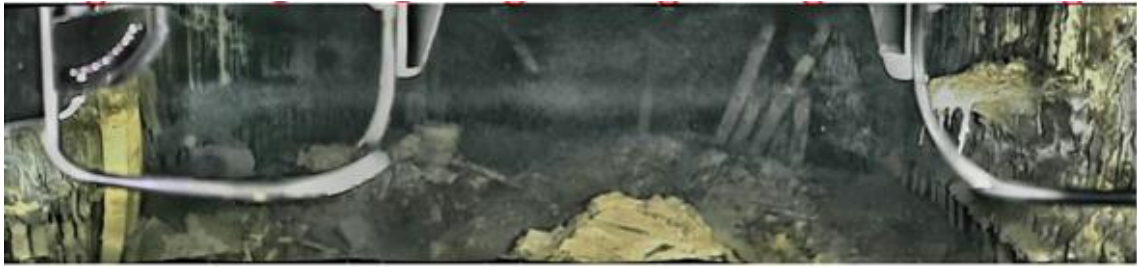


写真5 ペDESTAL内部の外観合成写真

5. LOCA—ECCS 指針との関係

これまで、軽水炉の最悪事故と考えられて来たのは、大口径破断冷却材喪失事故 (LOCA) である。LOCA に対する安全対策は、破断と同時に冷却水を注入することによって 炉心が溶融する前に冷却できる安全装置を準備することにあるが、その設計は、以下の4つの制限を守ることを要求している*。それらは

- ① 燃料被覆管温度の最高値は 1200℃以下である事；(燃料溶融の防止)
- ② 燃料被覆管の酸化量は、被覆管厚さの 15%以下である事；(酸化反応の激化防止)
- ③ 被覆管及び炉心構造体が水と反応するに伴い発生する水素の量は、格納容器の健全性を保つ観点から十分低い事；(格納容器の健全性確保)
- ④ 燃料の変形を考慮しても、崩壊熱の除去が長期間可能である事；(冷却形状の保持)

である。

(*；俗称 LOCA-ECCS 指針；正式名称⁴⁾。安全設計関係指針；”軽水動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針について”)

米国で、この指針の考え方が議論され始めたのは 1970 年頃と記憶している。50 年も前の昔話であり、当時の関係者の多くは亡くなっておられるが、指針の検討会に日本から参加された故三島良積先生によれば、審査基準のキーワードは、上記の、①「1200℃」、②「酸化膜厚さ 15%以下」、③「ジルコニウム・水反応によって発生する水素量」の3点であるとのことのお話しであった。その理由は、部厚い酸化膜を持つ高温の燃料棒を急冷すると、表面の酸化膜に無数のひび割れが発生し、水とジルコニウムが直接接触するので活発な反応が起こり、手の施し様が無くなるからとのことのお話しをされた事を記憶している。

ところが、基準が策定された 1978 年頃になると、考え方は少し変化していた。指針の中で最も広く議論された条項は、①と④であった。その心は、④の長期間の冷却確保は当然として、①の燃料棒温度が 1200℃以下に保たれば、必然的に②、③は保たれるとの解釈にあったのではないかと、いと思う。時代が進んで軽水炉の建設ブームがはじまると、制限条項の解釈は更に変わり、緊急炉心冷却設備 (ECCS) の効果的な設計開発の指針として使われると共に、その安全確認は、計算コードを活用して算出される結果で判断されるようになった。

簡単に言えば、①さえ守っていれば②と③は必然的に守れるとの考え方が大勢を占め、その結果、②、③の持つ意味が、何時となく忘れられていった。

この考え方は、大口径破断冷却材喪失事故 (LOCA) に対しては妥当で、合理的である。だが、中

小口径破断冷却材喪失事故（中小 LOCA）となると、問題があった。中小 LOCA では、事故時のプラント挙動が大口径 LOCA とは大いに異なるからで、一例を挙げれば、中小 LOCA では流出する冷却水量が少ないから、炉心の水がなくなるまでに時間掛かる。

従って、運転員がそれと気付いたときのプラント状況は、大口径破断とは事故の状態が非常に違っている。大口径 LOCA の様に、破断後 1 分少々で圧力容器の水が流出してしまうような単純な現象ではなく、TMI 事故に見られる様に、安全弁の閉止失敗後約 2 時間を経ても、原子炉圧力はまだ 15 気圧ほどあり、冷却水は炉心の半ば程度まで残っていた。このため、事故の進展挙動は複雑で、運転員にとって理解するのが難しいために、誤操作や見落としが生じ易い。その実例が TMI だ。福島事故も同様で、事故経緯を緻密に分析すれば分かる。

TMI の場合は、逃がし安全弁の閉止に失敗して原子炉の蒸気が漏れ続けているのに気付かなかったという、信じられないような運転員の不注意が事故の発端だ。中小口径破断事故は、運転員にとって気付くのが難しく、気付いた時の原子炉の状態は圧力や冷却水温度が低下していて複雑で、運転員は操作を間違え易い。TMI 事故では、運転員が気付いた時には原子炉の水位は半分以下であり、炉心の燃料棒の上半分は空だき状態により高温となっていた。それに気付かず大型ポンプを作動して大量の冷却水を入れたので、途端にジルカロイ燃焼が起きて、炉心は溶融し、大量の水素ガスが発生した。

中小口径破断事故は、運転員の気の緩みと、事故現象の複雑さから起きる事が多い。①を越えて②、③の状態が起きてしまうので、結果として、大口径破断冷却材喪失事故（LOCA）を凌ぐジルカロイ燃焼が起き、炉心溶融のみならず、水素爆発を併発する。

このジルカロイ燃焼事故の問題は、拙著¹⁾が初めて福島事故の分析を基に世に問うた現象であるから、運転員は対処の仕方を教わっていないし、上級管理職も知らない事柄である。従って、運転員の操作失敗を非難する事は適切でない。

簡単に言えば、1000℃を超える高温である程度の時間熱せられれば、被覆管の酸化膜厚さは 15% 以上になるので、燃料棒を水冷すると酸化膜に無数のヒビ割れが生じて、そこに冷却水と高温ジルカロイの接触が生じて、激しい反応が発生して——ジルカロイ燃焼——事故に陥るという考え方が、何時の間にか忘れ去られていたのだ。

基準作成の途中で、大口径 LOCA が軽水炉の最悪事故と思い込んだのが、基本的な誤りであった。中小口径の破断は、運転対応を間違えると、安全審査でも審議しない水素爆発をまで引き起こす。この事を忘れていた。安全基準の見落としとしてである。厳しく反省すべきであろう。

高温になった炉心に、温度を低下させようと思って原子炉に水をいれたら、炉心が溶融して水素爆発までも起きた。これが TMI 事故であり、福島事故であった。ジルカロイ燃焼が起きると、表 3 に示したジルカロイ・水反応の酸化速度の何十倍も大きくなるのは、ヒビ割れを通じて、水や水蒸気が高温のジルコニウムと直接に接触できるからで、反応面積の拡大と同じ効果となるためである。

この結果、反応の増大が燃料棒の温度上昇を呼び、温度上昇が反応を活発化させると言った正の反応となり、一旦ジルカロイ燃焼が発生すると、被覆管全体を酸化し尽くすまで反応は止まらない。この悪循環が原子炉に起きれば、融点 2880℃の燃料棒も溶ける。炉心溶融とは崩壊熱が作り出すのではなく、崩壊熱で高温になった燃料棒に、大きな発熱を生じる化学反応——ジルカロイ燃焼——が加わって、起きる現象である。

崩壊熱が 7%もある大口径破断 LOCA は別として、中小口径破断 LOCA の場合は、原子炉停止後 2 時間を経れば、炉心が持つ崩壊熱は 1%以下となるから、溶融炉心が出す崩壊熱も小さい。大口径

破断に較べると数倍小さいから、融点 2880℃の UO₂ 炉心を溶融させるのは不可能である。僕の粗い仮定での計算では、炉心温度を 2000℃程に上昇させるのが精一杯である。

これまで軽水炉で起きた炉心溶融事故は、全て崩壊熱で起きたのではなく、崩壊熱で暖められた炉心に、ジルカロイ燃焼が加わって起きたものばかりである。

福島事故は、②「酸化膜厚さ 15%以下」、③「ジルカロイ-水反応によって発生する水素量」のルールを思い起こせという、天の啓示かもしれない。天の啓示は技術的な課題だけではなく、原子力技術の世界的風潮変化に対しても注意を喚起しているように思える。

TMI 事故以前の米国は、凄まじい原子力発電ブームにあった。原子力メーカーの WH 社 (PWR) や GE 社 (BWR) は、10 年先までの発注契約を持つと豪語していた。その理由は、61 年に起きた SL-1 の暴走事故が、BORAX、SPERT の実験によって解明されて、計算コードによる解析結果は、発電用原子炉の暴走状況を精度高く予知出来るまでになっていた。折しも、大型コンピュータが出現し、計算技術も一大進歩を遂げ、原子炉の事故解析は繰り返し計算の大幅な採用によって精度を進化させていた。

米国の原子力界には、精度が向上したコンピュータ計算による事故解析を使えば、お金と時間の掛かる原子炉実験はなくても、原子炉の安全は確保できるとの主張が、工業界を中心に台頭し始めた。アイダホの砂漠に作られていた LOCA の実証実験や LOFT 実験計画は大幅に変更され、事故時の燃料棒破壊実験 PBF 計画も縮小された。

1978 年に実施された LOFT 実験は——確か L2-5 実験と記憶しているが——実験前の解析では、最大の燃料棒温表面度が 1200℃と予測されていた実験であったが、蓋を開けてみると、燃料棒の最大表面温度は 700℃を少し越えた程度に留まった。実験と解析は、識者の主張するほど一致していなかったのだが、緊急炉心冷却装置 (ECCS) の冷却効果は予想以上に有効であるとの発表をもって、関係者全員の幸福裏に実験計画は終了した。

実験前解析と実験結果が何故こうも違うのかという議論は、聞こえてこなかった。

この翌年、79 年 4 月に発生した TMI 事故は、米国の技術的風潮の変化に対して注意を喚起する、天の啓示ではなかったろうか。

だが、LOFT 実験の終了を機に、米国の安全実証実験は終了に向かい、原子炉の安全はコンピュータによる計算結果に委ねられて行った。これが時代の流れと言うものであろうか。米国に劣らず、日本もコンピュータ解析に依存する時代へと変わっていった。原子力学会コード委員会に安全解析コード部会が発足したのが 70 年頃、経産省に原子力安全解析所が発足したのが 80 年頃だった。

コンピュータ解析が使われた最初の頃は、実験で培われた成果に基づいてコードが使用されたので、計算解析の精度は著しく向上し、手計算で行われた昔の解答が安全側にありすぎて、無用な安全規制が課されていることが分かり、改善が図られた事例が多くあった。

だが、その時代が過ぎると、実験データの外挿による解析が行われる時代となり、次いで外挿を越える領域にまで計算コードの使用は広まった。更には、事故データに合わせて計算機のインプットを作るような時代にまでなった。それが今日の、原子力安全の姿である。

長々と時代の推移について語ってきたが、コンピュータの出現によって、実験を行って確認することを、近頃はしなくなった。整理された既知の事実はコンピュータに取り入れられて使われるが、新しい創造や考案された事柄は、コンピュータに取り入れるのが難しいので、敬遠・放擲される社会風

潮が何時の間にか生まれてきた。社会の忙しさが、その傾向を後押ししている。

その結果、実験による適否の判断は少なくなり、頭脳だけで作製された計算コードが万能の神であるかの如く信奉されて、事故の経緯に合わせてインプットを作るので、計算の結果はいたるところで齟齬を生じることとなる。その具体例が、IAEA に提出した日本原子力学会の福島事故報告書で、3つの事故の発祥理由に統一がないままに——ジルカロイ水反応をコードに取り入れてない——事故ごとの解析結果だけが述べられているので、報告書は顧みられず、そのまま放置されているときく。

事故状況を正しく究明するためには、工学的な知見や経験に基づいて練り上げた事実を、究明吟味して取り入れる事が必須である。近年不足しているのは、解析頭脳は存在しても、工学的な知識を体得するための実地経験が欠如しているところにある。

再び、LOCA - ECCS 指針に戻る。

LOCA—ECCS 指針についての問題を案ずるに、そのスタート時点においては、ジルカロイの持つ全ての問題について思考上の目配りがなされた。しかし、それが指針となり、発電所設計に適応される過程において、具体的な実験・究明もないままに、問題の本質を忘れた解析が罷り通る時代となった事にある。

具体的には、大口径破断冷却材喪失事故（LOCA）を軽水炉の最悪事故と決めつけて、軽水炉の安全を判断としたところに、問題の発端があった。中小口径破断 LOCA については、具体的知見を持たないままに、事故としての重要性が低いと決めつけて、その解決は畑違いの確率論に委ねられた。その結果、TMI、 福島の 4 基の軽水炉が炉心溶融を引き起こしたばかりか、安全審査にもない水素爆発までも起している。

LOCA—ECCS 基準作製の議論を始めた 1965 年頃には、膨大な発熱が炉心を溶融し、大量の水素ガスを発生させるジルカロイ燃焼事故の存在を知っていたにもかかわらず、それに関与する②、③が、大口径破断 LOCA—ECCS 指針の具現化によって、①、④の陰に埋もれてしまった。その結果が、TMI 並びに福島第一の事故となって現れた。4 機もの軽水炉が炉心溶融に加えて、安全審査でも検討しなかった水素爆発まで起こした。

福島の事故は、再度の天の警告であるのかも知れない。

工学のみならず、真理を具現化する過程において、この類いの失敗は、人が常に犯す事柄であろう。人が行為を完成させてゆく過程での一つのミスと納得する以外にないが、そのミスを追求する努力は常に成されねばならない。それは、同じ事故を発生させてはならないからである。

6. 結言

福島 1 号機のペデスタル空洞写真は、1 号機の事故がジルカロイ燃焼であった事を証明してくれた。ジルカロイ・水反応の問題は、遠く 1970 年代にその重大性が認識されていながら、その一部が等閑視されて、4 機もの軽水炉が炉心溶融、水素爆発という大事故を起こした。だが、その対策は存在し、その有効性は実証されている。ジルカロイの使用を恐れる必要はないが、使う上で必要な事は、それを使う人間の注意にある。

この問題を解決する副産物として、これまで筆者らが疑問に思っていた、溶融炉心が流動流下して圧力容器の底を溶かすとの主張が間違いであること、ジルカロイ燃焼の発熱並びに発生する水素ガス体積が膨大であるために、容積の小さいペデスタルの内部は高熱の嵐が吹き荒れたことの発見、加えて、燃料被覆管として掛け替えのないジルコニウムが持つ弱点と、その解決策を見いだせたことは、幸運であった。

以上を述べて、「容器内部調査写真からの随想推理」を終える。表題に随想推理と付したのは、写真映像は証拠となり得ないからだが、写真映像から引き出せた数多い随想を推理考察するのは大きな楽しみであった。

最近になって、ペデスタル内部の動画が東電より公開された。これらはドローンによって、制御棒駆動機構交換用開口部から入って制御棒駆動機構交換用プラットフォームの上部から撮影したものである。制御棒駆動機構ハウジング等の多くの機器が原形を留める形で俯瞰的に映っている。この様子は、これまで述べて来たペデスタル底部から撮影した写真 5 は基本的には変わっていないが、爆発的なジルカロイ燃焼がペデスタル底部で猛威を発揮した痕跡を証左と示している。

以上、写真映像を公開された東京電力並びに IRID 社に対し、改めて御礼を申し上げる。

なお、本稿は著者一人の考察作品ではない。元日立製作所技師長牧英夫氏、元原子力発電技術機構理事川上博人氏の三名で検討討論を行い、吟味を重ねて作成したものであるが、両氏のご事情により連名での発表を辞退された事をお伝えして、稿を終える。

参考文献

- 1 石川迪夫 “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”、2014 年、日本電気協会新聞部
- 2 石川迪夫 “原子炉の暴走”、1996 年、日刊工業
- 3 東京電力株式会社 “福島原子力事故調査報告書”、平成 24 年 6 月 20 日、
- 4 資源エネルギー庁編 “安全設計関係指針「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針について」”、昭和 56 年 11 月 6 日
- 5 原子力安全研究協会 “軽水炉燃料のふるまい”、平成 10 年 7 月
- 6 Louis Baker, Jr.* and Louis C. Just “STUDIES OF METAL-WATER REACTIONS AT HIGH TEMPERATURES III. EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE ZIRCONIUM-WATER REACTION”、ANL6548、May 1962
- 7 J. V. Cuthcart, et al. “Zirconium Metal-Water Oxidation Kinetics IV. Reaction Rate Studies Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission”、ORNL/NULEG-17、August 1977
- 8 東京電力 “コンクリート成分の劣化（分解等）に関する情報” debris Wiki
- 9 東京電力 “消防車による 1 号機原子炉注水量に関する検討” 2016 年 6 月 23 日