

福島第一原子力発電所事故の原因は解明されている

2017. 7. 25

チームE 牧 英夫

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震の影響を受けて起こった東電福島第一原子力発電所事故（以下、福島原子力事故と略記する）では、複数の原子炉において炉心溶融および水素爆発が起こり、大量の放射能が環境に放出され、10万人を超える人々が避難を余儀なくされた。その事故については政府、国会、民間、東電などにより調査がなされ、多くの学会や専門家による考察が加えられ、それらの成果は報告書、論文、書籍などで公開されており、それらを総合すると事故原因は解明されている。

しかしその事故原因は社会へ広くは説明されてはおらず、乏しい情報の中で国民の半数を超える人びとが原子力発電所の再稼働に不安を感じているのが現状である。原子力エネルギーの平和利用は我が国のエネルギー安全保障の観点からはもとより、持続可能な世界を創り出すためにも不可欠なものである。そのためには正しい情報を広く発信し、正直で公平な社会的議論による合意形成に向けた努力が必要である。

本報告書では、福島原子力事故の直接主原因と、福島原発北西部地域が放射能により高度に汚染された原因に焦点を当て、その概要を述べる。事故の原因が明らかになれば、原子力発電の安全性は技術で解決することができる。そのことを広く社会へ伝えたい。

「地震」は事故の直接原因ではない

2011年3月11日14時46分頃に東北地方太平洋沖地震が発生し、それを検知して原子炉は安全に停止し、送電鉄塔の倒壊により外部電源は途絶えたものの、非常用電源が自動的に起動して電源が確保され、原子炉は安定した冷却状態となった。政府事故調⁽¹⁾はじめ多くの機関、専門家は、安全上重要な機器は地震では損傷しなかったと判断している。

しかし、国会事故調⁽²⁾は事故の直接的原因について次のような二点を指摘した。①“安全上重要な機器の地震による損傷はないと確定的には言えない”とし、1号機における小規模のLOCA（冷却材喪失事故）発生の可能性を含む合計9件の未説明事項について検証することを求めた。②重要機器・配管類のほとんどがこの先何年も調査、検証することができない原子炉建屋及び格納容器内部にあるため、事故の進展の解明は困難である。

上記指摘を受けて原子力規制委員会では、地震発生から津波が到来するまで

に発電所に記録されていたデータに基づいて詳細な調査、解析、検証を行い、2014年10月8日に報告書⁽³⁾を提出した。報告書では、国会事故調が指摘した事象は地震が原因ではないと結論付けている。

事故の直接主原因は「津波」と「全電源喪失」である

2011年3月11日15時35分頃に地震に随伴して発生した設計条件を超える約13m高さ（推定）の津波が発電所に到来し、その浸水により非常用交流電源および直流電源を喪失したことにより想定以上の長時間にわたり炉心の冷却ができなくなった。これが福島原子力事故の直接主原因である。地震と共に起動した非常用交流発電機の冷却用海水ポンプは6.1mを超える津波により冠水し⁽⁴⁾、非常用発電機本体および直流電源は10mを超える津波による浸水で使えなくなった。

このような事態が発生するまでの過去の経緯を振り返ってみると、以下に示すような幾つかの反省点が浮かび上がってくる。

- (1) 機器故障やヒューマンエラー、地震などに対しては緻密な深層防護設計がなされており、規制当局により厳しい安全審査が行われてきた。しかし、津波高さに関しては過去約千年に遡る調査に基づく最大値を考慮した対策がなされていたものの、それを超える高さの津波に対する多種・多様な備えが欠落していた。

東電では2008年に福島サイトに最も厳しくなる明治三陸沖地震(M8.3)の波源モデルを福島県沖の海溝沿いに持ってきた場合の津波潮位を試算した。その結果からは、津波潮位は最大O.P.+8.4m~10.2m、1~4号機側の主要建屋地南側の浸水高さは最大で15.7mが得られた。しかしこの解析条件設定の妥当性は不明であったことから、過去に地震のなかった地域に波源を想定するかどうかも含め土木学会にその扱いについて検討を依頼していたが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、その結論が出る前に津波が現実のものとなった。解析結果が得られた時点で規制当局および東京電力が、設計条件を超える津波による施設内への浸水を防ぐための対策をとっていれば事故は防止できた。

- (2) 福島原子力事故当時は、規制当局は過酷事故（重大な炉心損傷により外部環境へ放射能が漏れ出る恐れがある状態）に備える対策を規制対象とせず、電力会社の判断に任せていた。特に、地震を除く津波などの外部要因による過酷事故発生を防止する対応検討が不足していた。米国では2001年9月11日の同時多発テロの発生を受けて、原発テロへの対応をB5bと呼ばれている対応指針を発行し、国内の各発電所に非常用電源の増強と分散配置を命じた。後日、B5bは世界の原子力保有国に極秘勧告として通告され、各国は秘密裏に勧告を実行に移した。B5bは日本にも伝達されたが、日本政府は民間の原子力関係者には伝えなかった。福島原子力事故を防ぎえる絶好の機会を逸したと言える。⁽²⁾⁽⁷⁾

(3) 安全神話という言葉の根源は、安全上の大きな対策を施すとそれまでの対策が不十分であったのかと社会から問われることを恐れていたことにあるとされている。このことを強く反省し、規制当局を含め、東電、原子力関係者・組織・企業全体の安全文化や経営姿勢を改善することが福島原子力事故の教訓を活かすことになる。

原子炉には電源が無い状態でも一定時間は動く冷却システムが備えられていた。1号機では原子炉で発生した蒸気を凝縮して再び原子炉へ戻す非常用復水器が地震発生時に作動したが、11日15時35分頃の津波到来による浸水で直流電源が使えなくなった時点で停止した。非常用復水器は直流電源喪失と共に弁が閉じる制御論理となっていたことが後日判明した。直流電源喪失と同時に照明や計器の表示がなくなり、運転状態を確認できなくなった。非常用復水器は炉心を冷却する最後の安全装置であるため、この時点で現場へ運転員が急行し、非常用復水器が動いているかどうかを直接確認すべきであった。もし停止していることが分かっていたら、その時点であれば再稼働させることができたと推定される。しかし、津波による浸水や暗闇による混乱の中で、現場のみならず東京本部に詰めかけた技術者全員が、非常用復水器は動いているはずだと誤判断してしまった。停止していることに気が付いたのは11日の深夜であった。この誤認が福島原子力事故を拡大・悪化させる要因となった。⁽¹⁾⁽⁷⁾

2号機では原子炉で発生した蒸気を駆動源とするポンプにより原子炉に注水する隔離時冷却系が設計時間をはるかに超える長時間動き続けたが、14日11時頃に停止した。3号機では隔離時冷却系に続いて13日2時頃に同じように蒸気を駆動源とする高圧炉心注水系が停止した。これらの非常時冷却系が停止した後の炉心冷却は、消防車により断続的な注水に頼るしか手立てがなくなった。⁽¹⁾⁽⁷⁾

炉心溶融および水素爆発はジルコニウム-水反応によって起こった

BWR 炉心にある燃料被覆管や冷却水の流路を形成するチャンネルボックスにはジルコニウム（以下、Zr と書く）を主成分とする合金が使われている。炉心の冷却が不十分となるような重大事故によって炉心が 1,000°C を超えるような高温になると、Zr は水蒸気と激しく反応して燃料被覆管やチャンネルボックスの表面には酸化ジルコニウム (ZrO₂) 膜でき、水素ガス (H₂) が発生する。また、この化学反応は大きな発熱を伴う (586kJ/mol)。

炉心にあるジルコニウムの総量は1号機では約36t、2号機および3号機ではそれぞれ約50tである。我が国の安全評価指針には燃料が露出するLOCAが起こった場合でも次の4項目を守るように定めている。：①燃料被覆管の温度は1,200°C以下であること。②燃料被覆管の化学量論的酸化量の計算値は、酸化反応が著しくならない前の被覆管厚さの15%以下であること。③炉心で燃料被覆管

および構造材が水と反応するにともない発生する水素の量は、格納容器の健全性確保の見地から、十分低い値であること。④燃料の形状変化を考慮しても、崩壊熱の除去が長期間にわたって行われることが可能であること。⁽⁸⁾

炉心にあるジルコニウムが全て酸化してしまうのに要する時間（解析による推定）は下記の通りである：1,000°Cの場合 256h（約 10 日間）、1,200°Cの場合 36 時間（約 1.5 日）、1,400°Cの場合 8 時間、1,600°Cの場合 46 分、1,800°Cの場合 14 分。⁽⁹⁾ 安全評価指針にある 1,200°Cは、Zr-水反応の速度を考慮して決められたものである。

1975 年頃、日本原子力研究所の原子炉安全性研究炉（NSRR）で安全実証研究に携わっていた石川は、その著作（以下、“石川「考証」”と書く）⁽⁷⁾の中で冷却不全に陥った後の炉心のふるまいと、炉心溶融および水素爆発について下記のように説明している。

炉心の冷却が不十分になっても、圧力容器内に水が存在する場合には、崩壊熱だけでは炉心溶融は起こらない。Zr 製燃料被覆管は水と反応して外表面から酸化するが、高温状態ではその形状を保ち続ける。しかし、上記安全評価指針②にあるように酸化が進行すると全体が脆くなる。1,200°Cを超える高温の炉心に冷却水が注入されると、温度が下がると脆くなる酸化皮膜が収縮して破れ、燃料棒がバラバラに分断し、炉心は崩落する。この分断片がデブリである。デブリの破断面には高温の Zr が露出するので、ここで冷却水と接触して Zr-水反応が一段と激しくなり、反応熱で温度が上昇する。炉心溶融と水素爆発の原因となった大量水素ガス発生のはじめである。

福島原子力事故での炉心溶融が何時起こったかを知ろうと思えば、燃料棒が高温状態にあるときに冷却水が注入された時刻を探せばよい。このように考えて解明したのが“石川「考証」”で、溶融時刻や水素爆発も含め、東電が残している事故全体の経緯を示す記録を矛盾なく説明している。

消防車による注水状況と記録データから判断すると、1号機では12日の未明から、2号機では14日の深夜から、3号機では13日の午前10時前から炉心溶融が始まったと推定される。

崩壊熱と比較してZr-水反応によって発生する熱量がどの程度大きいかを1号機の未明時点で試算してみると、炉心が1,400°Cの場合は崩壊熱とほぼ同等であるが、1,600°Cの場合は約10倍、1,800°Cの場合は30倍になる。しかし、Zrが燃え尽きる時間を過ぎると炉心は冷えて固まる。崩壊熱によって炉心が溶けて流れ続けるかのイメージ映像がテレビで放映されることがあるが、そのような現象は起こらない。炉心にあるZrが全て酸化したと仮定すると、発生する水素の量は標準状態で1号機の場合1万8千m³、2,3号機の場合はそれぞれ2万5千m³におよぶ。これが水素爆発の原因となった。

以上の事実から、炉心溶融および水素爆発は崩壊熱だけで起きるのではなく、化学反応が切っ掛けとなって起こる、と結論できる。

“北西部地域の放射能による高度汚染は2号機のベント失敗が原因である”
“ベントの放射能除染効果は大きい”（石川「考証」による）⁽⁷⁾ ⁽¹⁰⁾

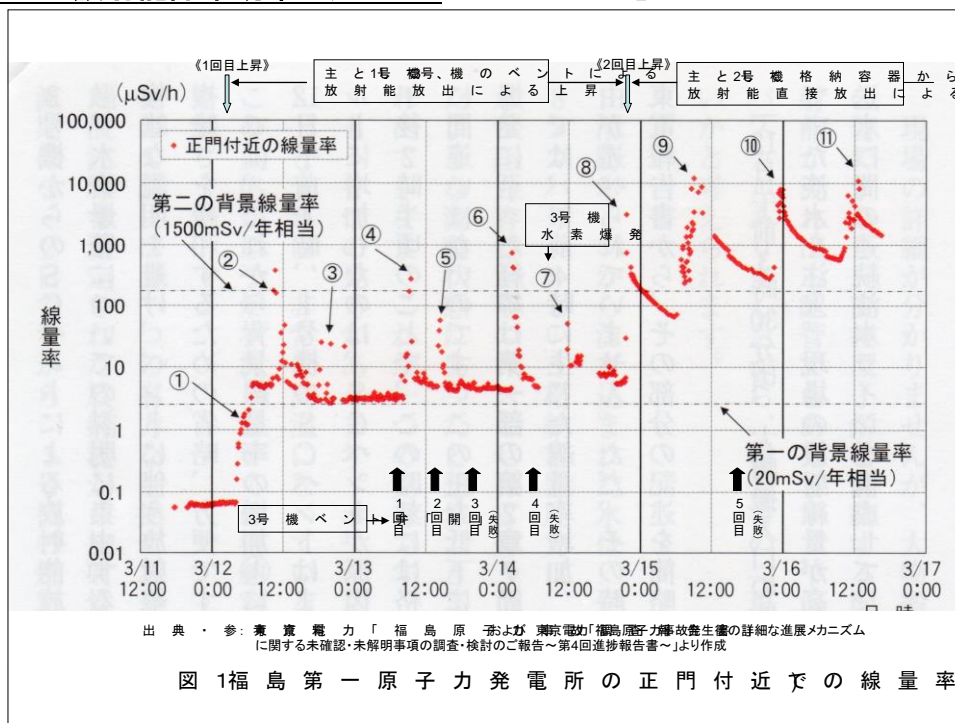


図1は福島第一原発正門付近（原子炉の西側約1km）に配備されていた放射線モニターが測定した事故当時の線量率データを整理したものである。測定された線量率は、3月12日04時(①)と14日22時(⑧)の二つの時刻を境として、二度にわたる急上昇を見せている。最初の線量率上昇(①から⑦まで)は、いずれも1号機と3号機からの放射能放出である。それに対して、線量率上昇が大きい二度目の放射能放出(⑧から⑪まで)は全て2号機が関与している。

1, 3号機からの放射能は、ほとんどがベントラインを通過して排気煙突から放出された。一方、2号機ではベントに失敗した状態でやむなく注水に踏み切ったところ、格納容器内部が高温・高圧となって気密が破れ、溶融炉心から放出された放射能が直接外部環境へ放出された。従って、この二つの線量率の比は、BWRベントが持つ除染効果を示していることとなる。図から、ベントは放射能の放出量を百分の一以下に減らす効果を持っていることがわかる。

その後の詳細検討で、BWRベントが示した極めて高い除染効果のメカニズムが解明された。BWRでは格納容器の下部に約3,000トンの水を蓄えたプールがある。ベント弁を開くと炉心から放出された大量に放射能を含む気体は一旦プール内

に放出され、水による“うがい効果”で放射能は洗い落されて、除染された気体が排気煙突から外部環境へ放出される仕組みになっている。1号機および3号機でベントを行った時点では、プール水が沸騰状態となっており、熔融炉心から放出された気体は“うがい効果”で除染された後、プールからの蒸気で約35倍に薄められて外部環境へ出たことがわかった。“うがい効果”とプールからの蒸気による“希釈効果”が重畳して、ベントは放射能の環境へ影響を1/350から1/1,000に低下させる効果を示した。⁽¹¹⁾

一方、3月15日には2号機から継続的に放射能放出があり、夕方からは北西方向に風が吹いており、また夜には発電所から北西方向の地域で雨雲が観測され、降雨があったものと推測される。発電所から北西方向（浪江町・飯館村に向かう方向）には高線量の汚染地域が確認されており、その主たる原因は2号機から15日の夕方以降に放出された放射能によるものと推定される。⁽¹²⁾ 最近の研究によると、この時生じた高度の放射能汚染地帯が最後まで帰還困難区域として残ると予想されている。⁽¹³⁾

ここで図1中の第一の背景線量率（約20mSv/年）に注目してみる。排気煙突から放出された放射能を含む気体塊（プルーン）が放射線モニターの上を通るときに、モニターは一時的に高い値を示すが、時間が経つとその場所に沈着した放射能の量に比例した一定値に落ち着く。第一背景線量率はそのような値である。事故が発生してからの数日は比較的穏やかな天候に恵まれことが幸いしたと推測されるが、原子炉から1kmの正門付近での線量率は避難勧告値の20mSv/年程度であり、正門から距離が離れた住民居住地ではそれより線量率は低かったと推定される。このような考察から、次のようなことが言える。

- (1) 11日には3km圏内に、12日未明には10km圏内に、夕方には20km圏内に避難指示が出された。国会事故調によれば、病院の入院患者や介護施設にいた方のうち、60名にのぼる方が緊急避難に伴って亡くなられたとある。しかし実際には図1のデータが示すように、14日の深夜までは避難は不要だったと考えられる。大きな反省点である。
- (2) 2号機でもしベントに成功していれば、住民居住地では放射能汚染は避難勧告線量率(20mSv/年)近傍の値にとどまった可能性を示している。現在、進められている再稼働に向けた安全審査では、既設のベントシステムに加えてフィルター・ベントの追加設置を義務付けている。これら二つのベントシステムが予定通りの性能を発揮すれば、炉心からの放射能放出を約一万分の一以下（2mSv/年以下）に下げることが期待できる。

事故後の原子力防災指針⁽¹⁴⁾では発電所から概ね約5km圏内では数時間以内に避難、概ね約30km圏内は屋内退避となっている。今後は、例え今回の事故と同規模の事故が発生したと仮定しても、各地の線量率を計測し、事故の進展を

見極めることにより、5km圏外の避難を回避することが期待できる。

原子力平和利用のために正直で公平な社会的議論を期待する

福島原子力事故以降、官産学の原子力関係者は事故原因を解明し、安全神話を反省し、多重防護を強化し、新しい基準を模索作成し、再稼働に向けて懸命の努力を続けている。ところがその活動内容は一般国民にはほとんど伝わっていない。規制委員会は、新規制基準は世界で最も安全を重視した基準であるといいながら、その中身を広く、分かりやすく説明する活動は行っていない。僅かに電力会社が原子力発電所地元住民を対象に説明会を行っているが、意見交換や議論をする場にはなっていない。

そのような中で福井地裁および大津地裁による大飯原発3,4号機や高浜原発3,4号機の運転差止仮処分判決が出された。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ それらの“当裁判所の判断”では、いずれも国会事故調⁽²⁾が指摘した前述の①「安全上重要な機器の地震による損傷はないと確定的には言えない。」、②「事故原因の解明はなされておらず、この先何年も調査、検証することはできない」と述べている。そして、規制委員会が「事故の原因は地震ではない」と判断した報告書⁽³⁾には一片の顧慮も払っていない。その上で、福島原子力事故の原因解明が道半ばの状況において、事業者および規制委員会が地震の影響に意を払わないのであれば、新規制基準そのものに非常に不安を覚えるとしている。科学技術を大切にすべき先進国の司法のあり方に疑問を感じる。

丁寧な説明をしようとはしていない規制委員会と、科学技術に耳を傾けようとせず、頑なに原発の安全性に対する疑念を強調する人びととの間に、我が国の大多数の国民が置かれており、少ない情報の基で半数以上の国民が原発の安全性に不安を感じている。そのことが将来において原子力への依存度をできるだけ少なくするというエネルギー基本計画に反映されているように見える。

原子力エネルギーの活用は、我が国が工業立国を標榜し続ける上でも、我が国のエネルギー安全保障の観点からも、また持続可能な世界を創り出すためにも不可欠であり、疑問の余地がない。そのためには正しい情報を広く社会へ発信し、正直で公平な議論を通して社会的な合意を形成する努力が必要である。

結論：原子力発電の安全性は技術で解決することができる

福島原子力事故の原因は解明されている。原因が明らかになれば、原子力発電の安全性は技術で解決することができる。

今回のような過酷事故を防止するためには、津波のような安全を脅かす外部からの大きな事象に対する緩和策を強化するとともに、非常用電源の多重化・多様化が基本的に重要である。炉心溶融や水素爆発は高温になった炉心に水が注入された時に生じるZr-水反応が切っ掛けとなって起こる。これを防ぐために

は、炉心が高温になる前に（もしくは減圧によって炉心を徐冷した直後に）水を注入して冷却することと、格納容器の圧力上昇を防ぐためのベントを合わせて確実に行えるような対策強化が重要である。外部環境への放射能放出を十分に下げるためには、追設されるフィルターベントが有効である。

原発の再稼働に向けては、これらの対策が全て盛り込まれた新安全審査基準が適用されている。

以上

参考文献

- (1) “中間報告書”、福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、平 23. 12. 26
- (2) “国会事故調報告書”、東京電力福島原子力事故調査委員会、2012. 7. 5
- (3) “東京電力福島第一原子力発電所事故の分析 中間報告書”、原子力規制委員会、平 26. 10. 8
- (4) “福島原子力事故調査報告書(中間報告 別冊)” 東京電力、2011.12.2
- (5) “今回の津波は、それまでの知見では想定できない大規模なものでした”、東京電力、2012.4.17
- (6) “原子力発電所の津波評価技術”、日本土木学会 原子力土木委員会、2002.2
- (7) “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”、石川迪夫、2014. 3. 28、日本電気協会新聞部
- (8) “軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針”、原子炉安全専門審査会、1975
- (9) “NHK原子力報道を考える (下)”、牧英夫、エネルギーレビュー、2015. 11
- (10) “福島第一原子力発電所事故の考証 (1) 炉心溶融と放射能大量放出はどのように起こったか”、石川迪夫、機械学会第21回動力・エネルギー技術シンポジウム、2016. 6. 16
- (11) “福島第一原子力発電所事故の考証 (2) 実測データに基づく耐圧ベントの除染効果”、牧英夫・奈良林直・今枝宏紀、機械学会第21回動力・エネルギー技術シンポジウム、2016. 6. 16
- (12) “福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言 —学会事故調 最終報告書”、日本原子力学会、H26. 3. 11.、丸善出版
- (13) “連載講座 福島環境回復に向けた取り組み 第2回 事故進展と放射性物質の放出・沈着分布の特徴”、斎藤公明他、日本原子力学会誌、VOL. 59, No. 6(2017)
- (14) “原子力防災対策指針”、原子力規制委員会、平29. 3. 22改定
- (15) “大飯原発3, 4号機運転差止請求事件”、福井地裁、平26. 5. 21
- (16) “大飯原発3, 4号機及び高浜3, 4号機運転差止仮処分命令申立事件”、福井地裁、平27. 4. 14.
- (17) “平成27年(ヨ)第6号 原発再稼働禁止仮処分申立事件”、大津地裁、平28. 3. 9.