

注(2011年4月7日)

本稿でいう『核爆発』とは、『熱中性子による即発臨界』にともなう爆発であって、いわゆる『核爆弾』のような『速中性子による即発臨界』ではない。

^技術と人間 二〇〇二年七月号 原稿^

水素爆発か核爆発か？

今中 哲二

チェルノブイリ原発4号炉爆発の正体

本誌五月号の「運転員はなぜAZ5ボタンを押したか？」では、チェルノブイリ原発4号炉が暴走に至るプロセスと事故原因について、最近の報告などを紹介しながら問題点を整理した。チェルノブイリ事故が、原子炉出力制御に失敗して出力が急激に上昇する「暴走事故」であったこと、またチェルノブイリ型RBMK原発が一定の条件下で暴走しやすい「欠陥炉」であったことは間違いないが、どのようなきつかけで暴走がはじまり、運転員がそこでどのような役割を果たしたかについては、いまだに定説がないことを述べた。

「最初の暴走」では原子炉内の一部の燃料棒や圧力

管チャンネルが破壊されたものの、核燃料温度の上昇にともない核分裂反応が起きにくくなる「ドップラー効果」によって、出力暴走はいったん収まったと考えられている。一方、事故のとき屋外にいた目撃者によると、一回またはそれ以上の爆発が続いて起きて夜空に花火のような吹き上げがあったという。これらの爆発により4号炉の原子炉と建屋は一瞬のうちに破壊されたが、こうした爆発は「最初の暴走」そのものではなく、「第二のプロセス」によって生じたものであった。圧力管チャンネルといった炉心内構造物が破壊された結果、「第二のプロセス」がはじまったのであ

った。

一九八六年八月にソ連がIAEAに提出した事故報告書（以下、ソ連事故報告）(二)によると、第二のプロセスの結果、炉心での「水素爆発」に至ったとされている。最初の暴走によって高温となった炉心で、燃料棒被覆管や圧力チャンネル管の材料であるジルコニウム合金が水と反応して大量の水素が発生し、そこに空気が混じって、最初の暴走の数秒後に水素爆発が発生して建屋全体が破壊された、というストーリーである。しかしながら、このストーリーは発表当初から疑問視されている。筆者らは、最初の暴走により炉心構造が破壊され、炉心部の冷却水がなくなった結果、「正のボイド反応係数」効果の出現により第二の暴走がはじまり、最終的に一種の「核爆発」に至った可能性を考えている。

最初の暴走プロセスについては、旧ソ連をはじめ各国の研究者がコンピュータ解析を行っていることを五月号で紹介した。しかし、第二のプロセスについては、崩壊過程にある炉心の状況をモデル化することは困難であり、かりに強引にモデル化できたとしてもその解析結果を検証すべき実験データが存在しない。つ

まり、コンピュータ解析はお手上げである。したがって、第二のプロセスの分析は、現場の検証と定性的な議論が中心となる。本稿では、「水素爆発か核爆発か」という視点から、4号炉建屋を破壊した爆発の正体についての議論をまとめておく。

1 現場の検証

建屋の崩壊状況

事故が発生したのは一九八六年四月二十六日午前一時二四分頃であった。爆発にともなう炉心内の黒鉛ブロックや核燃料が飛散し、原子炉建屋やタービン建屋のあちらこちらで火災が発生した。炉心そのもの以外の火災は、消防士らの活躍により夜明けまでに消火された。しかし、炉心で発生した黒鉛火災はその後一〇日あまり継続し、その間放射能の大量放出が続いた。この黒鉛火災を消火するため軍のヘリコプター部隊が動員され、四月二十七日から五月二日にかけて、砂、ドロマイト、鉛など五〇〇〇トンあまりの物資が上空から炉心めがけて投下された。

4号炉建屋の周りには、爆発で崩れた壁や屋根がガレキとなって積み上がり、また炉心から吹き飛ばされ

た黒鉛ブロック、チャンネル管破片などが建屋周辺に散らばっていた。なかには二百mも飛ばされていた破片もあった。五月半ばに放射能の大量放出が終息すると建屋周辺のガレキの片づけがはじまった。このガレキの片づけ作業にあたったのは、ソ連陸軍の化学部隊であることは確かであるが、作業方法や被曝の詳細は明らかではない。六月に入ると、破壊された4号炉全体をコンクリート構造物で覆ってしまう「石棺」の建設工事がはじまった。突貫工事により十一月はじめて石棺が完成した。

図1は、崩壊した4号炉を北側からとった写真である。撮影の日は不明であるが、遠方にクレーンが写っていることから、石棺建設工事がはじまって間もない頃であろう。図2の建屋構造図と比較すると分かりやすいが、原子炉の中央ホールは消滅し、わずかに西側の壁が残っているだけである。崩れた鉄骨や配管の下に多数の垂直配管が見える。これらは、外側壁が吹き飛んでしまった気水分離タンク室の配管である。

石棺建設の最終段階にあった一九八六年九月、隣接する3号炉との共用建屋の屋根に散らばっていたガレキが撤去され石棺の中に放り込まれた。キセリヨフ

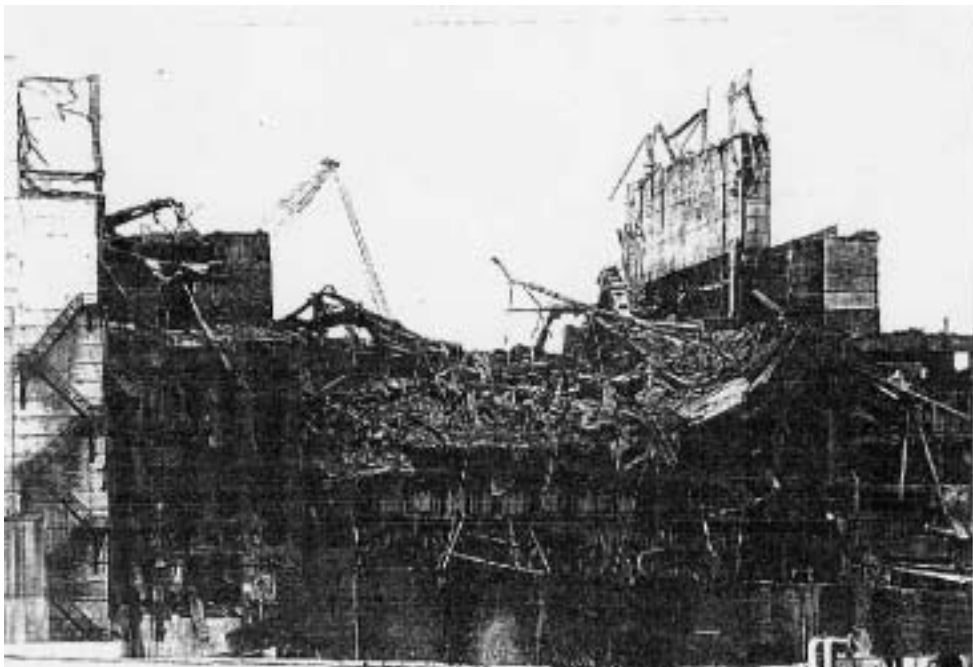


図1 崩壊したチェルノブイリ4号炉（クルチャトフ研ボロボイ氏提供）

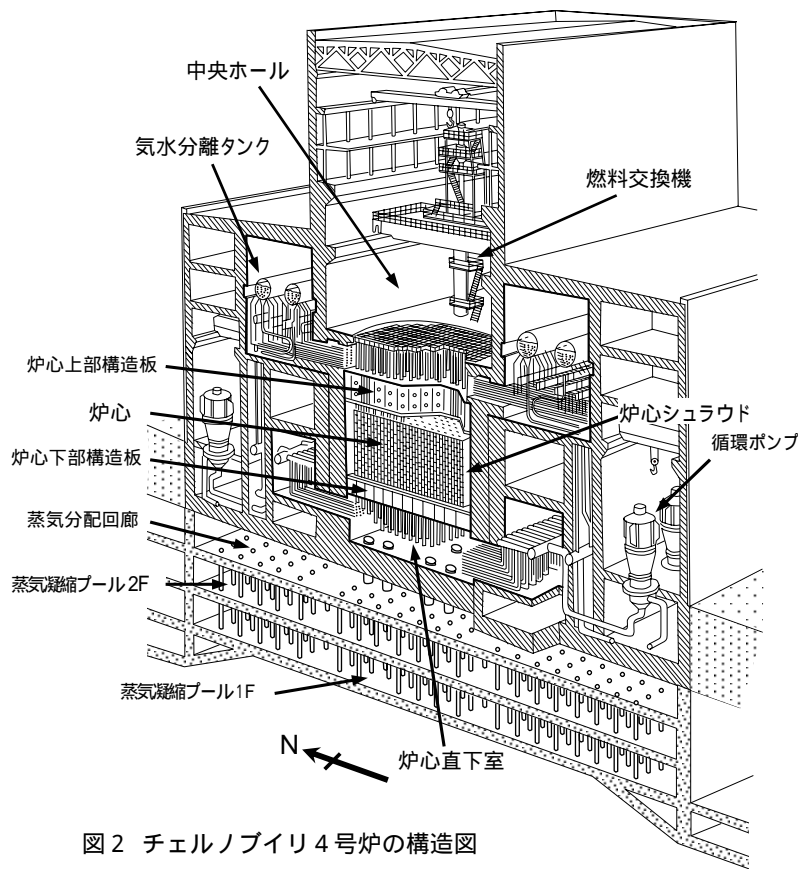


図2 チェルノブイリ4号炉の構造図

らの最近の論文(28)によると、このとき共用建屋の屋根から撤去された黒鉛の量は二二三・六トンで、圧力チャネル管やその破片が二六・一トンであった。4号炉の炉心にあった黒鉛ブロックの量は約一七〇〇

トンであり、約七%の炉心内構造物が、共用建屋の屋根に飛び散っていたことになる。この数字に基づくと、爆発にともなうかなりの割合の炉心内構造物が吹き飛ばされたものと考えられる。

空っぽだった炉心

ソ連事故報告によると、炉心から放出された核燃料の量は炉心の三丁四%であり、残りの燃料は石棺内の炉心に閉じこめられていることになっていた。石棺の完成後、モスクワのクルチャトフ研究所が中心になって、破壊された4号炉の詳しい状況調査がはじまった。事故から二年たった一九八八年頃、炉心キャビティの外側から炉心へ向けて壁のボーリングが行われテレビカメラが挿入された(29)。炉心には、崩れた炉心構造物やヘリコプターから投下された物資がぎっしり詰まっているはずであった。ところが、テレビカメラに写ったものは、ほとんどガランドウになっている炉心だった。ヘリコプターから投下された資材は炉心にはまったくと言っていいほど届いていなかった。投下された資材の多くは、中央ホールの東側の床に一〇mほどの小山になって積もっていた。

その後の調査をふまえて作成された炉心のスケッチを図3に示す(註)。圧力チャンネル管や制御棒チャンネルなどチャンネル管が貫通し重さ二五〇〇トンもあつた上部構造板は、ほぼ垂直になつて炉心キャビティに引っかかり、引きちぎられたチャンネル管が垂れ

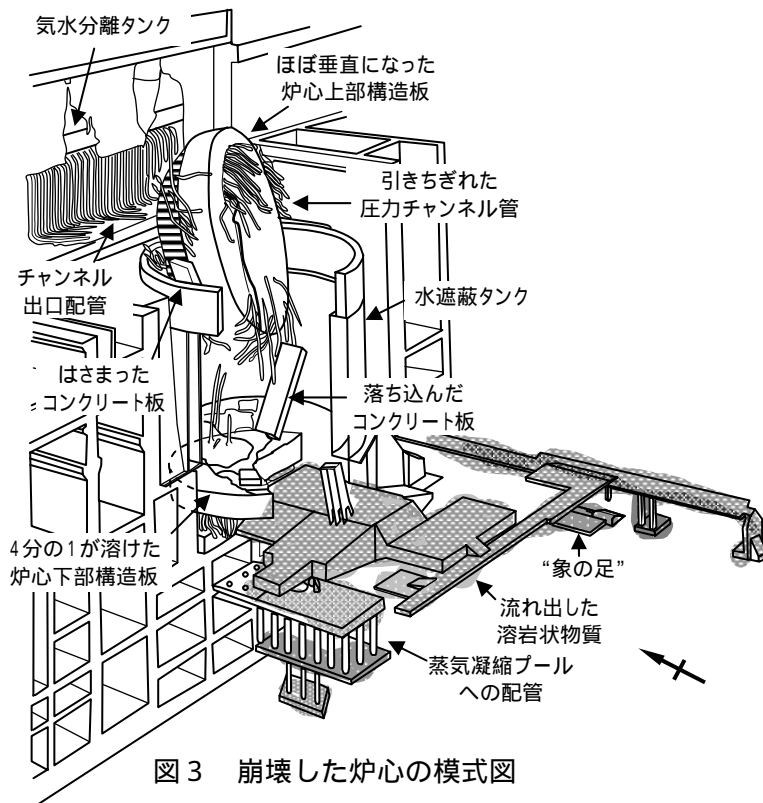


図3 崩壊した炉心の模式図

下がっている。下部構造板は、炉心直下の配管室を押しつぶすように四mほど下がり、その四分の一が溶けてしまつている。下部構造板の上には、わずかの黒鉛ブロックや圧力管の一部が残つていた。注目されるのは、炉心キャビティに大きなコンクリート板が落ち込んでいることである(一〇×五×一・四mと五×二×二mの二枚)。コンクリート板は、気水分離タンク室の壁であつた(註)。また、上部構造板と炉心キャビティの間にもコンクリート板がはさまつてゐる。これらのことは、事故時に上部構造板が中央ホール空間に飛び上がり、それも一定時間空中にあつたことを示唆している。

ウラン燃料はどこへ

事故が起きたときのチェルノブイリ4号炉には、一九〇トンのウラン燃料が装荷されていた。石棺の安全性にとつて最も危惧されるのは、残つた核燃料で核分裂連鎖反応がはじまる再臨界である。一九九一年のソ連崩壊後、石棺の管理責任はウクライナに移り、現在はウクライナ科学アカデミー科学技術センター・シエルトアが管理を担当している。この間、炉心調査と平

表1 石棺内の溶岩状物質に含まれるウラン量

場所	溶岩状物質中のウラン量(トン)	
	<シェルター報告>	<キセリヨフ論文>
炉心直下室	75 (+25 -35)	11.6 ± 1.9
蒸気分配回廊	25 ± 11	3.75 ± 0.6
蒸気凝縮プール(2F)	8 ± 3	2.2 ± 0.3
蒸気凝縮プール(1F)	1.5 ± 0.7	0.4 ± 0.1
その他の周辺区画	11 ± 5	5.5 ± 1.5
合計	120 (+45 -55)	23.45 ± 4.4

岩状物質」となつて炉心下部の区画に流れ出していた。図3の灰色部分は、溶岩状物質の主な存在場所を示している。溶岩状物質は、炉心直下室から蒸気分配回廊へ流れ出し、さらに蒸気逃がし配管を通じて、二階と一階の蒸気凝縮プールにまで達している。さまざまな場所の溶岩状物質サンプルが採取され、その成分と放射エネルギーが測定されている。その分析

行して石棺内各区画の状況調査が行われてきた。炉心にあつた核燃料は、炉心構造物と反応して溶融し、「溶

結果によると、溶岩状物質は、核燃料がジルカロイやステンレスといつた炉心構造材、遮蔽材に使われていた砂(蛇紋岩)、コンクリートなどと反応してきたもので、ウラン燃料の平均含有率は約7%であつた(5)。蒸気分配回廊から蒸気凝縮プール二階へ流れ落ちたところで固まつていた溶岩状物質の一部は、その塊の形状から「象の足」と名付けられて有名になつている。

放射線量が非常に高いこと、また石棺建設の際に注入されたコンクリートが各区画に流れ込んでいることから、溶岩状物質に含まれているウラン燃料の総量を推定することは、きわめて困難な作業であつた。一九九七年に発表されたシェルターの報告書(6)では、目視や発熱量測定などによつて、溶岩状物質に含まれているウランの量は二二〇トン(六五〜一六五トン)であると推定されている(表1)。溶岩状物質以外のウラン燃料の分布について、ウクライナ科学アカデミー核研究所のパブロービッチは、石棺内にチリとして飛び散つているのが約三〇トン(かなり不確か)、上部炉心構造板に垂れ下がっている圧力チャンネル管に残っているのが一〇〜三〇トンで、その他、

中央ホールのカレキの下にかなりの核燃料が埋まっているであろうと推定している(7)。

中央ホールには爆発で崩れた建屋のカレキやヘリコプターから投下された物資が積もったままであり、また、飛び散っているチリの量などもと推定困難である。ウラン燃料の推定値が不確かなのもやむを得ないところであろう。シエルター報告とパブロービッチの評価に基づいておおざっぱに言えば、ウラン燃料の約六割(推定範囲は四割～八割)が溶岩状物質となり、残りが中央ホールのカレキの下になったり、チリになったりして飛び散ったことになる。

一方、クルチャトフ研究所のキセリヨフは、目視による溶岩状物質の体積推定に基づいて、含まれるウランの総量を二三・五トンプラスマイナス四・四トンと、先のシエルター報告に比べかなり小さく推定している(表1)(8)。キセリヨフの値に基づくと、溶岩状物質となったのは全体の一割程度となる。

「第二のプロセス」を考えるにあたって、炉心のウランがどこに行ったかは極めて重要である。シエルター報告やパブロービッチに基づくなら、不正確ながらもウランの行方はだいたい勘定できるが、キセリヨフ

の評価によると、ウランの大部分が「行方不明」となってしまう。

なお、再臨界の可能性については、パブロービッチらが、最も危険と思われる炉心直下区画の溶岩状物質について、さまざまなケースを想定してモデル計算をしている(9)。その結果、溶岩状物質に四〇%の水が含まれるといった非常に極端な条件以外では臨界には至らないという結果が得られている。

2 第二のプロセス

最初の暴走と第二のプロセス

「最初の暴走」の解析結果が示すところでは、最初の暴走によって核燃料の温度が上昇し、一部はその融点に達した。溶融燃料が燃料棒被覆管に接すると、被覆管が破壊されさらに溶融燃料と冷却水が接触する。冷却水の急激な沸騰により一種の「水蒸気爆発」が発生し、その圧力によっていくつかの圧力チャンネル管が破損した。圧力チャンネル管が破損すると、冷却水は、上下の炉心構造板と炉心シールドによって形成される「炉心容器」に漏洩して蒸気となり、「炉心容器」の圧力が急上昇する。

原子炉建屋地下にある蒸気凝縮プール(図2)は、配管破損や圧力チャンネル管破損といった冷却水喪失事故の際に、漏洩した高圧蒸気を導いて凝縮させ漏洩区画の圧力上昇を抑えるためのものである。しかし、RBMK炉の炉心設計では、一本の圧力チャンネル管破損しか考慮されておらず、複数本の同時破損には対応できなかった。多数の圧力管が破壊され、約七〇気圧の冷却水が大量に噴出するとひとたまりもなかった。ここから「第二のプロセス」がはじまる。

チェルノブイリ事故の原因を再検討した一九九一年のシテインベルグ報告書(6)によると、炉心容器内の圧力上昇により炉心上部構造板が持ち上がった。その変形によって、構造板に溶接されている他の圧力管に破損が拡大した。さらなる蒸気発生と圧力上昇により、炉心シユラウド内ではドミノ現象のように圧力チャンネル破損が拡大し、すべてのチャンネル管が破損した。最初の暴走からドミノ的炉心崩壊までの時間は一秒からせいぜい数秒であったと考えられている。

ソ連事故報告をはじめとする多くの報告では、事故の際には複数回の爆発があり、後の爆発の方が大きかったとされている。うなり声のような音がはじめに響

いてきたという証言もある。炉心での破壊進行にともなうて、高温燃料が冷却水にふれて次々と水蒸気爆発を起こしたり、高圧蒸気が炉心から大量に噴き出した。実際の衝撃が、目撃者のいう最初の爆発に対応していると思われる。二五〇〇トンもの上部構造板が圧力によって浮き上がったのであれば、それが落下したときの衝撃も大変なものであったろう。

しかし、炉心と建屋を完全に破壊したのは、最初の爆発に引き続くさらなる爆発であった。この爆発の正体を考えるにあたって、考慮に入れるべき二つの現象を説明しておく。

ジルコニウム・水反応と水素爆発

圧力管や燃料被覆管の主成分はジルコニウムという金属である。ジルコニウムは、高温になると水と容易に反応して酸化ジルコニウムになり水素を発生する。この反応は発熱反応であり、九〇〇度Cではじまり一〇〇〇度Cを越えると急激に進行する。RBMK炉の炉心部には約一七〇トンのジルコニウムが存在していた(7)。その一割でジルコニウム・水反応が発生したとすると約七五〇kgの水素(常温常圧で約八〇

〇〇立方m)が発生する。それがすべて空気と混合して水素爆発に至り、水素のうち一割つまり七五kgが反応したとすると、そのときの発生エネルギーは九ギガジュールとなりTNT火薬約二トンの爆発に相当する。

即発臨界と核爆発

五月号でも説明したが、蒸気などの気泡(ボイド)が炉心で発生すると核分裂反応を促進するように働く効果は「正のボイド反応度係数」と呼ばれ、RBMK炉の設計欠陥のひとつであった。炉心での核分裂の状態は、ボイドだけではなく、燃料の組成や温度、冷却水の温度、炉心の幾何学的配置などさまざまな条件によって左右される総合的な「反応度」によって決まってくる。反応度がプラスであれば出力が増加し、マイナスであれば低下する。

話が若干ややこしくなるが、原子炉の制御が可能なのは、核分裂によって生まれる中性子の中に、核分裂より数秒から一分程度遅れて分裂生成物から放出される「遅発中性子」が含まれているからである。RBMK炉のような黒鉛減速炉での炉心での平均中性子

寿命は一〇〇〇分の一秒程度である。もしも、遅発中性子が存在せず、すべての中性子が核分裂の瞬間に発生する「即発中性子」であったならば、“制御のアソビ”がなくなつて反応度がプラスになると原子炉はたちまち暴走してしまふ。遅発中性子の割合はベータ値と呼ばれ、主として燃料の組成に依存する。事故当時のチェルノブイリ4号炉の場合、ベータ値 $\beta = 0.5\%$ であった(二)。反応度が大きくなつてベータ値に達すると、即発中性子だけで臨界になつてしまふ「即発臨界」に至る。原子炉が暴走に至つたとは、反応度がベータ値を越えたことを意味している。

チェルノブイリ事故の場合、最初の出力暴走で反応度はいったんベータ値を越えたが、燃料温度上昇にもなうドップラー効果によって暴走は収まった。チェルノブイリ4号炉の場合、ドップラー効果によって投入される負の反応度は最大でマイナス三・五ベータとされている。一方、4号炉炉心から完全に水が抜けたときに投入される反応度はプラス五ベータ以上と見積もられている(三)。従つて、4号炉の炉心から一挙に水が抜けた場合の反応度は、ドップラー効果によつても押さえきれずに出力上昇が続くことになる。この

場合、爆発的なエネルギー放出によって炉心形状が破壊され、形状変化にもなつて反応度が下がるまで暴走が続き、一種の「核爆発」に至る。

3 爆発の正体

炉心内水素爆発説

はじめに述べたように、八六年に発表されたソ連事故報告書では、最初の暴走の二、三秒後に炉心内で水素爆発が起き、原子炉と建屋が破壊されたとしている。高温になつた炉心で水・ジルコニウム反応により大量の水素が発生したのは確かであろうが、炉心で水素爆発に至るには空気とうまく混合される必要がある。高温高圧の蒸気が噴き出している炉心部へ数秒間で空気が混じり込んだとは考えがたい。また、上部構造板が持ち上がって大きく開口したとすれば、発生した水素は直ちに炉心から抜けてしまったであろう。

ソ連事故報告書を検討したIAEAの専門家グループは、建屋を破壊した爆発が水素爆発によるものか核暴走によるものかは不明であるとしている(12)。日本の原子力安全委員会がまとめたチェルノブイリ事故報告書(13)は炉心内での水素爆発を否定し、中央ホ

ールや気水分離タンク室で水素爆発が起きたものであると述べている。一方、日本原子力研究所(当時)の石川迪夫氏は、炉心上部で二〇kgの水素が反応しTNT火薬約六〇〇kgに相当する水素爆発が起きたであろうと推測している(14)。

中央ホール内水素爆発説

科学技術センター・シエルトアのゴルバチョフによると、原子炉中央ホールで発生した水素爆発が4号炉建屋を破壊した爆発の正体である(15)。「最初の暴走」によって複数の圧力チャネルが破壊された結果、炉心部の圧力上昇によって上部構造板が変形し、すべての圧力管が破壊されるに至つた。噴出する蒸気の圧力により、上部構造板は一〇〜一四m持ち上がった。同時に炉心ではジルコニウム・水反応が急激に進行し、発生した水素は原子炉中央ホールに充満して水素爆発に至つた、というストーリーである。ゴルバチョフによると、発生した水素の量は五〇〇〇立方m以上で、中央ホールの破壊状況は「真空爆発」(爆発後の吹き戻しによる破壊)に似ていたと述べている。

中央ホール内での水素爆発は、いかにも起きやすく

爆発に至るストーリーに無理が少ない。しかし、現場の状況を検討して明らかのように、爆発によって黒鉛ブロック、チャンネル管、燃料棒などの炉内構造物が建屋内外に吹き飛ばされたことは明らかである。中央ホールでは炉心シユラウドの破片も発見されている。中央ホール内水素爆発説は、こうした炉心内構造物の飛散を説明できない。

炉心内核爆発説

ベラルーシ核エネルギー合同研究所のマリコは、「最初の暴走」によって破壊された炉心から冷却水が抜けてしまった結果、新たに始まった核暴走が「爆発の正体」であると主張している(16)。マリコは、マルチネス・バルらの解析結果(12)を引用して、第二の暴走で発生したエネルギーはTNT火薬約二〇〇トン分であったと述べている。一種の「核爆発」が炉心で発生したと言えるであろう。

筆者も、4号炉建屋を破壊した爆発は炉心内核爆発であった可能性が大きいと考えている。爆発によって炉内構造物のかなりの部分が吹き飛ばされ、建屋も瞬時に崩壊した。上部構造板も吹き飛ばされて建屋の壁

と衝突したり跳ね返ったりしながら、ほぼ垂直になつて現在の位置に収まったのであろう。その間に崩壊した壁パネルの一部が炉心キャビティに落ち込んだものと思われる。

炉心内核爆発説で説明しにくいのは、水遮蔽タンクといった炉心キャビティの遮蔽体がほとんど損傷を受けていないことである(炉心シユラウドは炉心とともになくなっている)。「核爆発」といっても、「核爆弾」とは違っていたはずである。核爆弾では一〇〇万分の一秒といった時間で核分裂が終了するが、チエルノブイリの「核爆発」は〇・一秒から一秒程度と思われる。このため、核爆弾のような衝撃波が発生せず炉心キャビティが破壊されなかったのではないかと推測している。

空中核爆発説

科学技術センター・シエルターでの一年間の調査の後、元米国エネルギー省のパービス3世は、チエルノブイリ事故では、炉心の構造物が一体となつて中央ホールに浮き上がり、空中で核爆発を起こした、という説を発表している(17)。パービス3世によると、「最

初の暴走」によって複数本のチャンネル管が破壊されたが、破壊された箇所は、ジルカロイ合金管とステンレス管が溶接によって接合されている炉心下部であった。この接合部での破損が瞬く間に全チャンネル管に拡大し、各チャンネルから吹き出す蒸気のジェット噴射によって、炉心シユラウド、黒鉛ブロック、圧力チャンネル管、上部構造板が一体となって浮き上がった。少なくとも一四m浮き上がったところで、炉心の冷却水がなくなつて新たな核暴走が起きて一種の「核爆発」に至り建屋が崩壊した、というストーリーである。

炉心が丸ごと浮き上がつて核爆発したなど荒唐無稽に感じるが、この説では、炉心部が空っぽだったこと、水遮蔽タンクなどが健全だったことなどが容易に説明される。溶岩状物質に含まれているウラン燃料は炉心全体の一割程度しかなかったと評価しているキセリヨフらも空中核爆発説を支持している(2)。キセリヨフらによると、空中核爆発の放出エネルギーはTNT火薬にして一〇〇トンから二七〇トンである。

しかしながら、空中核爆発では、炉心の黒鉛火災を説明できないし、大量の放射能放出が、その組成を変

えながら一〇日余り継続したことも説明困難である。

以上、チェルノブイリ事故で発生した爆発の正体に関する諸説の概要とそれぞれの問題点を紹介した。いずれの説も状況証拠と定性的な議論が中心で決定的とは言い難いが、筆者としては炉心内核爆発説が「爆発の正体」としていまのところもつとも合理的な説明であろうと考えている。といっても、水素爆発があつたことを筆者が否定しているわけではない。むしろ、炉心内核爆発とほぼ前後して、中央ホールや気水分離タンク室で水素爆発があつたとすれば、炉心キャビティに落ち込んでいるコンクリート板の存在を説明しやすくなる。核爆発と水素爆発が両方起きたというのが本当のところかも知れないとも感じている。

最後に、核爆発が起きたことを支持する証拠をもつひとつ紹介しておこう。チェルノブイリ事故の発生をソ連領外でいち早く検知したのはスウェーデンであった。スウェーデンには爆発にもなつて最初に放出された放射能雲が到達したと考えられている。スウェーデン・ストウツツビク研究所のデーベルらは、一九八六年五月十五日のネイチャー誌にスウェーデンに

飛来した放射能の観測結果を発表している(18)。その報告によると、ルテチウムやバリウムといった高融点金属を含むほほ球形のホットパーティクルが観察されている。すなわち、事故の発生時にウラン燃料の温度が四〇〇〇度以上に達し、これらの元素が蒸発してそれから凝固したことを示している。このような現象は水素爆発では考えられず、核爆発があったことを強く示唆している。

(本稿は、文科省科学研究助成研究「スラロウシ、ウクライナ、ロシアにおけるチェルノブイリ原発事故研究の現状調査」の一環としてまとめられたものである。)

(いまなかつしじ 京都大学原子炉実験所)

文献

1. USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences", August 1986.
2. Киселев А. Н., Чечеров К. П., "Модель процесса разрушения реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС", *Атомная Энергия* T.91 №6 2001.

3. Боровой А.А., "Внутри и вне Саркофага", *Природа* 1990 №11.
4. V. K. Tolstomogov, "Current State of the Sarcophagus and Safety Problems", Sarcophagus Safety '94: The State of the Chernobyl Nuclear Power Plant Unit 4, OECD/NEA 1995.
5. A. A. Borovoi, A. R. Sich, "The Chernobyl Accident Revisited, Part II: The State of the Nuclear Fuel Located within the Chernobyl Sarcophagus", *Nuclear Safety*, 36 No.1 (1995).
6. В. Н. Гераевко и др. "Объект УКРЫТИЕ. История, состояние и перспективы", Киев 1997.
7. V. M. Pavlovich, "Nuclear Fuel in the Destroyed 4th Unit of Chernobyl NPP", 今中 紘・チエリノブイリ論文集(原子炉デブリカルレポート)として出版準備中)。
8. Киселев А.Н., "Сколько же ядерного топлива находится в лавообразной топливосодержащей массе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС?", *Атомная Энергия*, T.78 №4 1995.
9. Комиссия Госпромагмоннадзора СССР, "О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986г.", 17.01.1991.

10. A. R. Sich, "The Chernobyl Accident Revisited, Part III: Chernobyl Source Term Release Dynamics and Reconstruction of Events During the Active Phase", *Nuclear Safety*, 36 No.2 (1995)
11. Jose M. Martinez-Val et al., "An Analysis of the Physical Causes of the Chernobyl Accident", *Nuclear Technology*, Vol.90 1990.
12. INSAG, "Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident", Safety Series 75-INSAG-1, IAEA, 1986.
13. 原子力安全委員会「ソ連原子力発電所事故調査報告書」昭和六十二年五月二十八日。
14. M. Ishikawa et al., "An Examination of the Accident Scenario in the Chernobyl Nuclear Power Station", *Nuclear Safety*, Vol.28 No.4, 1987.
15. B. I. Gorbachev, "Causes and Scenario of the Chernobyl Accident, and Radioactive Release on the CHNPP Unit-4 Site", 全中電・ホシムンハイニ継文集。
16. M. V. Malko, "The Chernobyl Reactor: Design Features and Reasons for Accident", 全中電・ホシムンハイニ継文集。
17. E. E. Purvis III, "The Chernobyl 4 Accident Sequence: Update –April 1995", Intersectorial Scientific and Technical Center "UKRYTIE", 1995.
18. L. Devell et al., "Initial Observations of Fallout from the Reactor Accident at Chernobyl", *NATURE*, Vol.321, 15 May 1986.