資料

チェルノブイリ原子力発電所事故の 原因と経過

佐藤 一 男*

(1986年 11月 8日 受理)

Sequence and Causes of Accident of Chernobyl Nuclear Power Station

By Kazuo SATO

The worst accident in the nuclear energy history happened at the Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Station in the USSR on 26th April, 1986. The reactor and its building were severely damaged and a large amount of radioactive materials was released to the environment.

In August, a post accident review meeting was held at the IAEA, Vienna, where the USSR presented the main feature of the reactor (RBMK-1000), accident cause, process and consequence. According to the USSR report, the direct cause of the accident was multiple serious violations of the operational rules by the operators which, combined with rather unique characteristics and design of the reactor, resulted in a very severe power excursion. In the present report, is outlined the accident and its consequence based on the USSR report at the above mentioned meeting.

KEYWORDS: *Chernobyl reactor, evacuation, fuel fragmentation, operational reactivity margin, nuclear power plants, RBMK-1000, reactivity accidents, reactor operation, void coefficient*

I. はじめに

1986年4月26日未明、ソ連ウクライナ共和国のチェルノブイリ原子力発電所4号機で大事故が発生した。この事故は、原子炉の損傷程度、死傷者数、放出放射線量など、いずれをとっても原子力開発史上未曾有のもので、世界中に大きな衝撃を与えた。遠く離れた日本まで、明らかにこの事故に由来すると思われる放射性物質が(微量とはいえ)飛来したことからも、この事故がいかに大きなものであったかをうかがうことができる。

事故発生後しばらくの間は、事故について信頼できる情報はほとんどなかった。一部外電は死者2,000人と報じ、さすがにこの数字は誰しも疑問に思ったが、事故の原因、経過、影響などの正確なところは、全く不明であった。そればかりか、事故を起こした原子炉そのものが、ソ連が独自に開発したユニークな炉型であり、その特性や設計の詳細は不明であった。

5月上旬、IAEAのBlix事務総長らはソ連を訪問し、当時判明していた事故状況を聴取するとともに、この事故についての情報の提供を申し入れた。ソ連もこの申し入れを原則的に受け入れ、8月25日から5日間にお

たって、ウィーンのIAEA本部において国際会議が開かれ、ようやく事故のアウトラインが明らかになった。本報は、この会議におけるソ連の報告に基づいて、事故の原因、経過等を紹介する。

ソ連の報告は、事故後4ヵ月の時点での調査に基づくものである。炉は大規模に破壊され、かつ事故時の当事者の多くが恐らくは死亡または重症の状態にあることも考え合わせれば、ソ連の報告は恐らくなし得る最善のものに近かったと思われる。事実、ソ連は今回の会議では極めて率直かつオープンな態度で報告を行ったとして高く評価されている。しかし、事故の詳細については、未だ不明な点が多数残されている。これからの調査結果も含めて、ソ連が今後とも積極的に情報提供を行うことが強く期待される場所である。

II. 事故炉の特徴

先に述べたように、事故を起こしたチェルノブイリ4号機は、ソ連が独自に開発したRBMK型に属するも

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

本稿は、1986年9月18日、本会「原子力安全」調査専門委員会における講演内容を要約したものである。

のである。この炉型は、ソ連が1954年に世界で最初に原子力発電に成功して以来、営々と開発を続けてきた炉である。第1表に、ソ連の原子力発電の状況を示すが、この表からも見られる通り、将来はともかく現時点では、この炉型がソ連の原子力発電の主流を占めていることがわかる。

第1表 ソ連の原子力発電 (1985年12月31日)

	加圧水型 軽水炉	黒鉛減速 軽水冷却炉 沸騰水型	高 速 増殖炉	合 計	
		加圧水型			
運転中	18基 1,097.5万 kW	14基 1,540万 kW	8基 90万 kW	2基 75万 kW	43基† 2,719.5万 kW
建設中	27基 2,700万 kW	8基 950万 kW	—	—	35基 3,650万 kW
計画中	27基 2,700万 kW	7基 900万 kW	—	—	34基 3,600万 kW

† 沸騰水型炉1基を含む。

資料：「原子力発電所一覧表」，日本原子力産業会議。

この炉型は、黒鉛減速、軽水沸騰冷却、圧力管型に属し、その主要な長所としては、第1に中性子経済が良好で、出力運転中に燃料交換ができることと相まって、U資源の有効利用の面から極めて優れた特性を有することが挙げられる。第2表に、この炉の主要特性を示すが、取出燃料の組成を見ても、この炉型の優れた燃焼特性がうかがえよう。

第2表 炉の主要な物理的特性

熱出力	3,200 MW
濃縮度	2.0%
燃料集合体U重量	114.7 kg
燃料棒直径	13.6 mmφ
燃焼度	20 MWd/kg
半径方向ピーキング	1.48
軸方向ピーキング	1.4
チャンネル限界熱出力	3,250 kW
取出燃料組成(kg/t)	²³⁵ U 4.5, ²³⁸ U 2.4 ²³⁹ Pu 2.6, ²⁴⁰ Pu 1.8 ²⁴¹ Pu 0.5
ボイド係数 α	2.0×10 ⁻⁴ /蒸気%
短時定数出力係数 α _w	-0.5×10 ⁻⁴ /MW
燃料温度係数 α _T	-1.2×10 ⁻⁵ /°C
グラファイト温度係数 α _G	6×10 ⁻⁵ /°C
全制御棒価値	
(制御・保護システムの棒)ΔK	10.5%
手動制御棒価値	ΔK 7.5%
燃焼燃料を新燃料に交換した時の効果(平均)	0.02%

第2に、この炉は工場で部品を製作して現地で大型機器の組立てを行うことが容易であるばかりか、スケ

ールアップも容易な特徴があり、資材の輸送を鉄道に頼らざるを得ないソ連にとって極めて好適な特徴を有している。

一方、事故との関連に限って見ても、この炉には特に注意を要する点がいくつかある。その第1に挙げられるのは、第2表に見られるように、冷却材ボイド係数が正で、しかもその値がかなり大きいことである。ボイド係数は、燃焼度、ボイド量、炉出力、制御棒配置などに依存するが、表に示したのは代表的な値で、事故直前の状態では恐らくこの50%増しくらいの値になっていただろうとソ連は推定している。ドブラー係数も含めた短時定数出力係数は高出力では負であるが、低出力では正になるといわれ、このため、熱出力700 MW以下の運転は厳しく制限されていた。

もちろん、ボイド係数や出力係数が正であるからといって、それだけで悪いということにはならない。このような特性に対して、どんな対策が用意されているかが重要なのである。特に原子炉の緊急停止機能は安全上極めて重要である。この炉の安全保護動作は5段階あり、緊急停止は最後の段階であるが、この時には全制御棒*が40 cm/sの速さで炉心に挿入され、これによって1\$/s以上の負の反応度を投入する設計になっている。ただし、1\$/s以上というのは、制御棒の配置がある条件を満たさないと実現しない。これを示すのが「反応度操作余裕」と呼ばれるパラメータで、緊急停止時の反応度投入速度が中間引き抜き位置の制御棒の何本分に相当するかというものである。反応度操作余裕は常時30本以上確保することになっており、主任技術者が特に認めた時に限って15本までは例外的に許されるが、15本以下になったら即刻炉を停止すべきことが運転規則で定められていた。これらの特性や設計は、今回の事故の重要な背景となっている。

II. 事故の経過の原因

1986年4月25日午前1時ごろ、チェルノブイリ4号機は年1回の点検のために通常停止操作に入り、午後1時ごろ定格熱出力(3,200 MW)の50%に達し、タービン発電機1台**を解列した。停止操作の途中、熱出力700~1,000 MWで、ある試験を行うことになっており、試験手順書に従って ECCS がブロックされた***。

* 短尺の制御棒24本を除く187本の制御棒。

** RBMK-1000 には原子炉1基当り50万kWの発電機2台が設置される。

*** 実際はこの手順は不必要なもので、手順書の安全の配慮が不十分なことを示している。

引き続き出力を低下しようとしたが、給電指令からの要請で運転を午後11時まで継続したが、この間 ECCS を復旧することを運転員は失念していた。午後11時過ぎ、給電指令の許可が下り、出力低下操作を再開したが、途中で自動制御系の切換え操作にミスがあり、炉出力は予定よりはるかに低い 30 MW 以下まで下がってしまった。運転員は予定出力まで戻そうと努力したが、200 MW までしか出力は上がらず、この間、ほとんどの制御棒は上限まで引き抜かれ、前述した反応度操作余裕は 6～7 本にまで低下していた。この状態では、たとえスクラムボタンを押しても、有効に負の反応度が入るまでに 6 s 程度かかるということである。

注目すべきことは、事故直前、計算機からのプリントアウトによって運転員は状況を知らされていたにもかかわらず炉を停止せず、厳しく制限されていた低出力で試験を強行してしまったことである。4月26日午前1時23分試験が開始されたが、その数10秒後に炉は暴走状態となり2回にわたる爆発によって、原子炉と炉建屋が大きく破壊された。事故の前後の状況を模式的に第1,2図に示す。

第1図 事故前の施設の模式図

第2図 事故後の状況

ソ連の解析によれば、炉心ボイドの増加に伴い午前1時23分40秒ごろから出力は急上昇を始め、44秒ごろに定格出力の100倍を超えたとされている。燃料の

なりの部分が破砕(フラグメンテーション)を起こし、急激な蒸気発生により圧力管の一部が破断し、これによって上部遮蔽体(直径約15m、厚さ3m、重量1,000t)が浮き上がって転倒し、すべての圧力管を破壊したと推定される。数秒後に第2の爆発が生じたとされているが、これが炉の再臨界による2度目の核暴走によるのか、水素などの化学爆発によるものか、現在のところ判然としない。

炉心上部と建屋が大きく破壊された際に、炉心から大量の黒鉛と燃料が吹き飛ばされた。ソ連の推定では、敷地内に炉心燃料(約200t)の0.5%程度が飛ばされ、敷地外約20kmまでに1.5～2%、20km以上に1～1.5%程度が飛ばされたとされている。事故時の平均燃焼度は約10 MWd/kgとされており、これから考えて恐らく20kg前後のPuが上述の地域に飛散したと思われる。

この事故の直接の原因は、運転員が重大な規則違反を多数犯したことであるとされる。ソ連発表の規則違反を第3表にまとめて示す。このうち、第1, 第2の違反については先に述べた。

第3表 運転員によって行われた規則違反

No.	違反	動機	結果
1	反応度の操作余裕が許される値よりも著しく少なかった。	Xeオーバーライド対策	炉の緊急保護が無効であった。
2	出力が実験計画で想定されているものより低かった。	局部自動制御を切った際のオペレータのミス。	炉は制御困難な状態に至った。
3	規定で定められている流量を超えて待機中の循環ポンプが投入された。	実験プログラムを実施するため。	再循環回路の冷却材の温度が飽和温度に近くなった。
4	2基のタービン発電機の停止信号に基づいた炉の保護信号をバイパスした。	タービン発電機を解列する実験を繰り返す必要があるかもしれないと考えたため。	炉の自動停止の可能性を失った。
5	気水分離器内の水位レベルと蒸気圧に関する保護信号をバイパスした。	炉が不安定な状態でも実験を遂行しようとした。	熱パラメータによる保護信号はすべてバイパスされた。
6	最大の想定事故を保護するシステム(炉のECCSシステム)が切り離された。	実験を遂行中にECCSの誤動作をさけるため。	事故の規模を小さくする可能性を失った。

第3の違反は試験手順書に従ったものであるが、炉が低出力であったため、冷却系全体が著しく不安定な状態になってしまったものである。第4の違反は、もともと予定された試験は運転中のタービン1台をトリップすることで開始されるのであるが、タービン2台停止でスクラムという信号をバイパスしてしまったもので、これさえなかったら、恐らく事故には至らなかったと思われる。第5、第6も重大な違反ではあるが、事故の様相を左右するほどのものではない。

直接の原因は以上の通りであるにしても、この背景となる事項も指摘しておく必要がある。まず試験計画の技術レベルが低いもので、かつ安全上の配慮が欠けており、正規の手続きを経て承認されたものでなかった。さらに、この炉のユニークな特性と設計が重要な役割りを果していることは誰の目にも明らかであ

る。ソ連も RBMK 型の改良策を示しているが、そのほとんどは前に指摘した問題点に対応するものである。

Ⅳ. 今後の対策

上述したように、今回の事故は、この炉のユニークな特徴と運転員の重大な規則違反とが重なって生じたと考えられる。したがって、ここで現れた個々の現象を、そのまま他の炉型に当てはめて議論することは必ずしも適当ではないであろう。なすべきことは、この事故をさらに詳細に分析し、その中から他の炉型にも共通するより基本的な教訓を抽出することである。我が国はもとより世界各国とも、このための努力を続けているところであり、こうして得られた教訓によって原子力安全の一層の向上を図ることが、何より必要なことであると信ずる。

投 稿 歓 迎!

(1987. 1. 一部改正)

本会「和文誌」投稿欄の種別は、次のとおりです。(* 欧文は「欧文誌」に掲載)

◆掲載料は1編5ページ以内は1ページにつき5,000円; 6~10ページは1ページにつき10,000円; 11ページ以上は1ページにつき15,000円でありますので、ご了承ください。◆

① 研究論文*	研究の対象・方法あるいは結果に独創性・創造性があり、かつ明確で価値ある結論や事実を含み、他の学術的刊行物に公表(投稿準備中のものを含む)されていないもの。
② 技術報告*	材料の製作・施設・設備・装置等の設計・試験・運転などの新しい経験やその結果をまとめた実用価値のある技術的報告で、他の学術的刊行物に公表(投稿準備中のものを含む)されていないもの。(「本誌」, 24[1], 86(1982)を参照)
③ 資 料*	研究・技術に関する参考資料または調査集計報告など。
④ ショート・ノート*(3頁以内)	研究・技術上の独創的かつ重要な発見または結論を含む論文の速報。
⑤ レター*(1~2頁)	掲載論文に対する質疑応答または意見。
⑥ 私のノートから*(2頁以内)	各専門分野の研究または技術上の経験、斬新なアイデア、珍しい実験結果など。(掲載料不要)
⑤⑥は「欧文誌」では Letter to the Editor	
⑦ 談話室(2頁以内)	トピックスの紹介、随想、時評、論説など。(同上)
⑧ 国際会議の窓(新設)	内外の会議・学会の報告・見聞・印象、および開催案内。(同上)
⑨ 会員のこえ(約0.5頁)	本会または「本誌」に対する希望・意見などの自由投書(用紙自由、誌上匿名可)。(同上)
⑩ 新刊紹介(約0.5頁)	会員の役に立ち、興味のあると思われる内外の出版物の書評および紹介。(同上)

巻頭言、特別寄稿、解説、講演、特集、総説、総合報告、等は編集委員会で立案・企画して執筆依頼する。

ご投稿には、「投稿規程」・「投稿の手引」に従って、所定の原稿用紙(30枚綴り1冊200円、〒240円; 欧文は市販タイプ用紙)、「投稿票」(付チェックリスト)に記入して事務局宛ご送付下さい。

なお、「投稿規程」および「投稿票」中の専門分野の「分類項目」は59年に改訂されましたので、「本誌」Vol. 26, No. 2, p. 179 (1984)を参照願います。