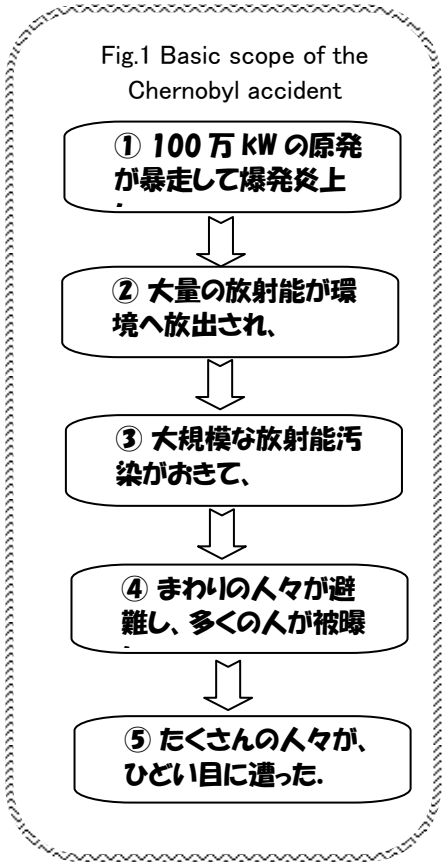
チェルノブイリ原発事故：何がおきたのか

今中　哲二
京都大学原子炉実験所

１．はじめに

原発の安全性は、運転にともなって原子炉内に蓄積される膨大な放射能をいかに完全に閉じこめておけるかにかかっている。原発建設にあたっては「多重防護」の考え方が採用され、さまざまな事故を想定した安全装置が設けられており「万が一の場合にも周辺公衆に放射能被害をもたらさない」ということになっている。しかし、想定されていた範囲でものごとが収まり切らないのは、原子力に限らず経験するところである。原発の場合、安全設計の範囲を越える事態、つまり、大量の放射能放出に至る可能性のある事故として次の二つが考えられている。その一つは、炉心での核分裂連鎖反応のコントロールに失敗し出力が急上昇する「暴走事故」、もう一つは炉心の冷却に失敗して高温になって溶融に至る「冷却材喪失事故」である。1979 年 3 月 28 日に米国スリーマイル島原発２号炉で発生した事故は後者で、1986 年 4 月 26 日に旧ソ連チェルノブイリ原発４号炉で発生したのが前者であった。スリーマイル島原発事故では、炉心の半分が溶融したものの、原子炉容器などの主要機器を収納している格納容器が破壊を免れたため、最悪の事態は回避することができた。一方、チェルノブイリ事故では、原子炉がその建屋もろとも爆発炎上し、大量の放射能がそのまま環境に放出されるという最悪の事態となった（Fig.1）[1,2]。



２．チェルノブイリ型原発

チェルノブイリの原発は、旧ソ連が原爆用プルトニウム生産のために開発した原子炉を発電用に発展させたもので RBMK 型原子炉と呼ばれる（Fig.2）。RBMK とはロシア語で「大出力チャンネル型炉」の略であるが、その構造からは、「黒鉛減速・軽水沸騰冷却・チャンネル管型原子炉」と言える。中性子を減速する材料である黒鉛ブロック約 1700 トンを巨大なレンタン状に積み上げ、レンタンの穴に核燃料棒の入った圧力チャンネル管（内径 8cm）を挿入する。冷却水（軽水）がチャンネル管を通って沸騰し、気水分離器で蒸気を分離しタービンに送って発電するという仕組みである（注１に主な仕様）。

その長所は、

- 運転しながら燃料の交換ができること（プルトニウム生産炉の特徴）、
- チャンネル数を増やして大出力化が容易なこと、
- 軽水炉の圧力容器のような重量構造物の輸送がないので内陸立地の容易なこと、

などである。一方、

- チャンネル数が多く（チェルノブイリ４号炉の場合 1661 本）炉心が大きくて出力制御が複雑なこと、
- 炉心で気泡が増えると出力増加の方向に働くこと（**正のボイド反応度係数：注2**）、

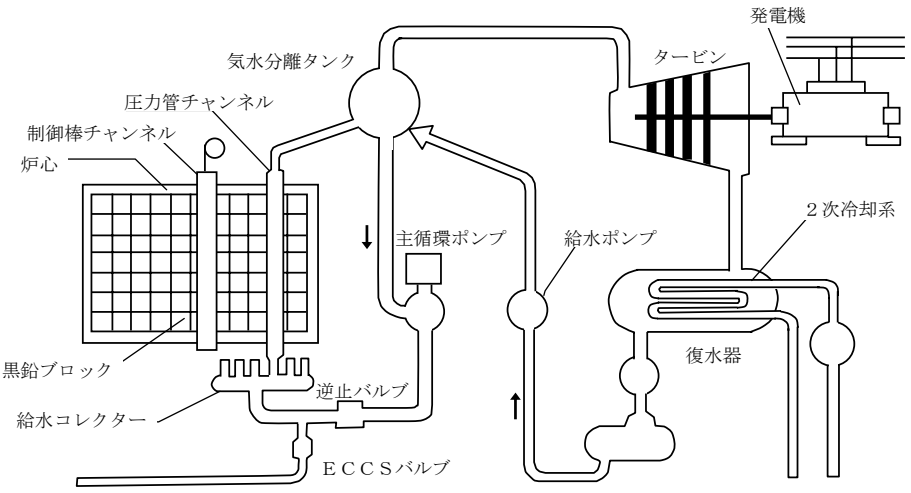


Fig.2.　Main scheme of RBMK nuclear power plant.

- 制御棒全数引き抜きといった極端な条件下で原子炉を止めようと制御棒を一斉挿入すると出力が逆に上昇する場合があること（**ポジティブスクラム：注3**）、

といった欠陥があった。チェルノブイリ事故当時のソ連では 17 基の RBMK 炉が運転されており、チェルノブイリ 4 号炉はその新鋭機であった。

3．1986 年 4 月 26 日

1986 年 4 月 25 日未明、チェルノブイリ原発 4 号炉（電気出力 100 万 kW、熱出力 320 万 kW）は、保守点検のため 1983 年 12 月の運転開始以来はじめての原子炉停止作業に入った。その日の午後、運転停止に合わせてある電源テストが予定されていた。原子炉事故の際に、非常用ディーゼル発電機が立ち上がるまでの間、慣性で回っているタービンで発電して非常用ポンプの電源にしようというテストであった。25 日午後 1 時、出力が半分に下がったところで、キエフの給電司令部より運転継続の要請が入りそのまま運転が継続されることになった。午後 11 時に出力降下作業が再開された。26 日午前 0 時に運転班が交代し、当初の計画では熱出力 70 万 kW のところで電源テストが実施される予定だったが、午前 0 時 30 分、出力コントロールに失敗して原子炉の出力がほぼゼロになってしまった。

ここで電源テストをあきらめていれば事故は起きなかったが、電源テストの責任者である副技師長の判断により原子炉の再起動がはじまった。停止した直後の原子炉というのは、中性子吸収の大きな核分裂生成物であるキセノン 135 の蓄積にともなう「キセノン毒効果」により出力が上がりにくい。運転員は熱出力をなんとか 20 万 kW まで引き上げた。このときの炉心は、「低出力状態」にともなう正のボイド反応度係数の増大、炉心中央がへこんで端の方が大きい「ふたこぶ様中性子束分布」、「ほぼ全制御棒引抜き」にともなうポジティブスクラムの危険性より一触即発の状態に陥っていた。

＜以下のプロセスは、文献３、４、５、６を今中がまとめたもの＞

- 26 日午前 1 時 23 分 4 秒、タービンへの蒸気供給バルブを閉鎖し電源テストが始まった。循環ポンプ８台のうち 4 台がテスト電源に接続された。（テスト中、タービン慣性回転数の低下にともない循環ポンプ流量が若干減少したが、原子炉の異常を示す兆候はなかった。）
- 23 分 39 秒、タービン回転数が予定の毎分 2500 回転に下がったところで、運転班長が「原子炉停止」と声を上げ、制御棒一斉挿入ボタン（AZ-5）を回した。（制御棒の「ポジティブスクラム効果」により炉心の下部で部分的に出力が上昇しはじめた。）
- 23 分 42 秒、「出力上昇率高」（炉周期 20 秒以下）と「出力高」（熱出力 530MW 以上）警報が発生。
- 23 分 44-45 秒、（圧力管内での蒸気急増にともない）気水分離タンクの圧力が上昇するとともにテスト

電源に接続されていた循環ポンプの逆止弁が閉鎖した。（23 分 46 秒、逆止弁閉にともない圧力管内でさらに蒸気が増大し、正のボイド反応度効果が加わった。燃料温度が上昇して溶融し、燃料棒被覆管破損→溶融燃料と冷却水の接触→圧力管破壊がはじまった。）

- 23 分 47 秒、複数本の圧力チャンネル管破壊により、炉心部で一挙に蒸気が発生し、炉心容器内の圧力高信号が発生した。
  ＜ここまではモデル計算が可能で、警報記録などと比較しながらシミュレーションの妥当性について、ある程度数量的な議論が可能である。これ以降のプロセスの解析は定性的であり、その妥当性の判断は現場検証や目撃証言に基づくことになる。＞
- 炉心容器内での圧力上昇により、チャンネル管が固定されている炉心上部構造板が持ち上がった。（RBMK 炉の安全設計は、１本のチャンネル破損を想定していたが、複数本破損には対応していなかった。）上部構造板の歪みにより、ドミノ倒しのようにチャンネル管の破損が伝播し、炉心に挿入されつつあった制御棒はすべて途中で固着してしまった。
- 23 分 49 秒、制御棒系電源喪失信号。すでにほとんどのチャンネル管が（おそらく炉心下部で）破断したと思われる。
- （石棺内の調査を続けている Checherov ら[6]によると）炉心部が丸ごと中央ホール空間に浮かび上がり空中で核暴走にともなう爆発が発生した（冷却水が全部なくなったときの反応度添加は＋5βであり、フィードバックのドップラー効果は−4βとされている。β：遅発中性子割合）。原子炉建屋の屋根と壁が破壊され、チャンネル管や黒鉛ブロックといった炉心内構造物が建屋周辺に飛散した。

建屋の外にいた目撃者によると、続けて２回の爆発があり夜空に花火のような吹き上げがあった。隣接するタービン建屋では飛び散った破片により屋根火災がはじまった。かけつけた消防隊により、タービン建屋など周辺の火災は鎮火したが、炉心構造材である黒鉛の火災がはじまった。黒鉛火災は約 10 日間続き、その間、大量の放射能放出が続くことになる。

破壊された４号炉をコンクリートで丸ごと覆う「石棺」の建設工事が６月からはじまり、その年の 11 月に完成した。事故から２年たって、炉心の側面をボーリングしてテレビカメラが差し込まれた。炉心部には、消火のために投下された資材や残った黒鉛などがぎっしり詰まっていると思われたが、Fig.3 に示すようにほとんどガランドウだった。上部構造板が持ち上がらないと入らないようなようなコンクリートパネルが落ち込んでいること、炉心周りの遮蔽タンクなどがほぼ無傷であること、圧力管下部を示す刻印のある部品が周辺に飛び散っていることなどが、「空中爆発説」を支持している。

＜事故や爆発プロセスについては、いまだにさまざまな見解がある。本稿のストーリーは、いろいろ勉強した結果としての筆者の見解として了解頂きたい。＞

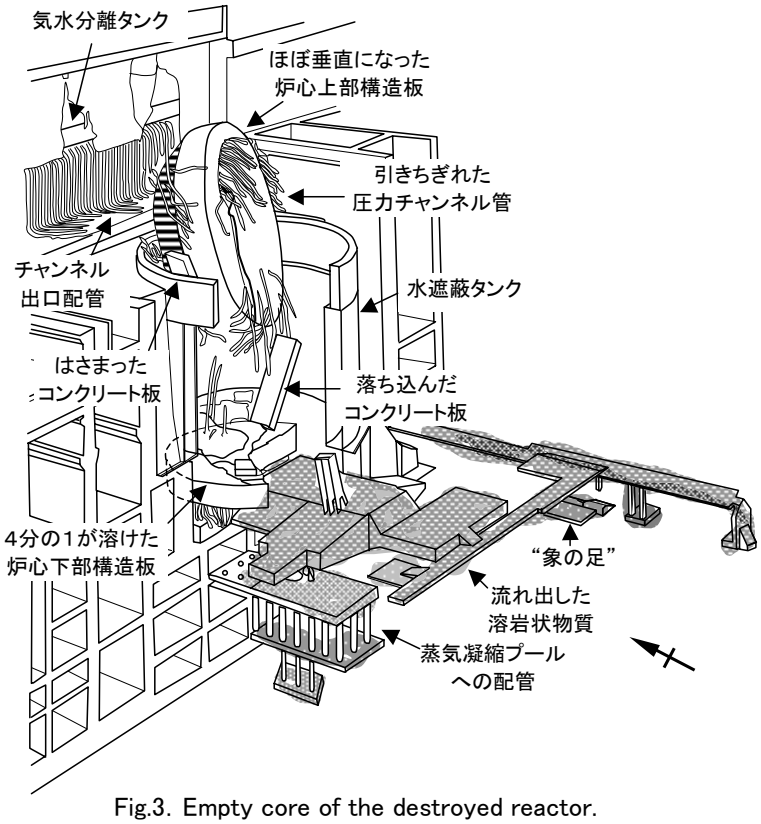


Fig.3. Empty core of the destroyed reactor.

４．放射能放出と放射能汚染

原発事故の規模を判断する目安は放出された放射能量である。チェルノブイリ事故のように完全に破壊された原子炉からの放射能放出を見積もることは極めて困難な作業であるが、事故炉上空でのアエサンプリング、地表沈着した放射能の積算、４号炉を密閉した「石棺」内に残存している放射能量からの逆算といった手法で一応の評価が行われている。Table1 は 2005 年 9 月のチェルノブイリ・フォーラム [7]による評価である。

Table1. Released radioactivities（decay-corrected to 1986.4.26）

Main nuclides	Half life	Released amount（Bq）	Released fraction
^{133}Xe	5.3d	7×10^{18}	100 %
^{131}I	8.0d	2×10^{18}	55 %
^{137}Cs	30y	9×10^{16}	30 %
^{90}Sr	29y	1×10^{16}	4.9 %
^{239}Pu	24000y	2×10^{13}	1.5 %
＜Total including others＞		1.4×10^{19}	～10 %

る。その他の評価などを含め大ざっぱに言って、「希ガス 100%、ヨウ素 50-60%、セシウム 30-50%、不揮発性核種 3-5%、全体で炉心の 10%が“発電所敷地外”に放出された」ということになる。

チェルノブイリ事故が起きた 1986 年は、米国とソ連とが大量の核ミサイルを抱え込んでにらみ合っていた東西冷戦の真っ最中であった。私たちのグループは世界中から放射能汚染データをとりよせ、事故の規模の解析を試みた。しかし、もっとも肝心なソ連国内の汚染データが全くと言っていいほど出てこなかった。そうした様相に変化が現れたのは、事故から３年たった 1989 年の春であった。ソ連国内での民主化運動の高まりを受けて、チェルノブイリ周辺のセシウム 137 による汚染地図がはじめて公表された。その地図をみて私たちが驚いたのは、チェルノブイリ原発周辺だけでなく、200～300ｋｍ離れたところにも飛び地のように高放射能汚染地域が広がっていたことであった（Fig.4）。

チェルノブイリ事故に対して第１に責任を負うべきソビエト連邦は 1991 年末に消滅し、汚染対策や被災者救済の責任は独立したそれぞれの国に移った。ウクライナ、ベラルーシ、ロシアの被災３カ国の被災者救済法では、セシウム 137 による土壌汚染レベルによって以下のように汚染地域は区分されている。

- 1,440 kBq/m^2 以上：強制避難ゾーン
- 555～1,440 kBq/m^2：移住義務ゾーン
- 175～555 kBq/m^2：希望すれば移住が認められるゾーン
- 37～175 kBq/m^2：放射能管理が必要なゾーン

37kBq/m^2 以上の汚染地域の面積は３カ国合わせて 14 万 5000km^2 で、日本の本州（22.8 万 km^2）の６割強に相当する。強制避難・移住対象の面積は約１万 km^2 で、福井県（4200km^2）、京都府（4600km^2）、大阪府（1900km^2）を合わせたものにほぼ等しい。

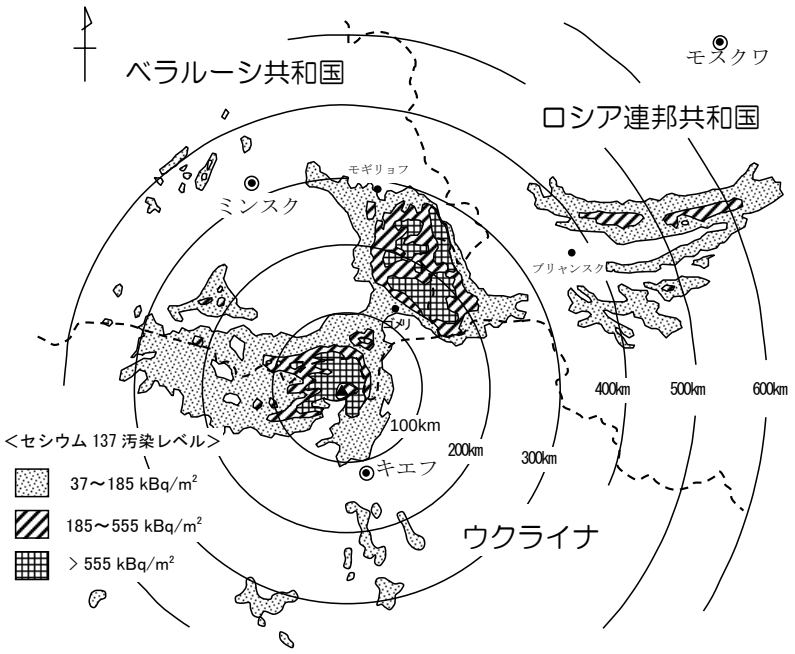


Fig. 4. ^{137}Cs contamination around Chernobyl.

５．事故被災者

チェルノブイリ事故による被害を考えるにあたって、筆者は事故の被災者は Table2 のように分類している。

Table2. Classification of Chernobyl sufferers.

Category of sufferer	Population	Total body dose
➢ NPP staff and firefighters wgo were at the scene	1,000～2,000	1 ～20 Sv
➢ Liquidators (military, construction worker etc)	600,000～800,000	0.1～ 1 Sv
➢ Evacuees from the 30 km zone just after the accident	～120,000	Average 20～30 mSv*
➢ Emigrants from the highly contaminated areas	250,000～300,000	Average 50 mSv
➢ Inhabitants in contaminated areas (> 37 kBq/m^2)	～600 million	Average 10 mSv

＊; This must be re-evaluated because it seems to be underestimated.

◆事故現場の原発職員・消防士：爆発の５分後に発電所の消防隊が到着、さらに近隣からの応援を含めて約 200 人の消防士が現場に駆けつけた。猛烈な放射線のため、消火作業の途中から気分が悪くなる消防士が続出し、プリピャチ市の病院に収容された。26 日の夕方にはモスクワの被曝事故専門病院から医療チームがかけつけ、重症患者を選別してモスクワへ移送した。ソ連当局の発表によると、事故現場にいあわせた原発職員・消防士のうち約 300 人が病院に収容され、事故から３カ月の間にそのうち 28 人が被曝による急性障害で死亡した。放射線急性障害者の数は、その後の精密な検査に基づくと 134 人であった、というのが公式見解になっている。

◆事故処理作業従事者：事故処理のため最初に現場に投入されたのは、核戦争に備えて訓練されていたソ連陸軍化学部隊だった。数千人規模の正規軍が事故の翌日到着している。黒鉛火災が続く原子炉の消火には、空軍ヘリコプター部隊が動員され、空から砂、鉛など約 5000 トンの物資が投下された。化学部隊の具体的な作業内容や被曝量のはっきりしたところはいまだに明らかではないが、この部隊が滞在した３週間ほどの間に原子炉建屋周辺に飛び散っていた燃料や黒鉛が片付けられた。破壊された建屋を丸ごとコンクリートで覆ってしまう「石棺」の建設が６月からはじまり、ソ連各地から「愛国的労働者」が集まって献身的に作業に従事した。また、原発構内や 30km 圏内の放射能除染のため 30～40 歳代の予備役が大規模に招集された。こうした事故処理作業者は「リクビダートル」と呼ばれている。リクビダートルの当初の被曝限度は 250 ミリシーベルトとされたが、多くの場合キチンとした測定はされていない。リクビダートルの総数は 60 万とも 80 万とも言われ、そのうち約 20 万人が汚染の強かった 1986 年と 1987 年に作業に従事した。

◆30km 圏避難住民：原発職員の街プリピャチ市から原発までは３km ほどである。プリピャチ市民にとって幸いだったのは、26 日未明の爆発にともなって放出された膨大な「熱い放射能」が街を直撃しなかったことである。その放射能雲は、プリピャチ市の数 km 南のところを通過した。27 日になってプリピャチ市の放射線量があがりはじめ、午前７時の線量率は１時間当り 2～6 ミリシーベルトになった。昼頃、「皆さん、原発での事故に関連して、避難が布告されました。身分証明書を携帯し、必要なものと３日分の食料を持参してください。避難は１４時に開始されます」というアナウンスがラジオから流れた。キエフ市から動員された 1200 台のバスが各アパートに横付けされ、２時間ほどで 4 万 5000 人の避難が終了した。当局が恐れていたパニックは起きなかった。

プリピャチ市を除き、原発周辺は昔ながらの農村地帯である。プリピャチ市の避難が素早く行われたのに比べ、30km 圏住民の強制的避難が決定されたのは、事故から１週間たった５月２日のことだった。５月３日から避難がはじまり、ほぼ１週間かけて 30km 圏住民の避難が完了した。農村からの避難は、プリピャチ市の場合に比べ、はるかに大変であった。何万という家畜が住民と一緒に避難した。多くの人に、第２次大戦でのドイツ軍侵攻のときの避難を思い出させたという。しかし、先の戦争と違って、避難民が元の村に戻れることはなかった。

20 年を過ぎた現在も原発周辺 3,700 平方 km が立入禁止区域である（注４）。

◆高汚染地域住民・移住者：事故から３年たった 1989 年春に、30km 圏以外に広大な汚染地域のあることが判明すると、チェルノブイリ事故の責任追及と放射能汚染対策を求める運動が広がった。モスクワ連邦政府はゆるめの汚染対策を提案したが、汚染地域住民や共和国政府はより厳しい対策を要求した。連邦政府の意向に反してベラルーシの議会は 1989 年 7 月、高汚染地域（セシウム 137 汚染＞555kBq/m^2）の住民 11 万人を新たに移住させる決定を行った。事故直後の避難住民を含め、汚染地からの移住を余儀なくされたのは、ウクライナ 16.3 万人、ベラルーシ 13.5 万人、ロシア 5.2 万人で合計 35 万人とされている [8]。この数に、自主的な判断で汚染地から移住した人々を加えると、結局 40 万～50 万の人々が住み慣れた土地を離れたと言ってよいであろう。

◆汚染地域住民：チェルノブイリの放射能は、北半球全体を汚染し、日本に住む私たちもそれなりの被曝を受けた。日本に降ってきたセシウム 137 の平均は約 0.2 kBq/m^2 で、その被曝量は 0.004 ミリシーベルト程度であり、自然放射線（年間１ミリシーベルト）にくらべ神経質になるほどではなかった。被災３カ国で「汚染地域」とは、セシウム 137 の汚染が 37kBq/m^2 以上のところをさしており、約 600 万の人々が現在も暮らしている。1990 年、汚染対策を求める住民の運動に手を焼いたソ連政府は、IAEA（国際原子力機関）に対し現地調査と汚染対策の勧告を依頼した。約 200 人の専門家が参加した調査団は１年後、「放射能汚染にともなう健康被害は認められない、もっとも健康に悪いのは放射能を怖がる精神的ストレスである」という調査結果を発表した [9]。汚染地域の子ども達の間で甲状腺ガンが増え始めたのはその頃からであった。

Fig.5 は、チェルノブイリ事故後のウクライナとベラルーシでの子供甲状腺ガン数の推移である [10,11]。ウクライナは被曝時 0-14 歳、ベラルーシは甲状腺ガン手術時 0-14 歳のデータである。もともと子どもの甲状腺ガンは非常に珍しい病気で、事故前は人口 1000 万人のベラルーシで年平均１件程度の発生率だったが、両国ともに 1990 年頃より急激に増加している。ベラルーシで 1995 年をピークに子どもの甲状腺ガンが減っているのは、事故当時に子どもだった人々が、青年・大人の年齢グループに移ったという見かけだけの現象である。ウクライナのデータは、被曝を受けた人々の間で甲状腺ガン発生が今後も続くことを示しており、両者の比較は甲状腺ガンの増加がチェルノブイリ事故の影響であることを間接的に証明している。

ベラルーシ、ウクライナ、ロシアを合わせて 2002 年までに約 4000 件の甲状腺ガンが発生したと報告されている [7]。今後発生する分を含めると、チェルノブイリ事故によって２万～５万件程度の甲状腺ガンがもたらされることになろう。幸いというべきか、甲状腺ガンの致死率は小さく、これまでのガン患者のうち死亡したのは１％程度と見られている。しかし、甲状腺摘出手術をうけた子供たちは生涯にわたって甲状腺ホルモン剤が必要となる。

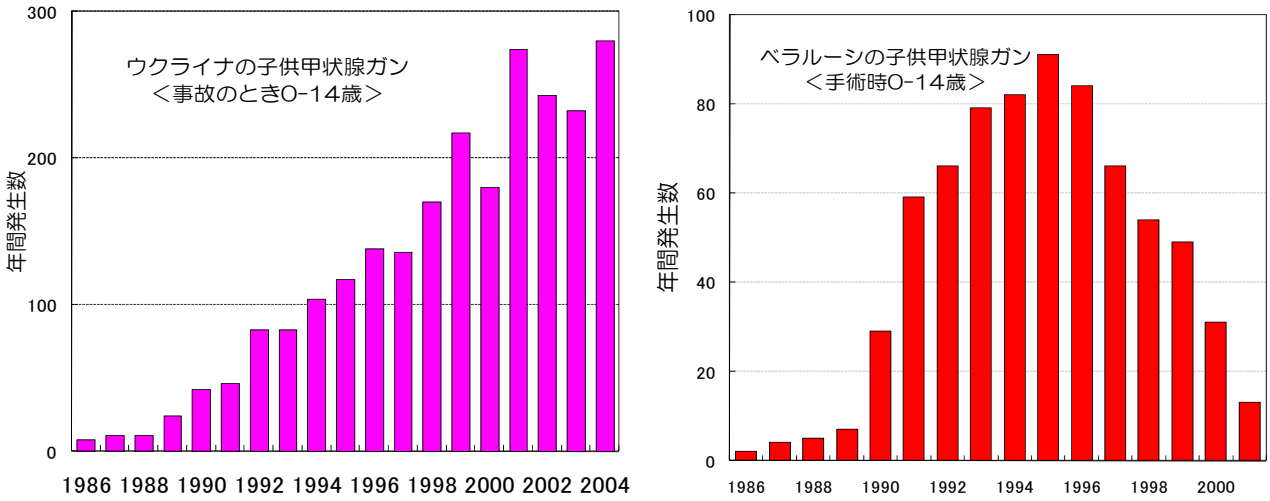


Fig.5 Child Thyroid Cancer in Ukraine (left) and Belarus (right).
0-14 yr old at the time of accident (Ukraine); 0-14 yr old at the time of operation (Belarus)

６．ガン死者数の見積り

2005 年 9 月にウィーンの IAEA 本部で開かれたチェルノブイリ事故国際会議「チェルノブイリ・フォーラム」は、この 20 年間の事故影響研究のまとめとして、「放射線被曝にともなう死者の数は、将来ガンで亡くなる人を含めて 4000 人である」と結論した[7)]。この発表を受けて世界中のマスコミが「チェルノブイリ事故の影響は従来考えられていたより実はずっと小さかった」と報じた。

フォーラムによる死者数 4000 人の内訳は、事故直後の急性障害死などこれまでに確認された死亡が約 60 人で、残り 3940 人はガン死である。このガン死数は、モデルをあてはめて計算された数字であって、そのモデルで用いる仮定によって結果が大きく変わってくる。4000 人死亡という結論は、ベラルーシやウクライナの専門家や NGO、さらにはベラルーシ政府からも報告書への抗議を受けた。また、フォーラムの身内というべき WHO（世界保健機構）や IARC（国際ガン研究機関）からもっと大きなガン死数推定値が発表されるに至った。Table3 は、この間に発表された、いろいろなガン死数をまとめたものである。フォーラムの 4000 件が最低で、グリーンピースはその 20 倍以上の 9 万 3000 件という値を出している。筆者としては全世界で２万～６万件というのがチェルノブイリ事故によるガン死見積もりとして妥当なところかと考えている。

Table3.　Various estimates for the number of cancer death the Chernobyl accident

Evaluator	Number of cancer death	Size of evaluated population	Cance death risk per 1 Sv
Chernobyl forum (2005)	3,940	600,000	0.11
WHO (2006)	9,000	7.4 million in 3 countries	0.11
IARC (2006)	1 6,000	570 million in Europe	0.1
NGO Kiev conference（2006）	30,000～60,000	Whole world	0.05～0.1
Greenpeace (2006)	93,000	Whole world	－

チェルノブイリ事故による被害について指摘しておきたいのは、放射線被曝を直接の原因としない「間接的な死者」についてある。田舎暮らしをしてきた老人が、突然に都会に避難させられアパート暮らしを余儀なくされたなら「どんなに健康に悪いか」容易に想像されよう。また、移住によって職を失い、「アル中になって病気になった」例も数多いことだろう。こうした健康影響は、もちろん被曝影響ではないが、チェルノブイリ事故の影響であることは確かである。チェルノブイリ事故が人々にもたらした災厄全体を議論しようとするなら、こうした「間接的影響」を無視することはできない。

７．おわりに

チェルノブイリ事故後、西側の専門家はチェルノブイリ事故をもたらした原因として、当時のソ連での「原子力安全文化」の欠如を指摘した。実際、RBMK 炉の設計欠陥は事故前から指摘されていたものの、責任当局はしかるべき対策を怠り運転員に注意を喚起することもしなかった。チェルノブイリを調べて感じるのは、ソ連の中央集権システムとは、同時に無責任体制だったことである。肝心な判断はいつも上へ上へと送られ、最後には「資本主義と違って社会主義で原発事故はあり得ない」とされていた。

ひるがえって、日本の「原子力安全文化」は如何なものだろう。1999 年 9 月に東海村 JCO 核燃料工場で、本来あり得ないはずの臨界事故が発生し、結局２名の従業員が死亡した。2004 年 8 月には関西電力美浜３号炉で、容易に防止できたはずの２次系配管破断事故が発生し、５名の下請け作業員がなくなった。さらに今年の３月には、志賀原発や福島第一原発でずいぶん前（1999 年と 1978 年）に「臨界事故」の起きていたことが明るみに出た。「ソ連の安全意識は遅れていた」と言える資格が日本の原子力関係者にあっただろうか。「日本ではチェルノブイリのような原発大事故はあり得ない」という思いこみこそ、日本の原発にとって最も危険なことではないかと思っている。

文献

1) 今中哲二編「チェルノブイリ事故による放射能災害：国際共同研究報告書」技術と人間、1998.
2) 今中哲二「チェルノブイリをみつめなおす：20 年後のメッセージ」原子力資料情報室．2006.
3) Абаган А.А. и др. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ, Т.71 №4 275-287 (1991).
4) Комиссия Госпроматомнадзора СССР, “О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке чернобыльской АЭС 26 апреля 1986г”, 17.01.1991.
5) Карпан Н.В. “ЧЕРНОБЫЛЬ: МЕСТЬ МИРНОГО АТОМА”, ПП «Кантри Лайф», 2005.
6) Новосельский О.Ю. и др. «ТЕХНИСКИЕ АСПЕКТЫ АВАРИИ НА 4-М ЭНЕРГОБЛОКЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС», Изл-Во «ГУП НИКИЭТ» 2005.
7) Chernobyl Forum, “Chernobyl’s Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine”, IAEA, 2005.
8) UNDP/UNICEF, “The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident: A Strategy for Recovery”, 2002.
9) International Advisory Committee, “The International Chernobyl Project: An Overview”, IAEA, 1991.
10) “20 Years after Chornobyl Catastrophe: Future Outlook”, National Report of Ukraine, 2006.
11) Malko M., “Assessment of Chernobyl Cancers in Belarus”, 来日講演会資料, 2003. http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/No91/Malko030225.htm

注1：RBMK1000 炉の仕様

項目	内容
出力	電気出力 100 万 kW，熱出力 320 万 kW（発電効率 31.3%）
タービン	50 万 kW×２台（冷却系は２ループ）
炉心サイズ	直径 11.8 m，高さ 7.0mの円筒形. ・ 炉心の基本構造は，減速材である黒鉛ブロックを積み上げて作られる. ・ 黒鉛ブロックには圧力管チャンネル用の孔があり，圧力管チャンネルは炉心を上下に貫通する.
黒鉛ブロック	25cm×25cm×60cm の直方体，密度 1.65g/cm^2. ・ 中心に直径 11.4cm の上下方向貫通孔．・黒鉛ブロック総重量 1700 トン
炉心容器サイズ	直径 14.52m，高さ 9.75m の円筒形. ・ 炉心の上下・円周には黒鉛反射体や鉄遮蔽体があり，それらを囲む炉心容器（シュラウド）が炉心スペースの気密バウンダリを構成．・炉心スペースの耐圧は 1.8kg/cm^3. ・ 炉心容器の周辺は，環状の水タンク（厚さ 2.4m）があり，さらに充填砂層があってコンクリート壁に至る. ・ 炉心容器の上下には，上部構造板（直径 17m，高さ 3m）と下部構造板（直径 14.5m，高さ 2m）があり，それぞれチャンネル用の孔が貫通している.
圧力管チャンネル数	1661 本
圧力管	外径 88 mm，内径 80mm. ・ 材質：炉心部はジルコニウム合金で，その上下にステンレス管を溶接. ・ 圧力管の中には，燃料集合体が１体ずつ挿入される. ・ 冷却水は下部から入り，沸騰しながら上部出口から出る. ・ 運転中に圧力管を１本ずつループから隔離して燃料交換する. ・ 黒鉛ブロックとの隙間は，黒鉛リングを用いて密着させる.
制御棒チャンネル数	・ 211 本　・中性子吸収材：炭化ホウ素．・出力自動制御棒 12 本，局所出力自動制御棒 12 本，手動制御棒 115 本，緊急保護棒 24 本，局所緊急保護棒 24 本，短尺制御棒 24 本.
燃料	２酸化ウラン（濃縮度２%）　・燃料ペレット：直径 11.5mm，長さ 15mm. 燃料棒：外径 13.6mm，長さ 3.5m．被覆管はジルコニウム合金，厚さ 0.9mm. ・ 炉心のウラン装荷量 194 トン・設計燃焼度：20MWD/kg
燃料集合体	副燃料集合体：長さ 3.5m，燃料棒 18 本を束ねて中心管で固定. 燃料集合体：長さ７m，副燃料集合体２つを上下に連結. ・燃料集合体当りウラン量：114.7kg.
冷却系	冷却材：軽水　・圧力管入口温度：270°C．・圧力管出口：温度 284°C，圧力 70kg/cm^2，蒸気含有率 14.5%．・主循環ポンプは各ループに４台（１台は予備），計８台. ・ 炉心冷却材流量：３万 7600 トン／時．蒸気供給量：5800 トン／時.

・1986 年ソ連政府チェルノブイリ事故報告書を基に作成.

注2：正のボイド反応度係数　核分裂の際に発生する中性子は、エネルギーが大きく（平均２MeV）光の 10 分の 1 くらいの速度である。高速中性子は原子核に捕まりにくく、つまり、そのままでは核分裂の連鎖反応を維持するのが難しい。そこで、パチンコ玉の衝突のように、中性子を軽い元素の原子核と散乱させながら減速させてやる。減速されて、まわりの物質の熱振動と平衡状態になった中性子が「熱中性子」である。ウラン 235 の場合、熱中性子になると、高速中性子にくらべ 500 倍ほど核分裂を起こしやすくなる。と同時に、熱中性子はいろいろな物質にも吸収されやすい。原子炉で核分裂連鎖反応を維持するには、中性子をうまく減速させ、他の物質に吸収されないうちに、ウラン 235 に捕捉されて再び核分裂が起きるようにする。「減速材」として優秀なのは重水と黒鉛である。RBMK 炉の減速材は黒鉛で、チャンネル管内の軽水は中性子の吸収役である。「反応度」とは、炉内での核分裂の数（出力）が増えているか減っているかを示す値である（反応度＝０なら一定、プラスは増加、マイナスは減少）。原子炉の反応度は、制御棒位置、燃料濃縮度、燃料温度などいろいろな要因が合わさって決まる。「正のボイド反応度係数」とは、冷却材密度の変化が反応度に与える効果を示している。つまり、炉心での沸騰が増えて、中性子吸収役でもある水の密度が減ると、原子炉の出力にプラスに働いてしまうことを示している。チェルノブイリ事故の場合、低出力で運転されていたことで、「正のボイド反応度係数」の効果がいっそう大きくなっていた。

注3：ポジティブスクラム　スクラムとは「原子炉緊急停止」のことである。「ポジティブスクラム」とはチェルノブイリ事故後に作られた言葉で、「原子炉を緊急停止しようとボタンを押したら逆に出力が増えた」というとんでもないことを示している。Fig.A は、RBMK 炉制御棒チャンネルの構造である。中性子を吸収する制御棒本体の下に、中性子利用の効率を改善するための「黒鉛棒」がぶら下がっている。左側のように、制御棒を完全に引き抜くと、黒鉛棒の下に水柱部が出来る。Fig.B のプロットは、電源テストが実施されたときの炉内出力分布計算値である。炉心下部での出力が大きいという特徴があった。４号炉の運転員は、ほとんどの制御棒が引き抜かれた状態で制御棒一斉挿入ボタン（AZ-5）を押した。水柱部が黒鉛棒と置き替わって、原子炉下部にプラスの反応度が入って暴走し、燃料温度が急上昇してチャンネル管がいくつか破損したものと考えられている。

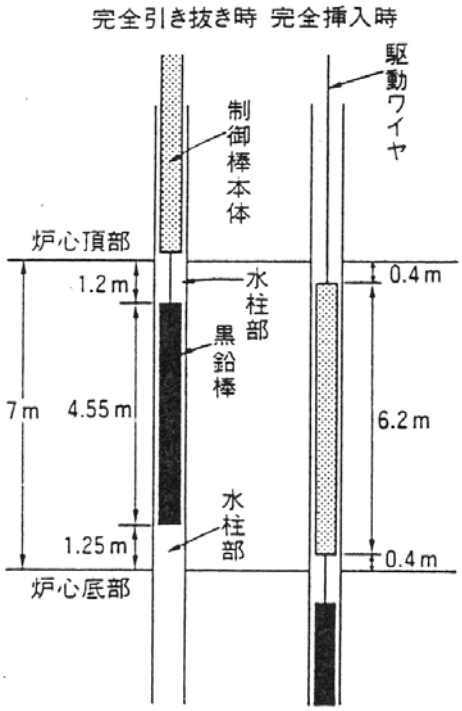


Fig.A.. Control rod and graphite follower

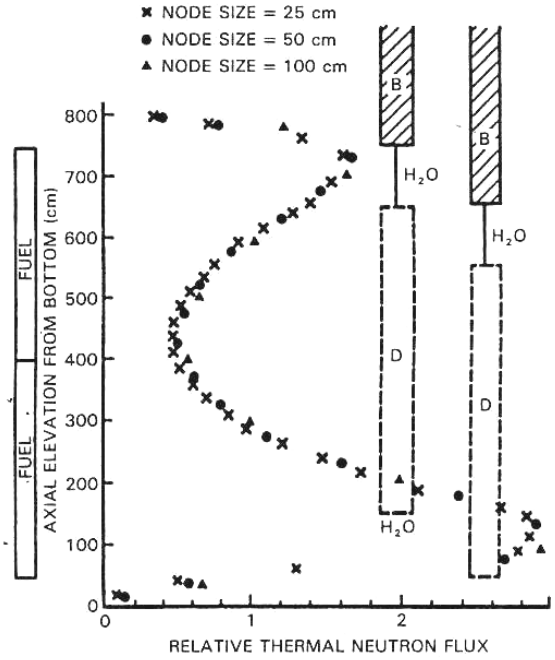


Fig.B. Neutron flux distribution before the accident. Chan, NSE 103:(1989)289-93.

注4：チェルノブイリ原発周辺の立入禁止区域（通称 ゾーン）

２つの円は内側が半径 30km で外側が 60km．ゾーンの面積は、ウクライナ側 2000km^2、ベラルーシ側 1700km^2、合計 3700km^2.

ナショナル・ジオグラフィック（2006.4）を参考に作成．写真は Google earth より.

Chernobyl NPP Accident: What Did Happen?

IMANAKA Tetsuji
Research Reactor Institute, Kyoto University

More than twenty years have passed since the worst accident in the history of nuclear power development occurred at the 4th block of the Chernobyl NPP in the former USSR. Although a lot of reports and books have been published about the Chernobyl accident, there are still remain unresolved issues about the physical sequences that led the reactor to the nuclear excursion and the nature of the explosion that destroyed the reactor and the building. From the present author's point of view, the main causes of the accident were two defects of the RBMK reactor design: positive void coefficient for reactivity and positive-scram of the control rods. Under an extreme condition of the reactor core, positive scram effect appeared at first when the scram button (AZ-5) was turn on at 01:23:39 April 26, 1986, which, combining with the positive void coefficient, caused the power excursion and destroyed the reactor. Long-term effects of radioactive contamination by the Chernobyl accident were also discussed in the present paper.