

A
甲第20号証

ISSN 1342-0852

KURRI-KR-181

旧ソ連の原子力開発にともなう放射能災害と
その被害規模に関する調査研究

**Historical review of nuclear disasters during the process of
nuclear development program by the former USSR**

2013年2月

編集：今中哲二

Edited by Tetsuji Imanaka

京都大学原子炉実験所
Research Reactor Institute, Kyoto University

はじめに

本報告書は、2008－2010年度に私が研究代表者として行った、科研費助成研究『旧ソ連の原子力開発にともなう放射能災害とその被害規模に関する調査研究』（基盤(B)2042001：3年間 840万円）のまとめである。“2年前に済んだことの報告をなんで今頃”と思われるかも知れないが、もちろん福島原発事故のとばっちりである。

2011年3月11日午前、私は関西空港で、ウクライナのキエフからやってきたティーヒーを出迎えた。ティーヒーには科研費研究の海外協力者になってもらっており、一週間後の3月18日に予定している第110回原子力安全問題ゼミ『チェルノブイリ事故から25年』で報告してもらおうための来日であった。地震が起きたのを知ったのは、その日の午後、ティーヒーを宿舎で休ませ、研究室でパソコンを相手にしていたときだった。それから、怒濤のような生活が始まり、科研費の報告書をまとめるような作業は吹き飛んでしまった（事務的に最低限必要な報告はもちろん済ませたが）。

私はチェルノブイリのことを調べながら、被災者たちから『自分たちの歴史は“チェルノブイリ前”と“チェルノブイリ後”に引き裂かれた』と聞かされてきた。いまの私は、“福島後”という事故の前とは別の時代を生きている気分がしている。たぶん、2年前の3月11日を境に、地震・津波そして原発事故で被災した多くの方々も同じように感じておられるであろう。私にとって福島後の時代で変わったことのひとつは、チェルノブイリについて私がやってきたことに関心が寄せられるようになったことである。その意味でも、このレポートを完成しておく義務感のようなものがあり、当初の思惑より中味は少々変わってしまったものの、ようやく“宿題”を果たせた感じである。

2013年2月 今中 哲二

<共同研究メンバー>

研究代表者：	今中哲二	京都大学原子炉実験所
連携研究者：	川野徳幸	広島大学・原爆放射線医科学研究所（当時）
	木村真三	厚生労働省・労働安全衛生総合研究所（当時）
研究協力者：	七澤 潔	NHK 放送文化研究所
	鈴木真奈美	グリーンピース・ジャパン（当時）
外国協力者：	TYKHYY Volodymyr	ウクライナ科学アカデミー・サイバネティックス研究所、キエフ
	MALKO Mikhail	ベラルーシ科学アカデミー・電力技術研究所、ミンスク
	STRELTSOV Dmitri	国際関係大学、モスクワ
	SHINKAREV Sergey	ブルナシャン連邦医学生物学センター、モスクワ

Preface

Articles in this report were obtained through a collaboration project “Historical review of nuclear disasters during the process of nuclear development program by the former USSR” that was organized by Imanaka under a research-grant of KAKENHI (8.4 million yen for three years). Someone might doubt why the report of the previous project appears now. Of course, it should be published two years ago, but the Fukushima-1 NPP accident did not allow me to do it.

In the morning of March 11, 2011, I welcomed Tykhyy Volodya from Kyiv, Ukraine at the KANSAI airport. He was a foreign member of my project and invited to make a presentation at the 110th Nuclear Safety Seminar “25 Years from Chernobyl” planned on March 18th at my institute. It was in the afternoon of the same day when the M9 earthquake took place at about 180 km from the Fukushima-1 NPP. Then, everything suddenly changed around me. The plan to make the KAKENHI report was blown away in the wakes of the Fukushima-1 accident for nearly two years..

Through the experience investing the consequences of the Chernobyl accident, I often heard from victims that their personal history was torn into two periods: “before Chernobyl” and “after Chernobyl. Now I have a feeling that I am living in “after Fukushima”. I suppose many people who suffered from the Earthquake/Tsunami and the Fukushima-1 accident have the similar feeling.

One interesting thing happened to me after the Fukushima-1 accident that my works on Chernobyl began to attract attentions of various people. So I decided anyway to make the report of the previous KAKENHI project. Although the contents are somewhat different from that I planned two years ago, I am a little relaxed after finishing a small duty. I would like to express my cordial acknowledgement to all persons who contributed to this report.

February 2013

IMANAKA Tetsuji

<Project Member>

Representative:

Imanaka T. Research Reactor Institute, Kyoto University

Formal collaborator:

Kawano N. Research Institute for Radiation Medicine and Biology, Hiroshima University

Kimura S. National Institute of Occupational Safety and Health

Informal collaborator:

Nanasawa K. NHK Broadcasting Culture Research Institute

Suzuki M. Greenpeace Japan

Foreign collaborator:

Tykhyy V. Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, NASU, Kyiv

Malko M. Joint Institute of Power and Nuclear Research, BAS, Minsk

Streltsov D. Moscow State Institute of International Relations, Moscow

Shinkarev S. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow

旧ソ連の原子力開発にともなう放射能災害とその被害規模に関する 調査研究

目次

はじめに

1. チェルノブイリ事故と福島事故	今中哲二	1
2. チェルノブイリ事故現場での数日間の個人的な体験	ニコライ・カルパン	11
3. First Days of the Chernobyl Accident: Private Experience	Nikolay Karpan	22
4. History of radiation and nuclear disasters in the former USSR	Mikhail V. Malko	35
5. Overview of the nuclear tests conducted at the Semipalatinsk Nuclear Test Site and archival data that can be used for retrospective dosimetry: Chronology of the nuclear weapons testing and their general characteristics	Sergey Shinkarev	63
6. Doses of Emergency Exposure to the USSR Navy Personnel	Yuriy Skaletskiy	83
7. Atomic Physics and Atomic Industry in Ukraine: Outline of History and Present	Volodymyr Tykhyy	94
8. Chernobyl Catastrophe and Establishment of Civil Society in Ukraine	Yuri Scherbak	110
9. チェルノブイリ・旧プリピャチ住民へのインタビュー記録	川野徳幸	121
10. チェルノブイリ裁判記録	(翻訳) 平野進一郎	151

Historical Review of Nuclear Disasters during the Process of Nuclear Development Program by the Former USSR

Contents

Preface

1. Chernobyl Accident and Fukushima-1 Accident	IMANAKA Tetsuji	1
2. First Days of the Chernobyl Accident: Private Experience (Japanese translation)	Nikolay Kaepan	11
3. First Days of the Chernobyl Accident: Private Experience	Nikolay Karpan	22
4. History of Radiation and Nuclear Disasters in the Former USSR	Mikhail V. Malko	35
5. Overview of the Nuclear Tests Conducted at the Semipalatinsk Nuclear Test Site and Archival Data That Can be Used for Retrospective Dosimetry: Chronology of the Nuclear Weapons Testing and Their General Characteristics	Sergey Shinkarev	63
6. Doses of Emergency Exposure to the USSR Navy Personnel	Yuriy Skaletskiy	83
7. Atomic Physics and Atomic Industry in Ukraine: Outline of History and Present	Volodymyr Tykhyy	94
8. Chernobyl Catastrophe and Establishment of Civil Society in Ukraine	Yuri Scherbak	110
9. Interview Records with People Who were Evacuated from Prypiat City in Chernobyl	KAWANO Noriyuki	119
10. Records of the Chernobyl Court. Excerpts from Karpan's Book "Revenge of Peaceful Atom"	(Translator) HIRANO Shin-ichiro	151

チェルノブイリ事故と福島事故

今中哲二

京都大学原子炉実験所

1. はじめに

核分裂エネルギーを利用している限り、原発の運転にともなって炉心に核分裂生成物が蓄積されて行くことは避けられない。電気出力 100 万 kW の原発が 1 日運転されると、約 3 kg の核燃料が消費される。消費されたのと同じだけ、1 日約 3 kg の核分裂生成物、いわゆる死の灰が生まれるので、1 年 365 日では約 1000kg の核分裂生成物が蓄積される。一方、広島・長崎の原爆で生じた核分裂は約 1 kg である（広島はウランで長崎はプルトニウム）。すなわち、電気出力 100 万 kW の原発が 1 年間稼働すると、炉心には広島・長崎原爆約 1000 発分の死の灰が蓄積されることになる。原発安全技術の課題は、この膨大な量の放射能をいかに完全に閉じ込めておけるかにあるが、そもそも原子力発電を開始したときから、下手をすると放射能の大量放出につながる事故の可能性が指摘されてきた。具体的には、次の 2 つの事故が心配されてきた。

- ◇ 核分裂のコントロールに失敗し出力が急上昇する暴走事故
- ◇ 炉心の冷却材がなくなりして炉心が高温になって溶融する冷却失敗事故

1979 年 3 月 28 日に米国スリーマイル島原発 2 号機（PWR、100 万 kW）で発生した事故は、原子炉内の水が半分無くなり、燃料も半分が融けてしまった冷却失敗事故であった。幸い、約半日後にポンプの再運転に成功し、原子炉圧力容器の破壊、格納容器の破壊を辛うじて免れ、最悪の事態を回避できた。

原発における最悪の事態とは、炉心に蓄積された放射能が遮るものなく環境中に放出されるような事態である。1986 年 4 月 26 日、旧ソ連ウクライナのチェルノブイリ 4 号機（RBMK、100 万 kW）で発生した事故は、核分裂のコントロールに失敗して、原子炉とその建屋が瞬時にして破壊された暴走事故であった。爆発に引き続き、中性子を減速し核分裂を起こしやすくするための材料（減速材）である黒鉛の火災が発生し、約 10 日間にわたって大量の放射能放出が続き、原子力発電開発史上最悪の事態となった。

福島第 1 原発事故は、地震・津波にともなって、冷却ポンプを回すための電源がなくなって起きた冷却失敗事故である。2011 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分、宮城県沖約 130km の海底でマグニチュード 9.0 の東北太平洋沖地震が発生した。このとき、震源から約 180km 離れた東京電力福島第 1 原発では、1～3 号機（BWR、46 万、78 万、78 万 kW）が運転中であつたが、いずれの原子炉も地震を検知して自動的に運転停止した。しかし、地震の影響で外部からの送電が途絶え、非常用の発電機も津波による浸水で止まってしまった。全ての交流電源が使えなくなり、原発の安全審査で“想定する必要がない”とされてきた長期にわたる全交流電源喪失という事態に至ってしまった。冷やすことの出来なくなった 3 つの原子炉は、いずれも炉心溶融（メルトダウン）、原子炉容器溶融貫通（メルトスルー）、さらには格納容器の破壊が起きて大量の放射能を環境中に放出するに至った。

本稿では、チェルノブイリと福島とでの、原子炉の構造、事故のプロセス、放射能放出と放射能汚染を比較検討しておく。

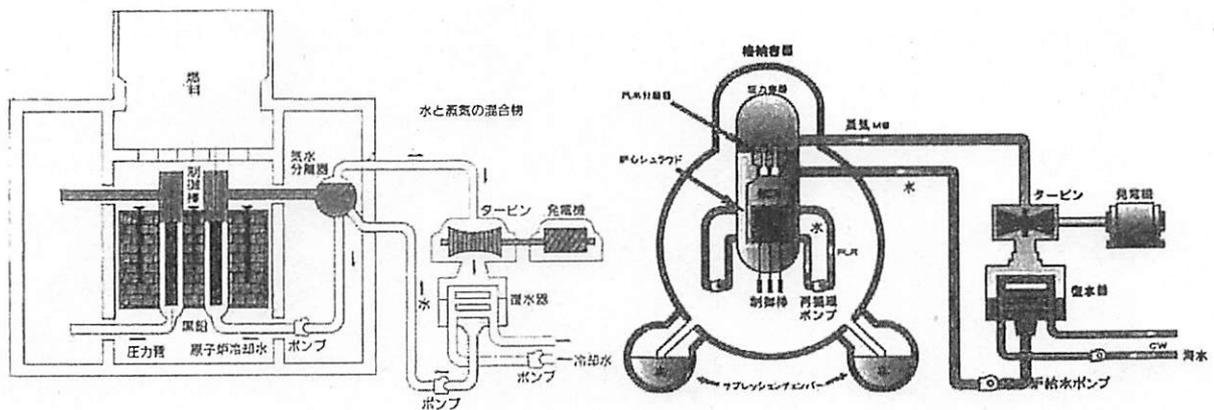


図 1. チェルノブイリ型原発 RBMK-1000 (左)と BWR マーク I 型原発(右)の基本的仕組み。

2. 原発の構造

<チェルノブイリ原発>

図 1 は、チェルノブイリ原発と BWR 原発の簡単な構造を示している。チェルノブイリ型の原発 (RBMK-1000) は、旧ソ連が原爆用プルトニウムを生産するために開発した原子炉を発電用に大型化したもので、RBMK とは、ロシア語の“大出力チャンネル型炉”の頭文字である。1986 年 4 月の事故当時、ソ連では 5 カ所の原発で 15 基 (合計 1550 万 kW) の RBMK 炉が運転中であった (付表 A)。チェルノブイリでは 4 基が運転中で、5、6 号機が建設中であった。RBMK 炉の構造は、“黒鉛減速・沸騰軽水冷却・チャンネル炉”である。黒鉛ブロックを巨大な練炭のように積み上げ、“練炭の穴”(1661 本)に圧力チャンネル管を挿入する。内径 8cm の圧力チャンネル管それぞれが細長い原子炉のようなもので、中に燃料集合体が挿入され、下部から入った冷却水は炉心部で沸騰しながら気水分離器へ送られる。気水分離器で蒸気と水が分離されて、蒸気はタービンへ、水は再び炉心へ送られる。付表 B に RBMK-1000 炉の構造に関する諸元をまとめてある。

RBMK 炉の長所としては、

- ◇ 各チャンネルの上下のバルブを閉じて全体から隔離し、運転しながら燃料を交換できる (原爆用 Pu 生産に向いている)、
 - ◇ 軽水炉 (BWR や PWR) の原子炉圧力容器のような数 100 トンという重量構造物がなく、輸送得が簡単なので内陸立地が容易、
 - ◇ チャンネル管の増加により、出力増が容易、
- といったことが上げられる。弱点としては、
- ◇ 炉心での蒸気割合が増えると出力にプラスにフィードバックする“正のボイド反応度係数”という炉心特性、
 - ◇ 特殊な条件下で制御棒を一斉に挿入するとはじめの数秒間出力増加する“ポジティブスクラム”という制御棒欠陥、
 - ◇ 炉心が大きくて、多くのチャンネル管 (1661 本) があり、炉心の制御が複雑、
- などがあった。

<BWR：沸騰水型マーク I 原発>

福島第 1 原発の 1 号機 (46 万 kW) は、1971 年に運転開始した、日本で 2 番目の BWR (沸騰水型軽水炉) である。最初の BWR は、1970 年に運転開始した敦賀 1 号機 (35.7 万 kW) であっ

た。BWR は米国 GE 社が開発した原発で、敦賀 1 号機や福島第 1 原発 1 号機は、“ターンキー契約”、つまり GE 社が設計・施工を請け負い、電力会社はすべてが完成してから“運転キーを受け取る”というやり方で建設された。今回の事故に関連する福島第 1 原発の 1～4 号機はすべてマーク I と呼ばれる格納容器を備えている。格納容器とは、配管破断やメルトダウンといった事態が起きたときに環境への放射能放出を防ぐための防壁である。マーク I の特徴は、図 1 に示されているように、格納容器が“ダルマ（ドライウェル dry well）”と“ドーナツ（ウエットウェル wet well）”に分かれていることである。冷却材喪失事故時の際に配管から吹きだした蒸気によるドライウェル内の圧力上昇を抑えるため、蒸気をウエットウェル（圧力抑制プール suppression pool）に貯められている水に導いて凝縮させるという設計である。地震などに対するマーク I の脆弱性は 1970 年代後半から指摘されていた[2]。

福島原発事故当時、日本には 54 基の原発があったが、BWR はそのうち 30 基で、残りの 24 基は PWR であった。BWR のうちマーク I 型原発は、マーク I 改良型も含めて 17 基であった。

3. 事故経過

<チェルノブイリ事故>

表 1 に、運転停止作業に入って以降の事故経過を示す。1986 年 4 月 25 日未明、チェルノブイリ 4 号機は、点検修理のため 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。原子炉停止に際して、いくつかの機器の作動テストや特性試験が予定されていた。その一つに、事故時に非常用ディーゼル発電機が動き出すまでの間の ECCS（緊急炉心冷却装置）用ポンプ電源として、タービンの慣性回転を利用する電源のテストがあった。テストにあたっては、ECCS ポンプの模擬として、その電源に主循環ポンプ 4 台が接続されることになっていた。

当初の予定では、電源テストは 4 月 25 日の昼間に実施される予定だったが、キエフの給電司令

表 1. チェルノブイリ事故の経過

時刻	事象
4/25 1:00	定格出力（熱出力 320 万 kW）から出力降下を開始。
13:05	熱出力 160 万 kW で、2 台のタービンのうちの 1 つ（No.7）を切り離し。
14:00	ECCS を解除。そのまま出力低下を続ける予定であったが、ここでキエフ給電指令所の要請により、160 万 kW での運転を継続。
23:10	出力降下作業を再開。
4/26 0:28	熱出力約 50 万 kW で、出力制御系を切り替え（局所出力自動制御系から平均出力制御系へ）、切り替え中に予定外の出力降下が生じ、出力 0～3 万 kW まで低下。
1 時頃	出力再上昇の努力の結果、20 万 kW で出力が安定、予定以下の出力で電源テストを実施することになった。
1:03 と 1:07	運転中の 6 台の主循環ポンプに加えて、2 台のポンプが追加され、全 8 台のポンプが運転に入った。
1:23 頃	炉の状況は、反応度操作余裕の低下と低出力にともなう正のボイド反応度係数の増加などが相まって、一触即発の状態に陥っていたが、運転員がそのことを知る由はなかった。
1:23 04～	運転員は No.8 タービンへの蒸気弁を閉じ、慣性回転による電源テストが始まった。テスト電源に接続されていた 4 台の主循環ポンプの流量が若干低下し、炉心での蒸気発生がいくらか増えたが、その効果は、若干の圧力上昇と自動制御棒の挿入で相殺された。
1:23 40'	運転班長が、制御棒一斉挿入（AZ-5）ボタンを押した。
1:23 43'	「出力急上昇」警報と「出力大」警報が発生。
1:23 46-47'	ポンプ電源停止、流量減、気水分離タンク圧力高、水位上昇。「出力制御系不調」信号。
1:23 49'	「炉心容器内圧力上昇」信号（圧力管の破壊）。「制御棒駆動電源喪失」信号。 「自動制御棒駆動部不調」信号。
1:24	運転日誌に、「1 時 24 分、強い爆発、制御棒は原子炉下端まで達せず停止。制御棒電源停止」。速屋外の目撃者によると 1 時 24 分頃 2 回の爆発が続いて起き、夜空に花火のような吹き上げがあったという。

所からの要請により、半分の出力での運転を継続した。午後 11 時になって出力降下作業が再開された。3交代制の運転班はこの間、午後 4 時に交替し、さらに出力降下中の午後 12 時にも交替した。4月 26 日午前 0 時 30 分頃、新たな運転班が出力制御系を切り替えた際に原子炉出力はほぼゼロにまで低下してしまった。ここで電源テストをあきらめていればチェルノブイリ事故は起きなかった。しかし、電源テスト責任者の原発副技師長は、運転員に出力再上昇を命じた。停止直後の原子炉は、中性子を非常によく吸収する核分裂生成物（キセノン 135、半減期 9.2 時間）が蓄積されているので出力再上昇させにくい状態にある。運転員はほぼ全部の制御棒を引き抜いて、なんとか熱出力 20 万 kW の状態で安定させ、午前 1 時 23 分 4 秒に電源テストがはじまった。電源テスト中、炉の出力は安定しており、運転員の操作や警報の作動をうながすような兆候はなかった。

1 時 23 分 40 秒、運転班長が制御棒一斉挿入ボタン (AZ-5) を押したことが、事故の発端となった (彼がなぜ AZ-5 を押したのか、確かなところは不明)。すなわち、制御棒の一斉挿入によりポジティブスクラムが発生し、停止するはずの原子炉が逆に暴走を始めた。3 秒後に出力急上昇警報と出力大警報が発生している。局所的な出力上昇により、複数の燃料棒、さらには圧力管が破壊され、炉心で蒸気が発生した。大量の蒸気発生にともなう正のボイド係数の効果により、さらなる暴走もたらされた。炉心部での圧力上昇は、原子炉上部構造物をもち上げ大量のチャンネルを破壊し制御棒を固着させ、万事休すとなった[3]。

1986 年 8 月にソ連政府が IAEA に提出した報告書[4]では、事故の原因は『運転員による規則違反の数々』とされたが、1991 年のソ連最高会議の再調査委報告[3]では『炉心特性と制御棒構造の欠陥』が原因であったとされている。

<福島事故>

主な事故経過を表 2 に示す[5-8]。原子緊急事態における対応の三原則は、“止める、冷やす、閉じ込める”の 3 つである。福島事故の場合、炉心の核分裂連鎖反応を“止める”ことには成功した。しかし、地震による送電線の倒壊などによりまず外部電源喪失という事態が発生し、さらに、津波による浸水にともなって非常用ディーゼル発電機が役に立たなくなり、原子力安全委員会の安全設計審査指針で“考慮する必要はない”とされている長期にわたる交流電源喪失に至った。この段階で、原子炉に水を送る電動式ポンプを回すことができなくなり、“冷やす”ことがピンチになった。電動式ポンプが利用できない時の非常用冷却系として、1 号機には非常用復水器 (IC) と蒸気駆動高圧注入系 (HPCI)、2,3 号機には蒸気駆動の原子炉隔離時冷却系 (RCIC) と高圧注入系が備えてあったが、いずれも長期間にわたる炉心冷却は期待できない。おまけに、1、2 号機では、温度測定、圧力測定といった計装系の電気を供給している直流電源もダウンし、運転員は盲目状態におかれた。

軽水炉で炉心への注水機能が失われると、事態はおおむね次のように進展する。

- ① 冷却水の温度と圧力の上昇
- ② 圧力逃がし弁の開閉動作にともなう冷却水の減少
- ③ 原子炉容器内水位の低下
- ④ 燃料棒の露出と被覆管温度上昇
- ⑤ ジルコニウム・水反応による水素発生と一次系ループへの放射能放出

表 2. 福島原発事故の経過

時刻	事象
3/11 14:46	福島第1原発（1号機 46万kW、2～5号機 78.4万kW、6号機 110万kW）では1～3号機が運転中で、4～6号機は定期検査のため停止中。
14:47	地震計からの信号（加速度大）により運転中の3機は自動停止。 送電線鉄塔倒壊などにより外部電源喪失。非常用発電機起動。主蒸気隔離弁閉。
14:50-	1号機では非常用復水器自動起動、2,3号機では原子炉隔離時冷却系を手動起動。
15:38-	津波によるタービン建屋地下の浸水により非常用電源停止。1,2号機では直流電源も喪失。
23:00	1号機タービン建屋の線量率上昇（1.2mSv/h）。（これ以前に大規模な炉心破損。）
3/12 2:30	1号機格納容器(D/W)内圧 840kPa で、設計最高使用圧力 427kPa を大幅に超過。
5:14	1号機からの漏洩による放射能で発電所構内の線量率上昇。
9:04	1号機格納容器ベント作業開始。
11:36	3号機の原子炉隔離時冷却系停止。12:35 に高圧注入系自動起動するが原子炉圧力低下。消火栓より炉心への注水
14:30	1号機格納容器ベント。格納容器内圧は 430kPa まで低下。
15:36	1号機水素爆発。
19:04	1号機、原子炉への海水注入開始。
3/13 2:42	3号機の高圧注入系停止。原子炉圧力急上昇
9:08	3号機の原子炉逃がし弁閉、原子炉圧力低下、格納容器ベント。この頃3号機の炉心損傷開始。
14:31	3号機建屋内高線量確認
3/14 11:01	3号機水素爆発
13:25	2号機の原子炉隔離時冷却系停止。原子炉圧力上昇。
18:00	2号機の原子炉逃がし弁閉、原子炉圧力低下、炉心損傷開始
18:54	2号機原子炉への消防車による海水注入開始
22:50	2号機格納容器圧力が最高使用圧を超過、ベントができずドライウェル圧力 750kPa のまま推移
3/15 6:00	4号機建屋で水素爆発移
7:00～	2号機格納容器圧が低下（格納容器破損にともなう大量放射能放出）

- ⑥ 燃料溶融（メルトダウン）の進行と溶融デブリの原子炉容器底部への堆積
- ⑦ 原子炉容器底部の貫通破壊（メルトスルー）と溶融塊の格納容器底部への堆積
- ⑧ 格納容器内線量率上昇やデブリ・コンクリート反応
- ⑨ 格納容器ベント or 放射能漏洩 or 格納容器破壊
- ⑩ （溶けた塊がどんどん沈んで行くチャイナシンドローム）

1号機のIC（非常用復水器）はバルブ開閉不能のため、HPCI（高圧注入系）は起動用直流電源が失われたため、どちらも役に立たなかった。早々と冷やす機能を喪った1号機炉心は、3月11日夜にはメルトダウン、メルトスルーに至った（図2）。その結果、12日午前2時30分には840kPa スカルという設計耐圧の約2倍の格納容器内圧が測定されており格納容器破壊が心配された。格納

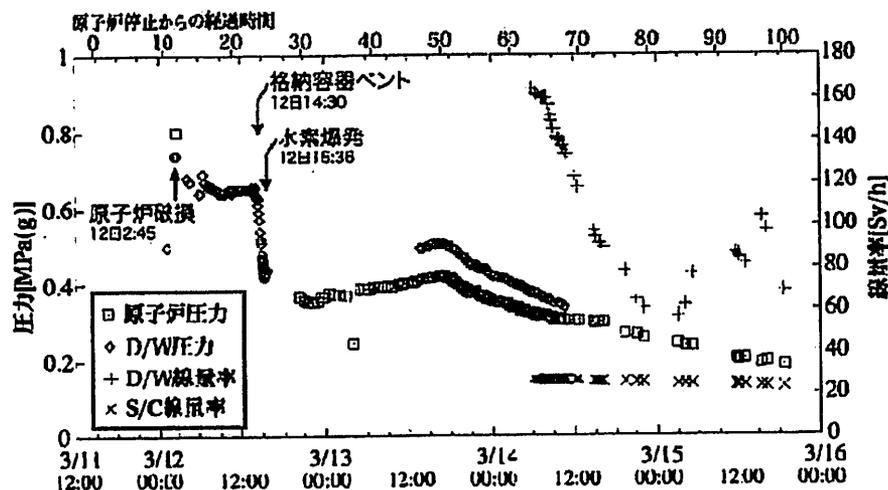


図 2. 1号機における原子炉圧力容器破損、格納容器ベント、水素爆発、炉心放射能の格納容器への移行。国会事故調報告より。

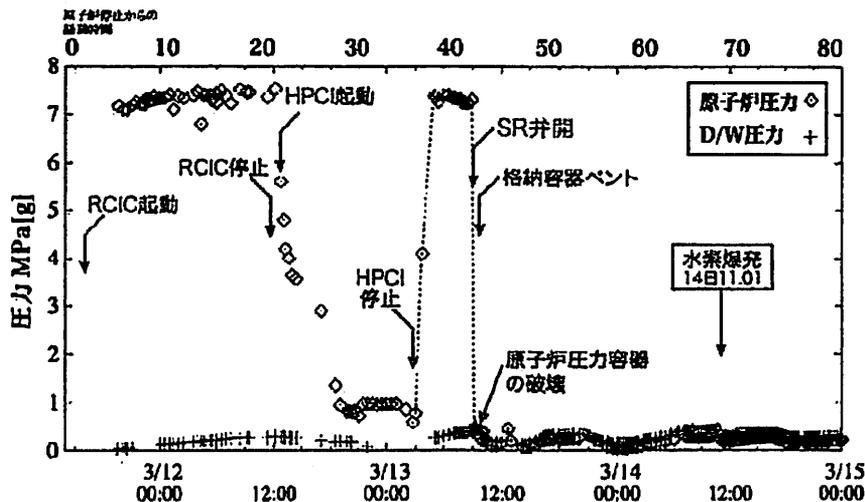


図3. 3号機 HPCI 起動にともなう圧力の低下、HPCI 停止後の圧力上昇、圧力容器破壊. 国会事故調報告より.

容器破壊を避けるためベントが試みられ、何とかベントに成功した直後の12日15時36分原子炉建屋天井で水素爆発が生じた。

3号機では、非常電源が止まった後は、当初 RCIC (原子炉隔離時冷却系) を起動して炉心冷却が確保されたが、RCIC は12日11時36分に停止している (図3)。次に HPCI (高圧注入系) が自動起動し、原子炉圧力は1MPa程度まで低下した。ここで、3月13日2時42分、HPCI を停止して消火系からの注水に切り替えが試みられたがうまく注水できず、注水がないまま再び原子炉圧力が上昇した。13日午前9時頃にメルトスルーに至ったものと思われる。13日に複数回のベントが行われ、14日11時01分には3号機建屋でも水素爆発が発生した。

2号機では、津波が到来したときに、たまたま RCIC が運転中で、非常電源がとまった後も3月14日13時25分まで動いていた (図4)。RCIC 停止後、原子炉水位が下がり続けるとともに原子炉圧力が上昇し、事態は急速に悪化した。14日夕方には原子炉容器が破損してドライウェル圧力が上昇しはじめた。21時には原子炉と格納容器がほぼ同じ圧力になり、ベントが試みられたが成功しなかった。14日深夜から15日早朝にかけてドライウェル圧力は約700kPa という高圧のまま推移し、(数時間の欠測の後) 11時25分には150kPaまで低下した。この間に格納容器破損が発生し、今回の福島事故で最大の放射能放出が始まったと思われる。15日午前9時、第1原発正門で12mSv/h という放射線量率が記録している。

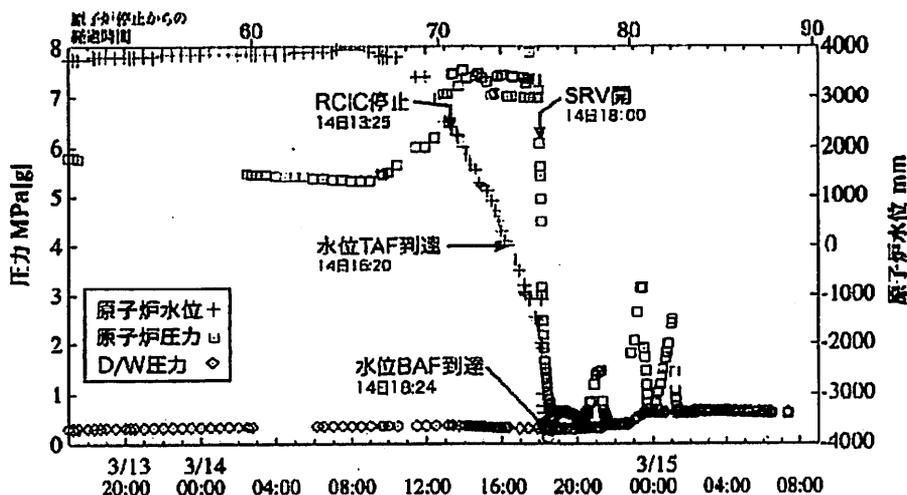


図4. 2号機 RCIC 停止後の原子炉減圧、SR 弁開、原子炉水位の低下. 国会事故調報告より.

1～3号機とも、炉心への注水機能がなくなった結果、燃料がむき出しとなってメルトダウン、メルトスルーに至った。溶融燃料が、いずれの原子炉においても压力容器を貫通し、溶融物がペDESTALと呼ばれる格納容器のコンクリート床に達していることは間違いないであろう。溶融固化物(デブリ)が具体的にどこでどのような状態にあるのかは1年半が経過した現在も明らかでないが、溶融燃料がコンクリートと反応し続け格納容器を突き破って地面にまで達してしまう、いわゆる“チェイナシンドローム”を防いだのは消防車による消火栓からの炉心注水だった。

各原子炉のデブリからは現在(2012年12月)においても400～700kWの崩壊熱が発生しており、その壊熱を冷却するために、いまだ毎日約100トンの水が各原子炉に注入されている。その水は格納容器の(場所不明の)破損部からタービン建屋地下へと流出し、それをくみ上げて浄化装置を通し、再び原子炉へ注入するという“非常事態”が継続中である。

4. 放射能放出と放射能汚染

チェルノブイリ事故では、最初の爆発で炉心と建屋が瞬時に破壊され、炉心の燃料棒や黒鉛ブロックもかなりの部分が吹き飛ばされ建屋周辺に散乱した。次に、減速材として約2000トン炉心に装荷してある黒鉛の火災が始まった。事故の知らせを受け、急遽モスクワから政府高官や専門家が駆けつけ、4月26日夜に原発に隣接するプリピャチ市にソ連政府事故対策委員会が設置された。委員会は、ヘリコプターから砂、ドロマイト、ホウ素、鉛といった資材を投下して原子炉火災を消火することにした。4月27日から消火作業がはじまり5月はじめにかけて合計約5000トンの資材を投下したと言われている。建屋もろとも爆発炎上してしまった原子炉から、どれだけの放射能が放出されたか推定することは難しく、結局、原子炉上空の空気サンプリングや地表沈着量など間接的なデータを使って放出量を見積もることになる。2005年のチェルノブイリフォーラム報告[9]では、チェルノブイリ事故の放射能放出量は、1800ペタベクレルのヨウ素131と85ペタベクレルのセシウム137を含め、合計1万4000ペタベクレルとされている。黒鉛火災にともなう大量の放射能放出は5月6日に終息したとされている(図5)。放射能放出が終わった理由は、当初は投下資材が炉心を塞いで酸素の供給を止めたためと言われたが、その後の調査で、投下資材は炉心に命中していなかったことが判明した。むしろ、黒鉛が燃え尽きて火災と放射能放出が終了したものであろう。

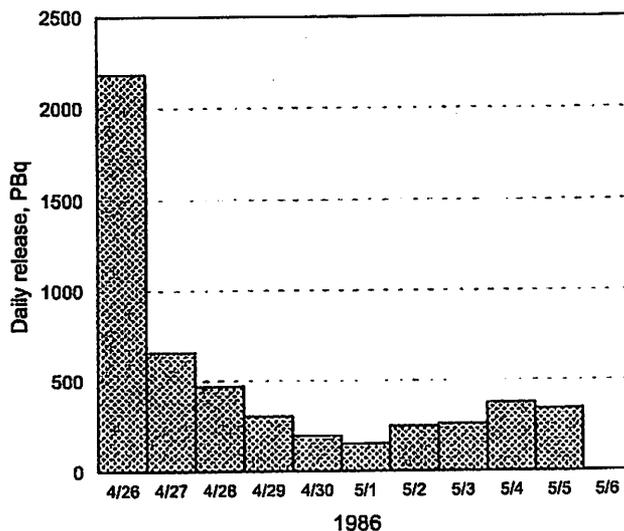


図5. チェルノブイリ事故での放射能放出量(希ガスを除く全放射能)。1986年のソ連政府報告書を基に作成。1PBq(ペタベクレル) = 10^{15} Bq

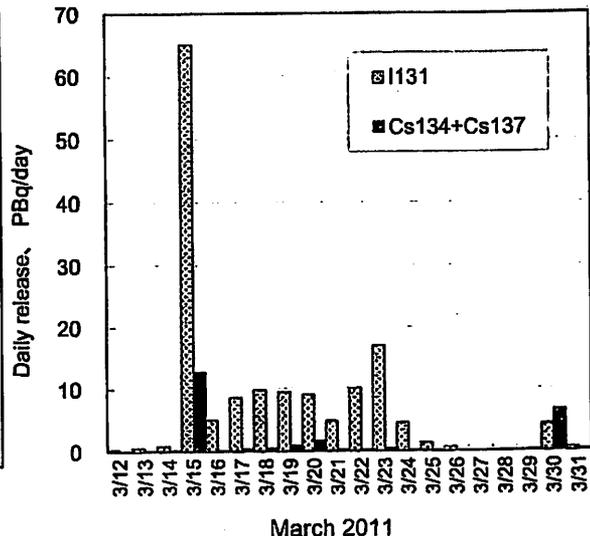


図6. 福島第1原発事故によるヨウ素131とセシウム134+137の大気中放出量の推移。茅野らの報告を基に作成。

表3. 大気中への主な放射能の大気中への放出量：福島とチェルノブイリ。単位：PBq。()内は炉心内蔵量に対する放出割合、%。

	福島			チェルノブイリ
	電気出力:203万kW(1~3号機合計)			100万kW
	安全委 (2011/4/12)	保安院 (2011/5/16)	ストールら [11]	チェルノブイリフォーラム (2005)[9]
キセノン 133	—	11,000(97%)	16,700	6,500 (100%)
ヨウ素 131	150	160(2.5%)	—	1,760 (55%)
セシウム 137	12	15(2.6%)	35.8	85 (30%)
ストロンチウム 90	—	0.14(0.03%)	—	10 (5%)
プルトニウム 239,240	—	0.0000064(0.0002%)	—	0.03 (1.5%)

福島事故の場合、津波による電源喪失直後から、排気筒モニターをはじめ放射線モニターが役に立たず、また、メルトダウンを起こした原子炉という放出源が3つもあるということで、放射能放出プロセスもその分複雑であった。チェルノブイリと同じく、どれだけ放射能が放出されたかは間接的な手法で推定することになる。

日本原子力開発機構の茅野らは、事故直後の数少ない空气中放射能濃度測定データと WSPEEDI による大気拡散シミュレーションの計算結果から福島事故でのヨウ素 131 とセシウム 137 の大気中放出量の推移を逆算している[10]。図6は、茅野らの報告を基に3月12日以降の1日ごとの放出量をグラフにしたものである。2号機の格納容器破損が報じられた3月15日に、ヨウ素 131 (半減期8日) が65ペタベクレル、セシウム 134 (半減期2年) とセシウム 137 (半減期30年) 合わせて13ペタベクレルという最大の放出があり、それから約10日間大量放出が続いている。ただ、茅野らが用いた空气中放射能測定データは、もっぱら陸上で得られたものであり、太平洋側へ流れた放射能はすっぱり見逃しているなのでその分は過小評価になっている。

表3は、福島事故による主要核種の大気中放射能放出量を、チェルノブイリ事故の場合と比較したものである。福島に関する安全委の値は茅野らの報告が基になっている。保安院の値は、原子炉メルトダウンの炉心シミュレーション計算に基づくもので、パラメータの入れ方に依存する。ストールら[10]は、CTBT (包括的核実験禁止条約) の地球規模放射能監視ネットワーク測定データからの逆算である。放射性ヨウ素と放射性セシウムの放出量については、チェルノブイリに比べ福島の方が少ないことは確かであるが、茅野らの推定で海側のデータが欠けていること、セシウム 134/セシウム 137 比はチェルノブイリでは0.5であったが、福島では1.0であることなどを考慮すると、長期的に問題となるセシウム 134 とセシウム 137 合計の放出量でいえば、“福島事故はチェルノブイリの2割から4割程度の放出量” というのが私の判断である。

福島事故での大気中への放射能放出は、チェルノブイリのように原子炉そのものが爆発した際に吹き飛んだものではなく、熔融炉心から揮発した放射能が中心であるため、放射能汚染の組成が違っている。我々は、2011年3月28-29日に福島第1原発から30~40km離れた飯舘村で放射能汚染調査を行った[12]。その際に採取した土壌について、ガンマ線分析で放射性セシウムを測定した後、ストロンチウム 90 とプルトニウムの測定を実施した。その結果を、チェルノブイリ南方110kmのキエフ市について報告されている値[13]と共に表4に示す。セシウム 137 汚染に対する比を考えると、キエフ市の汚染は、ストロンチウム 90 で約5分の1、プルトニウムで1%程度である。一方、飯舘村では、ストロンチウム 90 の汚染レベルはセシウム 137 の2000分の1で、プルトニウムでは100万分の1以下である。福島原発事故の場合、被曝影響と言うことでは、ストロンチウム 90 やプルトニウムの寄与はとりあえず無視しておいていいだろう。

ただし、この判断は、大気放出経由の陸上の汚染についてであって、海の汚染については別であ

表4 飯館村とキエフ市の汚染の比較

	土壌の汚染密度, ベクレル/m ²		
	セシウム 137	ストロンチウム 90	プルトニウム 239, 240
<飯館村:北西 30-40km>			
その1	1,000,000	390*	0.01**
その2	590,000	300*	0.07**
その3	2,200,000	790*	0.2**
<キエフ市:南 110km Gargerら 1996 [13]>			
市内6カ所平均	25,000	5,800	160

* (財)九州環境管理協会に測定を依頼. 核実験降下物を含む

**山本 (金沢大) による測定. プルトニウム 238 との比から核実験降下物分を差し引いた値.

る。2011年3月、メルトダウンした炉心が“チャイナシンドローム”に至る防ぐための緊急時対応として格納容器への注水が行われていた。その水は格納容器破損箇所から隣のタービン建屋地下に流入していたが、4月1日に2号機の配管ダクトを經由して高濃度汚染水が海に漏洩しているのが発見された。東京電力の報告書では4.7ペタベクレルの放射能が漏洩したとされているが、ヨウ素131、セシウム134、セシウム137の3つ放射性核種しか記載されていない。大気中放出と異なり、この汚染水にはストロンチウム、プルトニウムはもちろん、さまざまな放射性核種が含まれていたはずである。

6. おわりに

私は、1986年4月に事故発生のニュースを聞いて以来、チェルノブイリ事故とはどのような事故であったのかを私はずっと追っかけてきた。何度も現地に行っているうちに、放射能汚染や被曝影響もさることながら、チェルノブイリを何度も訪問して実感したのは、『原発で大きな事故が起ると、あっという間に周囲の村や町が無くなり、地域社会が丸ごと消滅する』というもの凄さであった。一昨年(2011年)の3月までは『へたをすると、日本でもチェルノブイリのようなことが起きる可能性がありますよ』と言っていけばよかった。

図7は、事故から26年たった現在のチェルノブイリ周辺の立入禁止区域と福島第1原発周辺の制限区域である。チェルノブイリの場合、事故から半月の間に周辺30km圏から約12万人の強制的避難が行われた。3年経ってから200~300km離れたところにも高汚染地域が広がっていることが明るみにでて、さらに約27万人を対象とする移住が実施された。チェルノブイリでは、約40万人の人々が自分の家に住めなくなった。福島では、警戒区域や計画的避難区域など約11万人に対し

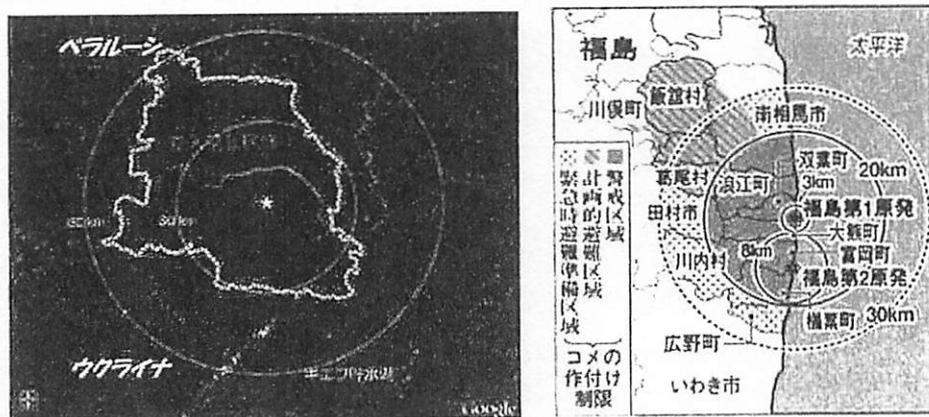


図7. チェルノブイリ周辺の立入禁止区域(左)と福島原発周辺の制限区域(右).
チェルノブイリ周辺の円は、内側が半径30kmで外側が半径60km.

て避難指示が出されたが、自主的に避難した人々を勘定に入れると、数 10 万の人々が避難生活を余儀なくされたと言っていいであろう。現在、避難区域の見直しが進行中であるが、汚染の主役であるセシウム 137 の半減期が 30 年であることを考えると、チェルノブイリの人々と同様、日本に住む私たちもこれから数 100 年にわたって放射能汚染と向きあわざるを得ない。

福島事故は、原発を利用する社会ではチェルノブイリのような事故が起き得るという当たり前のことを改めて示した。原発を再稼働させるとは、福島のような事故がまた起きる可能性を抱えこむことだと承知しておくべきである。

文献

1. 今中哲二「チェルノブイリを見つめなおす」(2006)
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/etc/Che20Final20060406-a.pdf>
2. GE 社を辞任した三技術者の議会証言. 朝日ジャーナル 1976.5.28
3. КГ СССР, “О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке чернойбыльской АЭС 26 апреля 1986г”, 17.01.1991.
4. USSR State Committee, “The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences”, August 1986.
5. 日本政府による IAEA への事故報告(2011).
http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html
6. 東京電力福島原子力事故調査報告書 (2012/6/24).
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/interim/index-j.html>
7. 国会事故調査委員会報告書 (2012/7/5).
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/report/index.html>
8. 政府事故調査委員会最終報告書(2012/7/23).
<http://www.kantei.go.jp/jp/noda/actions/201207/23kenshou.html>
9. Chino M. et al., J Nuclear Science and Technology, 48:1129-1134 (2011)
10. Stohl A. et al., Atmos Chem Phys Discuss 11:28319-28394 (2011)
11. 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
12. Imanaka T. et al., Health Physics, 102: 680-686 (2012).
13. E.K. Garger et al., Health Physics, 70:18-24 (1996)