

# チェルノブイリと福島： 事故プロセスと放射能汚染の 比較

今中哲二

いまなか てつじ  
京都大学原子炉実験所

5年前、「福島がチェルノブイリのようになってしまった」と私が確信したのは、3月15日午前11時に記者会見のテレビ中継で、当時の枝野官房長官が「4号機建屋で水素爆発が発生し、2号機では原子炉格納容器が破壊されたもよう」と発表するのを聞いたときだった。頭の中が真っ白になって、いつか見たことのある映画の中に自分があるような気分に襲われた。定期点検中で原子炉に核燃料が入っていないはずの4号機の水素爆発は、使用済み燃料プールの水がなくなって核燃料が高温になり、ジルコニウム・水反応で発生した水素が爆発したことを示唆し、2号機の格納容器破壊とは、すでに炉心がメルトダウンをおこして、蒸気と放射能でパンパンになっていた“放射能漏れを防ぐ最後の壁”が崩壊してしまったことを意味していた。(4号機水素爆発は、排気筒を共用していた3号機から、ベントの際に排気筒経由で4号機建屋に水素が流れ込んだもので、使用済み燃料プールが干上がったわけではなかった、と後に判明した。)

原発における最悪の事態とは、炉心に蓄積されている膨大な量の放射能が遮るものなく環境に漏れ出すような事故である。原子力開発がはじまって以来、私たちはそのような事故を2度経験した。1986年4月26日に旧ソ連ウクライナのチェルノブイリ原発4号機で起きたチェルノブイリ原発事故と、2011年3月11日の地震・津波をき

っかけにはじまった福島第一原発事故である。本稿では、チェルノブイリと福島の事故プロセスを振り返りながら、大気中への放射能放出と陸上の放射能汚染について比較しておく。

## チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリの原発は、旧ソ連が原爆用プルトニウムを作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 原発と呼ばれ (RBMK とはロシア語の“大出力チャンネル型原子炉”の頭文字)、その構造からは“黒鉛減速・沸騰軽水冷却・チャンネル炉”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原発が運転中であった。チェルノブイリ発電所では4基が運転中で、5、6号機が建設中であった。事故を起こした4号機(電気出力100万kW)は、1983年12月に運転を開始した、当時最新鋭のRBMK原発だった。1986年4月25日未明、チェルノブイリ4号機は、保守点検のため、運転開始以来はじめての停止作業に入った。運転停止に合わせて、タービンの慣性回転を利用する非常用電源のテストが予定されていた。25日午後、出力が定格の半分になったところで、キエフの電力司令所から運転継続の要請があり、50%出力で運転を継続した。午後11時に出力降下作業を再開し、午前零時に運転班が交代した。午前零時半、新たな運転班が原子炉出力のコントロールに失敗し、出力がゼロになってしまった。ここで電源テスト

Chernobyl and Fukushima: Comparison of accident process and radioactive contamination

Tetsuji IMANAKA

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であろう。しかし、運転員らは停止直後の原子炉から制御棒のほとんどを引き抜いて出力再上昇を試みた。(停止直後の原子炉は、中性子吸収断面積が大きな核分裂生成物キセノン135の効果によって起動しにくい。)午前1時23分、熱出力20万kWでなんとか安定したところで、タービンへの蒸気バルブを閉鎖し非常電源テストがはじまった。その40秒後、電源テストが終了し運転員が原子炉停止のために制御棒一斉挿入ボタンを押した。その3秒後に“出力上昇率高”と“出力高”の警報がなり、その数秒後に制御室の運転員たちは強い衝撃を感じた。原子炉建屋外部の目撃者によると、2回の爆発があり、花火のような火柱が夜空にあがったそうである。

チェルノブイリ事故は、原子炉の設計欠陥と極端な運転条件が重なって、原子炉出力が急上昇して一瞬のうちに原子炉と建屋が破壊された“暴走事故”であった。最初の爆発の後、むき出しとなった炉心で黒鉛ブロックの火災が発生し、大量の放射能放出が約10日間続いた。破壊された原子炉の周りには、炉心の構成物である核燃料や黒鉛ブロックががれきとなって散乱していた。(30年たった現在でも、チェルノブイリ事故の原因と経過について“定説”があるわけではない。上記のストーリーは、1991年にソ連最高会議が行った事故原因見直しの報告<sup>1</sup>に基づいている。1986年にソ連政府がIAEA(国際原子力機関)に提出した報告<sup>2</sup>では、事故の原因は運転員の規則違反とされている。)

## 福島原発事故

福島原発事故は、炉心冷却ポンプの電源喪失にともなう“冷却失敗事故”だった。2011年3月11日14時46分に地震が発生したとき、福島第一原発の6つの原子炉(いずれもBWR:沸騰水型原発)のうち、4号機から6号機は定期検査のため停止中で、1号機から3号機が定格運転中だった(1号機の電気出力は46万kWで、2号機、3号機は78万kW)。原子炉緊急時のスローガンは“止める”、“冷やす”、“閉じ込める”の3つである。止めるとは、核分

裂連鎖反応を止めることで、地震の震動を感じて制御棒が自動的に挿入され、福島第一原発で運転中の3つの原子炉はぶじに停止した。ところが、原子炉停止と同時に発生したのが送電塔の倒壊や変電所の碍子破損にともなう外部電源喪失だった。運転中の原発は電気を外へ供給しているが、原子炉が全部止まってしまうと外から電気を受け入れる必要がある。原子炉の核分裂反応は止まっても、莫大な量の核分裂生成物から発生する崩壊熱を冷やすことができなくなると、原子炉はメルトダウン(炉心溶融)に至る。外部電源が喪われた場合に備えたのが非常用ディーゼル発電機であった。外部電源喪失の発生にともない非常用ディーゼル発電機が自動起動し、1~3号機の運転員は、これで何とか乗り切れると判断したことであろう。そしてその後やってきたのが津波であった。津波対策の想定高さ5.7mのところ10mを超える津波がやってきた。タービン建屋の地下階に設置されていたディーゼル発電機はすべて海水をかぶって停止した。ここに、旧原子力安全委員会の原子炉安全設計審査指針において、「長期間にわたる全交流動力電源喪失は、送電線の復旧又は非常用交流電源設備の修復が期待できるので考慮する必要はない」とされていた事態がはじまった。

BWRでは全交流電源の喪失に備えて、交流電源に頼らない炉心冷却システムを備えている。タンクの蓄積水と炉心の水とを重力で自然循環させる非常用復水器(IC)や、炉心で発生する蒸気を用いるタービン駆動式ポンプの原子炉隔離時冷却系(RCIC)と高圧注入系(HPCI)である。しかし、いずれのシステムもバルブの開閉など起動操作に直流電源を必要とするし、長時間の運転は想定されていない。直流電源については、1号機と2号機ではバッテリーが地下階にあり津波で水没し役に立たなくなったが、3号機では、少し高い位置にあったため水没を免れた。

原子力学会事故調<sup>3</sup>などの報告書によると、最初に炉心崩壊がはじまったのは1号機で、3月11日の夕方頃と推定されている。1号機にはICとHPCIがあったが、直流電源がなくなったこ

ともあってどちらも役に立たなかった。11日深夜までに、メルトダウンからメルトスルー(原子炉容器の貫通破壊)へと進展した。(車のバッテリーを計装系につなぎ込んで行っていた測定によると)12日午前2時30分には840 kPaという設計耐圧の約2倍の格納容器内圧が記録され格納容器破壊が心配された。格納容器の破壊は“閉じ込める”機能の崩壊を意味している。次善の策として格納容器圧力を下げたためのベントが試みられ、12日14時半頃に何とかベントに成功したが、直後の15時36分、格納容器のフランジなどから漏えいし原子炉建屋の天井に溜まっていた水素が爆発した。19時4分に消防車のホースを消火栓につないで炉心への海水注入が開始された。

3号機では、津波によって非常用ディーゼル発電機が止まった後は、RCICによっ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。次にHPCIが自動起動した。13日2時42分、HPCIを停止して消火系からの炉心注水が試みられたが、なかなかうまくいかず水位が低下し、13日午前9時頃から炉心損傷が始まったものと推定されている。格納容器圧力の上昇にともない13日に複数回のベントが行われ、圧力を下げることができたが、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、交流・直流電源がなくなったまま3月14日午前中まで動いていた。RCICの機能停止後、原子炉圧力が上昇して水位が下がり続け、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格納容器内圧が上昇し、ベントが試みられたが成功しなかった。14日深夜から15日早朝にかけて格納容器圧力は700 kPa以上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155 kPa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、福島第一原発正門で12 mSv/hという放射線量率が記録されている。

1~3号機とも、炉心水位が低下し、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。いずれの原子炉においても、燃料と炉心材料の混合溶融物が圧力容器を貫通し、ペDESTALと呼ばれる格納容器のコンクリート床に落下した。溶融固化物(デブリ)が格納容器内のどこにどのような状態で存在しているのかは5年が経過した現在も明らかでない。溶融物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“チャイナシンドローム”を最終的に防いだのは、9カ月前の2010年6月に設置されたばかりの消火栓経由の炉心注水系だった<sup>4)</sup>。

## 放射能放出量と放射能汚染

図1は、文献2と5にもとづいて作成した、チェルノブイリ事故と福島事故についての毎日の大気中放出放射能推定値である。チェルノブイリでは、最初の爆発にともなって炉心燃料に近い組成で放射能が大気中に放出された。黒鉛火災にともなう放射能放出は5月6日に終息したことになる。終息の理由は定かではないが、炉心の黒鉛が燃え尽きて放射能放出も収まったようだ。福島では、事故がはじまって2日目(12日)と4日目(14日)に1号機と3号機の水素爆発があったが、炉心そのものの爆発ではなかった。福島で大気中に放出された放射能は、高温の溶融炉心から揮発した、ガス状や揮発性の放射性核種が主体であった。最大の放射能放出があったのは、2号機の格納容器破壊がおきた15日で、この日の夕方から翌朝にかけて放射能ブルームが流れていった浪江町、飯舘村、福島市では運悪く雨や雪が重なって大規模な地表沈着がおき、北西方向へ延びる避難指示区域の主要な汚染域が形成された。(Kataraら<sup>6)</sup>の分析によると、北西方向汚染帯の形成には15日午後の3号機ベントも大きく寄与した。)

表1は、大気中に放出された放射能量の推定値である。チェルノブイリについてのソ連政府の値<sup>2)</sup>は、旧ソ連国内に沈着した放射能量の値で、瀬尾ら<sup>7)</sup>は、北半球全域に及ぶデータを利用して、

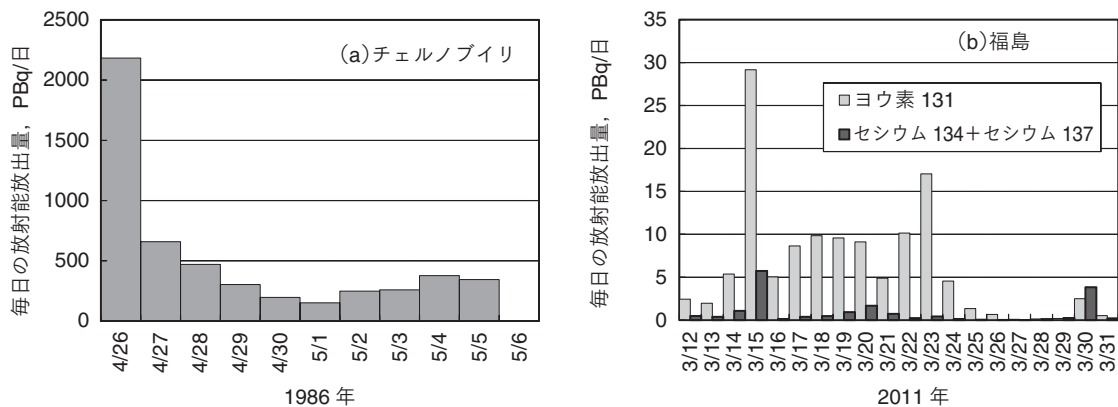


図1—大気中への毎日放出放射エネルギー推定値

PBq=10<sup>15</sup> Bq。(a)チェルノブイリ。1986年ソ連政府報告書<sup>2</sup>にもとづいて作図。貴ガスを除いた放射エネルギー。(b)福島。UNSCEAR 2013年報告<sup>5</sup>のデータより作図。

表1—大気中への放射能放出量の比較

単位：PBq(10<sup>15</sup> Bq)

放射性核種	半減期	チェルノブイリ			福島		
		ソ連政府報告 <sup>2</sup> (1986)	瀬尾ら <sup>7</sup> (1988)	チェルノブイリ フォーラム <sup>8</sup> (2005)	保安院 <sup>9</sup> (2011)	Stohl et al. <sup>10</sup> (2012)	UNSCEAR <sup>5</sup> (2014)
キセノン 133	5.24 日	9,000	n.a.	6,500	11,000	15,300	7,300
ヨウ素 131	8.04 日	760	2,600	1,760	160	n.a.	120
テルル 132	3.25 日	640	3,100	1150	0.76	n.a.	29
セシウム 134	2.07 年	21	110	47	18	n.a.	9.0
セシウム 137	30.1 年	37	160	85	15	36.6	8.8
ストロンチウム 90	28.8 年	8.1	20	10	0.14	n.a.	n.a.
ジルコニウム 95	65.5 日	160	240	84	0.017	n.a.	n.a.
ルテニウム 103	39.3 日	150	470	168	7.5×10 <sup>-6</sup>	n.a.	n.a.
ルテニウム 106	372 日	60	200	73	2.1×10 <sup>-6</sup>	n.a.	n.a.
バリウム 140	12.8 日	300	520	240	3.2	n.a.	n.a.
セリウム 141	32.5 日	130	310	84	0.018	n.a.	n.a.
ネプツニウム 239	2.36 日	1,900	5,900	400	0.076	n.a.	n.a.
プルトニウム 239	2万4000 年	5.2	9.3	0.013	3.2×10 <sup>-6</sup>	n.a.	n.a.

n.a.; 評価なし。

原発から 3000 km に及ぶ沈着放射エネルギーを見積もっている。チェルノブイリフォーラム<sup>8</sup>とは、チェルノブイリ事故 20 年の機会に、IAEA, WHO といった国連組織と、ウクライナ、ベラルーシ、ロシアの代表が集まってさまざまな報告をまとめたものである。福島については、保安院の値<sup>9</sup>は、事故プロセスのシミュレーション計算にもとづくもので、パラメータの入れ方によって結果が大きく変わる。Stohl ら<sup>10</sup>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と大気中輸送シミュレーション結果とから放出源強度を逆算したものである。UNSCEAR(国連科

学委員会)<sup>5</sup>の値は、日本国内で得られた空気中放射能濃度などから逆算した Terada らの論文<sup>11</sup>がもたっている。

気体であり放出されやすいキセノン 133 の放出量について、チェルノブイリより福島のほうが大きいのは、原子炉出力の違い(チェルノブイリは 100 万 kW 1 基で、福島は 3 基合わせて約 200 万 kW)の反映である。揮発性核種であるヨウ素 131 とセシウム 137 については、不確かさはあるものの、炉心が剥き出しとなったチェルノブイリのほうが福島より大きかったことは確かであろう。ヨウ素 131 について、UNSCEAR とチェルノブイリフォー

表2—飯館村とキエフ市の汚染の比較

	土壌の汚染密度(Bq/m <sup>2</sup> )		
	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 30～40 km〉 <sup>12</sup>			
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 110 km〉 <sup>13</sup>			
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 との比を用いて核実験降下物分を差し引いた値。

表3—セシウム 137 による汚染面積の比較

ウクライナ、ベラルーシ、ロシアのチェルノブイリ法によると、3.7万 Bq/m<sup>2</sup> 以上が放射能汚染地域で、55.5万 Bq/m<sup>2</sup> 以上が移住義務地域。

	セシウム 137 汚染レベル	
	3.7 万 Bq/m <sup>2</sup> 以上	55.5 万 Bq/m <sup>2</sup> 以上
チェルノブイリ <sup>12</sup>	145,000 km <sup>2</sup>	10,300 km <sup>2</sup>
福島 <sup>14</sup>	8,424 km <sup>2</sup>	768 km <sup>2</sup>

ラムの値を比べると、福島はチェルノブイリの7%となる。セシウム 137については、UNSCEARとチェルノブイリフォーラムを比べると、福島はチェルノブイリの10%で、Stohlらの値とチェルノブイリフォーラムを比べると43%になる。

プルトニウムやストロンチウム 90のような不揮発性核種の大気中放出量は、事故プロセスの違いを反映して、福島ではチェルノブイリに比べ極めて少なかった。表2は、筆者らが飯館村で採取した土壌中のストロンチウム 90とプルトニウムの値<sup>12</sup>について、チェルノブイリ原発南方110 kmのキエフ市について報告されている値<sup>13</sup>とを比較したものである。キエフ市では、セシウム 137汚染に比べると、ストロンチウム 90は約5分の1、プルトニウムは1%程度あり、被曝を考える際に無視できない。一方、飯館村では、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、プルトニウムでは100万分の1以下であった。

福島周辺汚染地域でのこれからの長期的な被曝を考えた場合、注目しておくべき放射性核種はセシウム 137である。表3は、セシウム 137によ

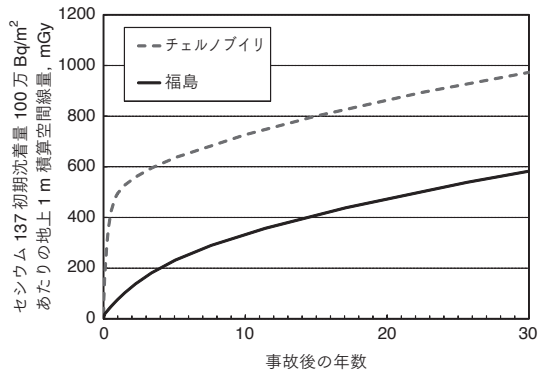


図2—セシウム 137 の初期沈着量 100 万 Bq/m<sup>2</sup> の場合について他の放射性核種の寄与も考慮した地上 1 m での積算空間線量の比較

る陸上の汚染面積をチェルノブイリと福島で比較したものである<sup>14</sup>。3.7万 Bq/m<sup>2</sup> 以上ならびに55.5万 Bq/m<sup>2</sup> 以上という区分は、チェルノブイリ周辺における“放射能汚染地域”ならびに“移住義務地域”の定義である(それぞれ、旧単位の1キュリー/km<sup>2</sup>と15キュリー/km<sup>2</sup>に対応)。福島の汚染面積をチェルノブイリと比較すると、放射能汚染地域はチェルノブイリの5.8%、移住義務地域は7.5%となる。チェルノブイリと福島の大きな違いのひとつは、チェルノブイリは内陸立地で、福島は東側が太平洋という海だったことである。福島では、大気中放出放射能の7～8割が偏西風により太平洋のほうに流れたことを指摘しておきたい。また、海洋の汚染については本稿では議論しないが、福島事故にともなう液体放射能の太平洋への直接的な放出量としては、セシウム 137で3～6 PBq、ヨウ素 131はその3倍という値が報告されている<sup>5</sup>。

図2は、セシウム137の初期沈着量として100万Bq/m<sup>2</sup>の汚染があった場合について地上1mでの空間ガンマ線量率を、他の放射性核種の寄与も考慮しながら沈着後の時間で積分した積算空間線量をチェルノブイリと福島で比較したものである<sup>12</sup>。(ちなみに、飯館村でのセシウム137の平均初期沈着量は約90万Bq/m<sup>215</sup>。)表1に示したように、チェルノブイリでは、セシウムやヨウ素以外に半減期の短さまざまな放射能が放出されたため、はじめの1年間の積算線量は500mGyと福島(76mGy)の6.6倍であるが、30年間では1.7倍(970mGyと570mGy)となる。

## 結び

チェルノブイリ調査ということで私がはじめてソ連を訪問したのは事故から4年後の1990年8月のことだった<sup>16</sup>。以来、20回以上の現地調査を通じて得た教訓は次の2つである。

- 原発で大事故が起きると、まわりの人々が突然に自分の家に住めなくなり、村や町が丸ごと消えてしまう
- 原発事故によって人々が蒙る災厄は、放射能汚染や被曝といった私が専門としている物差で測れる範囲をはるかに超えている

2011年3月末にはじめて飯館村の調査に入って以来この5年間、原子力専門家として私なりに福島原発事故のことにかかわり続けてきた。福島第一原発周辺では、いまだ約900km<sup>2</sup>が避難指示区域に指定され、約10万の人々が避難生活を余儀なくされている。本稿で述べたように、放射能放出の量や組成また汚染の規模に違いはあるものの、チェルノブイリと同様のことが福島で起きていると私は実感している。これからも原子力をエネルギー源として利用することとは、チェルノブイリや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—КГ СССР, “О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке

чернобыльской АЭС 26 апреля 1986г”, 17.01.1991.

2—USSR State Committee, “The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences”, August 1986.

3—日本原子力学会福島第1原発事故調査委員会・最終報告書, 丸善(2014)

4—国会事故調・報告書, 2012年7月5日

5—UNSCEAR(国連科学委員会)2013年報告書

6—G. Katata et al.: Atmos. Chem. Phys., **15**, 1029(2015)

7—瀬尾健・他: 科学, **58**, 108(1988)

8—Chernobyl Forum. IAEA, 2005

9—原子力安全・保安院, 2011年5月16日

10—A. Stohl et al.: Atmos. Chem. Phys. Discuss., **11**, 28319(2011)

11—H. Terada et al.: J. Environ. Radioact., **112**, 141(2012)

12—T. Imanaka: J Radiation Research, **56**, i56(2015)

13—E. K. Garger et al.: Health Physics., **70**, 18(1996)

14—沢野伸浩: 本当に役に立つ「汚染地図」, 集英社新書(2013)

15—今中哲二・他: 科学, **84**, 322(2014)

16—瀬尾健: チェルノブイリ旅日記, 風媒社(1992)

## 今中哲二 いなか てつじ

京都大学原子炉実験所・助教。専門は原子力工学。大学院時代より日本の原子力開発の在り方に疑問をもちはじめ、研究者としては、原子力を進めるためではなく原子力利用にともなうデメリットを明らかにするというスタンスでの研究を行ってきた。広島・長崎原爆による放射線被曝量の評価、チェルノブイリ原発事故影響の解明、セミパラチンスク核実験場周辺での放射能汚染の現地調査などに従事。2011年3月の福島第一原発事故以降はもっぱら福島の問題に専念。2016年3月定年退職予定。