

チェルノブイリ原発事故と

ヨーロッパの放射能汚染

西脇 ヤナシ 安

1. チェルノブイリ原発の原子炉

今回事故を起こしたチェルノブイリ原子力発電所の4号炉はウラン黒鉛式大容量沸騰水型チャンネル炉でRBMK-1000とよばれ、1984年12月に運転を開始した最も新しい原子炉である。RBMKはレアクトール・バリショーイ・モージノステイ・カナリーヌイ（大容量チャンネル型炉）というロシア語の頭文字をとった略称で設計出力1,000 MWe（電気出力100万kW、熱出力320万kW）である。核燃料は低濃縮（約2%）の二酸化ウランで、減速材はグラファイトである。一重回路の沸騰水冷却型である。

ソ連の文献によれば、1,693本の核燃料の周囲を冷却水が通る燃料チャンネルはグラファイトのブロックを貫いて、原子炉の上部と下部の金属構造物に溶接された管路に納められ、チャンネルの上部と下部はステンレス鋼製、中央部は十分に機械的強度と耐蝕性が高く、ニオブを2.5%含んだジルコニウム合金製である。チャンネルのジルコニウム部分と鋼鉄との接合は特殊な溶接アダプターで行う。試験で十分実証済みといわれるが、この部分が一つの弱点ではなかったかとも考えられる。

2. 事故の発生と経過

今回の事故の起こったきっかけは、通常のメンテナンスのため出力を6~7%に下げているとき4月

26日午前1時23分40秒に突然出力が急上昇し、10秒間で50%になった。なぜ、急上昇したかは、ソ連の公式発表をまたないとはっきりしないが、制御棒を引き抜いたか、中性子を強く吸収する¹³⁵Xeが急速に減少したためではないかと想像している人もいる。断片的な資料を総合すると、このとき炉の一部で過熱が起こり、圧力管、スチーム・パイプが破れて、高温の水とジルコニウムが反応して水素ガスが発生し、これが原子炉上部にたまって空気中の酸素と反応し大爆発を起こし、天井がふっとんで壁が倒れ200トンのクレーンが原子炉の上に落ちた。このとき原子炉の上部にいた1人はスチームで即死し、もう1人は落下物にあたって死んだ。このため原子炉が大きく破損し、高温のグラファイトと水が反応し、大量の水素、一酸化炭素などが発生し、大火災となり、核燃料の一部が熔融して、大量の放射能が放出されたと推定される。数10万ないし数100万TBqの放射能が放出されたと推定している学者もいる。地上からの消火ではどうにもならないので、ただちに空軍に連絡し、ヘリコプタが翌27日から動員され、上から砂、粘土、ドロマイト（耐火レンガの材料）、鉛、硼素（中性子を吸収し核反応をとめる）などを約5,000トン投下し、原子炉の下の地下室にはコンクリートを流しこみ、液体窒素をパイプで注入し、土地を凍らせると共に発生した窒素ガ

スを消火に役立たせ、約10日目にやっと下火になった。7月になって、ヘリコプタから大型ゾンデ探針を投下して、うもれた原子炉の残がいにつきさし、内部の温度や放射能の状態を調べ始めた。

今回の事故では重傷者約300人が入院し、周辺30kmの危険地区内の住民約9万2,000人を2回にわけて、短期間に退避させている。これだけでも平常から対策がないと大変だと思ふ。幸い、事故が起こったのは真夜中で、また原子炉の温度が高く、上昇気流が強かったので逆転層を突破して放射性的雲プルームは約1kmの高さに昇り、風は、人口約240万のキエフと反対にふいていたのでキエフ市内の汚染は余りひどくなかった。それでも予防的な措置として、幼稚園と小学校の子供達25万人を夏休みを早めて疎開させたといわれる。その後、白ロシアの一部で高放射能地域が見つかったので、さらに住民の退避をさせているという。最初入院した204名は主としてプラントの従業員と消防関係の人達で、100 rem（1 Sv）から750 rem（7.5 Sv）以上被曝している。750 rem以上被曝した18名のうち5名は1,000 rem以上と推定されている。染色体異常などを調べ、生物学的な影響からも、線量の推定をしている。骨髄移植など最善の医療をうけているが、7月中頃までに、現場で死亡した2名を入れて、28名死亡した。消火にあたった大線量被曝者の体内から中性子による誘導放射能²⁴Naがほとんど検出されないことから、この時にはすでに原子炉の核反応は停止していたものと推定している。IAEA事務総長ブリックス氏は5月8日、事故炉の上空約800mをヘリコプタで飛んだが、このとき線量率は毎時350 mRであ

ったと報告している。

3. ヨーロッパ各国の放射能汚染

今回のチェルノブイリの事故が発覚したのは、スウェーデンのストックホルムの北約100 kmにあるフォルシュマルク原子力発電所で異常放射能が検出されたためである。4月27日(日)にコンピュータ・スクリーンに異常放射能の信号が出ていた。翌4月28日(月)の朝7時に原子炉運転の交替要員が出勤してきて、靴のカバーをつけて中に入り、ノートブックをとって、一寸外に出ようと思つて、ハンド・フット・モニタのつたところ放射能汚染の警告ランプがついた。そこで、一体どこで汚染したのか調べたが、放射能が漏れている箇所が判らない。靴のカバーをもう一度よく調べてみると、カバーの外側でなく、内側の靴の裏が放射能で汚染している。そこで外部の土を調べてみると強い放射能汚染がある。それでも放射能がどこから来たのかよく判らない。この頃、すでにスウェーデンの国防研究所が動き出している。とにかく緊急時対策の指針のもとづき、警察、消防、役場、ストックホルムの電力庁などに連絡すると共に、600人の従業員を退避させた。その後、他の原発、研究所などに連絡したところ意外に広く放射能がひろがっていることが判った。また隣国のノルウェー、デンマーク、フィンランドでも放射能汚染が検出されていることから、風向などを考えて、ソ連の方から来ていることがその日の午後3時頃になって推定された。

最初はスウェーデンに近いリトワニアのイグナリナ原発(RBMK-1500 MWe)が疑われ、モスクワのスウェーデン大使館からソ連側に聞いたが、はっきりしない。その夜の

9時のソ連国営テレビニュースで始めて、チェルノブイリ原子力発電所で事故が発生し、原子炉一基が損傷した旨発表された。

一方、デヴェル氏らの発表によれば、ストックホルムの南南西約75 kmにあるスツツヴィク・エネルギー技術研究所のホット・セル実験室でも放射能が4月28日早朝、自然のバックグラウンドより高いことが認められ、また午前中に外部からスツツヴィクに來た人達や車から放射能汚染が検出されたので、汚染源は外だと判った。空気フィルタの放射能分析から ^{137}Cs の ^{134}Cs に対する比が約2であることから、核爆発によるものではなく原子炉によるものと推定された。地表では、レート・メータのカウント数が約2倍になり、 1 m^2 当たり1個の高放射性粒子ホット・パーティクルが見付かった。特に放射能の高い粒子は径約 $1\ \mu\text{m}$ の球形で、放射性ルテニウムからなっていた。このことから炉心の温度もルテニウムの融点 $2,500^\circ\text{C}$ まで達していたと想像される。放射線量率は自然放射線の約2~3倍に上がった。放射線連続測定機の記録から、放射性雲は1986年4月27日14時(スウェーデン時間)にスツツヴィクに到達したと推定された。ホット・スポットの試料はガンマ線スペクトル、電子顕微鏡、オートラジオグラフなどで調べられた。4月28、29日の空気中の濃度は ^{137}Cs が 1 m^3 当たり2~5 Bq、 ^{131}I が6~12 Bqであった。ただし、ガス性のヨウ素は活性炭を用いたフィルタでないと測定にかかってこない。4月30日から5月2日にかけて活性炭を用いたフィルタで採集したサンプルからヨウ素の75~80%はガス性と推定された。最初の3日間の後では大気中の濃度は2桁下がった。オ

ーストリアのウィーンでも大気中の ^{131}I の濃度は少し時期がづれて3回ピークが波状に表れている。ヨーロッパ各地で検出された核種は ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{132}Te 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{136}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{95}Zr 、 ^{95}Nb 、 ^{103}Ru 、 ^{106}Ru 、 ^{140}Ba 、 ^{140}La 、 ^{141}Ce 、 ^{144}Ce 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{239}Np 、 ^{60}Co 、 ^{99}Mo 、 ^{127}Sb 等である。トーマス、マルタンらはフランスの測定に基づき、同位体比 $^{132}\text{Te}/^{129\text{m}}\text{Te}=11$ 、 $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}=0.21$ 、 $^{141}\text{Ce}/^{144}\text{Ce}=1.4$ 、 $^{103}\text{Ru}/^{106}\text{Ru}=5.4$ 、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}=0.506$ 等は、チェルノブイリの放射能を識別するのに役立つだろうと述べている。

熱出力300万kWで400日運転すると ^{131}I は約 10^{16}Bq 、 ^{137}Cs は $5.2 \times 10^{16}\text{Bq}$ 、 ^{239}Np は $1.86 \times 10^{19}\text{Bq}$ たまる。つまり炉心には1:0.052:18.6の割合で存在するが、空气中の観測された濃度の比は、20:1:1といったように圧倒的に放射性ヨウ素が多い(50~80%)。原子炉事故の場合には高温で大気中に逃げやすい放射性核種の割合が多いが、核爆発の数日後に観測される放射性降下物では、ヨウ素よりも ^{239}Np (30~60%)の方が多い。放射性気体のXe、Krなどはほとんど全部放出されるだろう。

^{131}I の半減期は8.04日で ^{133}I の半減期は20.9時間である。したがって原子炉を長期間運転していると平衡状態になり、 $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ の比は約2.14になる。原子炉の運転をとめると、半減期の短い方が速く減衰するのでこの割合が時間とともに変わってくる。デヴェル氏はスウェーデンの測定結果を外挿し、この比が2.14であった時間を求めると、4月25日の19時頃に原子炉の運転をとめたと推定されると報告している。しかし、この数日前にもフィンランド、デンマーク等で少し高い放

射能濃度が検出されている。したがって、最初小規模の放射能もれ事故があり、原子炉を止めて修理、点検し、メンテナンスを終わって、テスト中に今回の事故が起こったのではないかと想像している人もいる。

ソ連以外で一番放射能の高かったのはポーランドの北東部で、ごく一部には自然放射線量率の500倍にも上がったところもあるといわれるが、南西部はかなり低い。参考のためポーランドのヤボロフスキー氏によりIAEAに報告されたデータを表1に示す。オーストリアではザルツブルグなど高地の方がウィーンの平地よりも放射能が高い。グリーンツィングと市内の行政官庁の測定所で記録された結果を表2に示す。オーストリアは人口わずか600万人余りの小国だが、全国に336箇所の放射線量率自動連続測定所を放射能の早期警報システムとしてもっている。

5月2日には英国、西ドイツ、ユーゴスラビア、スイス、ベルギー、オランダ、イタリア、フランスなどでも自然放射線量率の2倍ないし

10倍に上がった所がある。一般に山岳地方が平地よりも高く、地域差もかなりあるが急性の放射線障害の起こるような危険な線量ではない。

これらヨーロッパ各地の放射能汚染の平均値は大体同じ程度で、高いといっても、放射能の上昇した全期間中の総線量は平均1～数mSvの程度と推定される。一部、放射能値の高い地域では一時的に予防的な意味で野菜やミルクの制限、ヨウ素剤の投与、また乳牛は野外に出さないように、子供や妊婦も外出しないように勧告したりした。オーストリアでも最も放射能の強い¹³⁷Iに対してミルクは10nCi/l、野菜は10nCi/kg(1nCi=37Bq)という限界を設定して厳重な管理を行い、東欧から来るすべての乗り物、自動車、鉄道車両、船舶などを放射能検査していたが、現在では放射能値が低くなるとともに解除に向かっている。1MBq/m²(27μCi/m²)程度の汚染でも車の表面を強く洗えばかなり減少する。野外の羊や、ヤギのミルクは1,000nCi/l以上のものもあっ

た。乳牛は昨年とれた倉庫にあるマグサを使っていたので、オーストリアの牛乳の放射能汚染は低く、高いものでも20～30nCi/l、大部分は¹³⁷Iが1～2nCi/lの程度で、検出できないようなものもあった。母乳も一部の国で測定されているが0～1nCi/l以下であった。4月27日～5月4日の間にストックホルム地区で測定された値は¹³⁷Iで8～25Bq/lの程度である。野外のニワトリの卵、ハウレン草、ジャンビニオンなどは放射能が高いので、一時注意が喚起された。

5月はじめ放射能汚染が中部ヨーロッパ各国に広がりはじめた頃、まるで32年前の日本のビキニ事件を思い出させるような大騒ぎになってきたので、WHOもコペンハーゲンの欧州事務局で緊急専門家会議を開き、あまり心配しないように特別声明を出した。

ビキニで被災した第五福竜丸が持ち帰った放射能マグロに比べると汚染程度は低い、最初大気中放射能が上昇傾向を示したので、西欧各国

表1 ポーランドの放射能汚染状況

(チェルノブイリに近い北東部で高く、南西部で低いので、最低値と最高値の開きが大きいことに注意)

| ガンマ線の測定と総ベータ放射能 | 4月28日* | 4月29日 | 4月30日 | 5月1日 | 5月2日 | 5月3日 | 事故前 |
|-------------------------------------|----------|------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| 地上1mの線量率 | 0.02mR/h | -0.45mR/h | | | | | 0.012 mR/h |
| 空気 (Bq/m ³) | 0.8～87 | 0.9～571 | min. max. 0.3～514 | 0.3～110 | 0.5～4.9 | 0.55～6.7 | 0.1 |
| ミルク (Bq/l) | | 30～2000 | 42～1770 | 23～945 | 35～990 | 37～583 | 42 |
| 地表水 (Bq/l) | | 4.4～40 | 1.3～89 | 0.2～103 | 0.5～417 | 0.7～59 | 0.7 |
| 水道水 (Bq/l) | | 6.7～48 | 0.2～74 | 0.3～101 | 0.3～111 | 0.7～37 | 0.4 |
| 草 (Bq/kg) | | 2400～50000 | 3200～105000 | 2700～87000 | 3600～52000 | 3440～49000 | 3223 |
| 土 (Bq/kg) 2～3cm厚 | | 333～2870 | 258～12958 | 285～8701 | 395～6300 | 559～15955 | 481 |
| 放射性降下量 (Bq/m ²) (1日当たり) | | 21～2800 | 26～19514 | 185～15000 | 84～23000 | 37～2968 | 34 |
| 肉 (Bq/kg) | | 71～194 | 75～281 | 51～183 | 50～788 | 50～182 | 99 |
| 野菜 (Bq/kg) 新鮮 | | — | 2600～6847 | 480～21000 | 238～82000 | 2600～17000 | 132 |

1986年4月28日から5月3日までの間の大気中の放射能濃度(Bq/m³)とアイソトープ組成

| ¹³² I | ¹³² Te | ¹³⁷ Cs | ¹³⁴ Cs | ¹⁰³ Ru | ¹³¹ I |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 最低 70 | 1.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 1.6 |
| 最高 260 | 164 | 19 | 10 | 29 | 186 |

* 5月2日のワルシャワにおける発表によれば、北東部の一部で4月28日朝2.5mR/hになった所があるという。この頃、ワルシャワの一部でも一時的に1.5mR/hになったという。

表2 ウィーン市内の行政官庁およびグリーンツィングの測定点における放射線量率の減衰を示す一覽表(期間:1986年4月30日から5月26日まで)

| | グリーンツィング ($\mu\text{R}/\text{h}$) | 行政官庁 ($\mu\text{R}/\text{h}$) |
|------------|--|------------------------------------|
| 1986年4月30日 | 17.20 | 16.60 |
| 1986年5月1日 | 15.00 | 13.90 |
| 1986年5月2日 | 17.60 | 24.50 |
| 1986年5月5日 | 15.80 | 18.30 |
| 1986年5月10日 | 12.70 | 12.70 |
| 1986年5月15日 | 11.00 | 9.83 |
| 1986年5月20日 | 10.80 | 8.21 |
| 1986年5月26日 | 10.10 | 7.65 |

では各々独自の低い限界を設定して予防的措置をとった。しかしその後、 ^{131}I に対し上記オーストリアの限界に近い値 $10 \text{ nCi}/\text{kg}$ をミルク、野菜等に採用している国が多い。

4. 人体の放射能汚染

スウェーデンの国立放射線防護研究所の職員の甲状腺の ^{131}I は数 Bq から $100\sim 200 \text{ Bq}$ の程度であった。一般市民の値も同じ程度の低い値であった。

英国では、事故が起こってから、キエフ、ミンスク地方から帰ってきた学生の放射能汚染を国立放射線防護委員会のホリデー氏が調べ、甲状腺に ^{131}I $1.9\sim 6.4 \text{ kBq}$ ($1 \text{ kBq} = 27 \text{ nCi}$)、また事故時にさかのぼって線量当量を計算すると $4\sim 14 \text{ mSv}$ 、つまり年線量当量限度の約 $8\%\sim 28\%$ にあたるかと推定している。99名の学生につき、帰国して測定した値から、事故時の甲状腺の放射能は $6\sim 53 \text{ kBq}$ の程度と推定している。オーストリアでもリンツに本社のあるヴェスト・アルビーネ製鋼会社がキエフにタイヤの工場を建設中で、約600名働いている。5月始めに本社から、女、子供を呼びもどし、ウィーン郊外のサイバースドルフ原子力研究所で甲状腺の ^{131}I 放射能を調

べたが、いずれも $1 \mu\text{Ci}$ (37 kBq) 以下であった。英国では衣服の放射能汚染についても 1 cm^2 当たり 30 Bq または英国のレート・メータで1秒当たり100カウントという値を制限値としている。

5. 放射能制限とリスク係数

IAEA では原子炉事故や放射能事故に際して、一般公衆を守るためにいくつかの勧告案や指針を出している。このうち、今回のような放射能汚染の場合に関係する部分を要約すると、食料や飲料水等の制限のため初年度に受ける線量当量として、全身に対して $5\sim 50 \text{ mSv}$ 、選択的に照射される個々の器官に対して $50\sim 500 \text{ mSv}$ という値を勧告している。色々な放射性核種を摂取したとき、全身または個々の器官の線量当量が、上記の値に達しないように摂取を制限すべきだという限度である。

これらの値を例えばミルクに適用すると、ミルクの使用を制限すべき最高濃度として、 ^{131}I に対して幼児(1歳) $2 \text{ kBq}/\text{l}$ ($54 \text{ nCi}/\text{l}$)、子供(10歳) $5.2 \text{ kBq}/\text{l}$ ($140 \text{ nCi}/\text{l}$)、成人 $14 \text{ kBq}/\text{l}$ ($378 \text{ nCi}/\text{l}$)、 ^{137}Cs に対しては、それぞれ $3.6 \text{ kBq}/\text{l}$ ($91 \text{ nCi}/\text{l}$)、 $8.1 \text{ kBq}/\text{l}$ ($219 \text{ nCi}/\text{l}$)、 $16 \text{ kBq}/\text{l}$ ($432 \text{ nCi}/\text{l}$) となる。また、生野菜の制限濃度として、 ^{131}I に対して幼児(1歳) $110 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($2970 \text{ nCi}/\text{kg}$)、子供(10歳) $170 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($4590 \text{ nCi}/\text{kg}$)、成人 $340 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($9180 \text{ nCi}/\text{kg}$)、 ^{137}Cs に対しては、それぞれ $190 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($5130 \text{ nCi}/\text{kg}$)、 $250 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($6750 \text{ nCi}/\text{kg}$)、 $370 \text{ kBq}/\text{kg}$ ($9990 \text{ nCi}/\text{kg}$) となる。これらの値は充分低いリスクを仮定して計算されているので、たとえ一時的に多少超過してもすぐに急性の放射線障害にかかるといったぎりぎりの限界ではない。しかし、前

にも述べたように、西欧各国では、これよりはるかに厳しい限界を設定して、東欧からの食料の輸入を制限し、また自国内でも、一部の野菜、ミルク、卵、肉などの使用制限を一時的にせよ行った。これらの国では今後これらの対策をとったための損失に対する経済的な補償をどうするかという問題が残る。放射能のリスクと何らかの対策をとったためのリスクを充分、比較検討して決定すべきだろう。

IAEA の勧告案でも放射線の影響を推計学的影響と、非推計学的影響とに分けて考えている。推計学的(stochastic)影響とは、その重篤度ではなく、その影響の起こる頻度が推計学的方法、つまり統計学的推論から、線量の関数とみなされている影響で、厳密な数学的な意味での確率過程ではない。低線量では頻度が低く因果関係の立証が困難であるが、放射線防護の目的で、線量が低くなれば、それに比例して、頻度も小さくなるという、しきい値のない影響と仮定されている。遺伝的影響、発がん性などはこのような影響である。非推計学的(non-stochastic)影響とは、推計学的方法によらなくとも、被曝線量と身体的影響の関係が直接、推定され、その重篤度が線量の大きさと共に変わるような影響で、これ以下ならば起こらないという、しきい値がある。放射線防護という立場からは、このしきい値以下に保ち、また推計学的な影響についても、その頻度が充分に小さく、他の安全な職業に比べても、リスクが高くないような限界におさえ、一般公衆に対しては、さらに安全係数を考えている。全身均等被曝の場合の単位線量当たりの推計学的影響のリスクを r として、例えば致死的がんについて $1.25 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 、個人

の子供または孫に発現するかもしれない遺伝的影響について、 $0.4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 、この両方を合わせて、リスク係数を $r = 1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ と仮定し、また不均等な照射の場合に対しては、各組織に適切な荷重係数を仮定して、計算した実効線量当量を用いるよう勧告している。このようなリスク係数は、ある程度、統計的資料をもとにしているが、エキスパートの人為的な判断もはいており、厳密な数学的な意味での確率というよりも、放射線防護のための仮定であり、不確定さもはっきりしない。リスク係数と被曝人口をかけると、

ある数値が得られるが、実際にそれだけの影響が出るかどうかは、他の色々な要因もあり、難しい問題である。しかし、一つの数字として表すと、あたかも現実的な数値であるかのごとき錯覚を起こしかねない。

このような数値は、むしろあいまい集合論(Fuzzy Set Theory)における、あいまい数(Fuzzy Number)として、あいまいさ(Fuzziness, 非確率的な不確定さ)を明確にして取り扱うべきだろう。筆者らは放射線の長期的な医学的影響は、診断と因果関係の推定という人為的な判断やその他の不確定要因がはいてくる

ため、厳密な確率過程ではなく、むしろあいまい集合論のあいまい推論の問題として考えるべきことを主張している。

以上述べてきたように原子力安全の問題は、単なる技術的な問題というよりも、国際問題、政治、社会、経済、心理学などにも関係した重大な問題である。今後の原子力の健全な発達のためにも、国民の安全を守るための十分な事故対策を併行して進めてもらいたいものだ。

(ウィーン大学名誉教授, Division of Nuclear Safety, IAEA, ウィーンにて, 7月記)