

第4部 シベリア化学コンビナート 1993 年 4 月 6 日事故

4.0 経緯

シベリア化学コンビナート(SXK)は、核燃料サイクル生産工場を含んでいる。その目的において、基本的にロシアの核兵器総合コンビナートに属する。

シベリア化学コンビナートの建設開始は1949年で、第一工場の運転開始は1952-1955年間だった。1953年8月に最初の濃縮ウラン(U)が得られ、1955年6月28日に最初の兵器用ウランが出荷された。その後、軍用プルトニウム(Pu)生産工場が建設された。

シベリア化学コンビナートは、U と Pu を扱う巨大総合コンビナートで次を含んでいる。

- 兵器 Pu 生産用の 3 機の産業用ウラン-黒鉛炉(1990-1992 年間に全 3 基とも停止)と、2 基の 2 重目的炉で、熱と電気を生産する
- 濃縮 6 弗化ウランを得るための同位体分離工場
- 過酸化・酸化ウランと 6 弗化ウランをえるための昇華[転換]工場
- 放射化学[再処理]工場。標準型ユニットの使用済燃料が再処理され、ウランとプルトニウムの塩を得て、精製する
- 化学冶金工場で、金属ウランとプルトニウムを生産する
- 液体及び固体放射性廃棄物貯蔵所。この中には、3 つの開放型プール、2 つの鉍泥貯蔵所と 3 つの水貯蔵所が含まれる

衛生-防護ゾーンの面積は 192 km^2 で、監視区域は 1560 km^2 である(図 4.1)。



図 4.1 SXK 監視ゾーン区域 x—x—x 衛生-監視区域境界;

シベリア化学コンビナートの労働者とその家族が住む Tomsk-7(今は Seversk 市)は、人口 10 万人、トムスク州にあり、州都トムスクから北西、トム川の下流 15 km にある。

4.1 事故の原因と経過、放射能放出源

4.1.1 ウランとプルトニウムを抽出する技術の説明

1961年に運開した再処理工場の基本目的は、使用済み燃料からのPu分離で、UとPuを放射性核種と安定核種の不純物から精製することである。

最初の抽出・精製サイクルはPUREX法(Plutonium Uranium Refining by Extraction)に基づいており、第4.2図に示す。

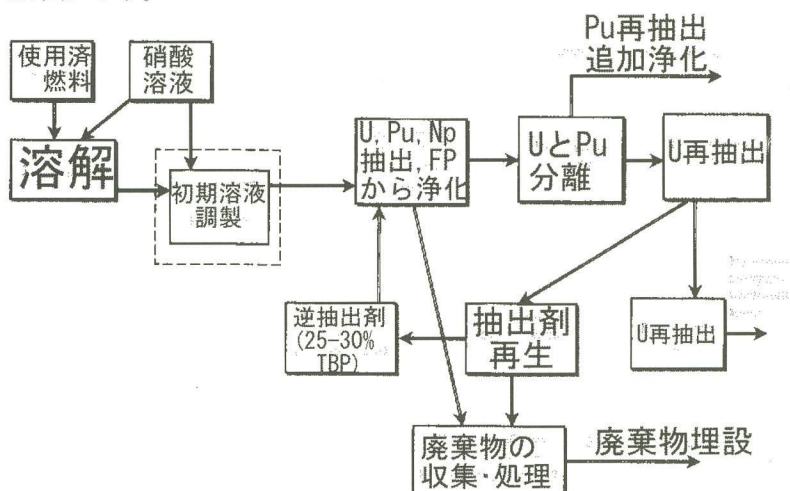


図 4.2 再処理工場の最初の抽出系統図

使用済み燃料は、溶解反応槽に入れられ、濃硝酸中で溶解される。抽出されたU、PuとNpは、硝酸溶液からTBP(tributylphosphate)により抽出され、軽い炭化水素希釈剤RJ-3中に移る。

TBPの欠点の一つは、硝酸と放射線作用により分解し、DBP(dibutylphosphate)、MBP(mono-butylphosphate)と磷酸が形成され、～特に放射性ZrやNbに対する～浄化係数が落ち、コロイド状のものが分離界面に沈着することである。

抽出剤の加水分解と放射線分解生成物が蓄積するのを掃除する為、抽出作業の後、アルカリ洗浄を行わねばならない。

長期運転後、有機相には徐々に、TBPだけでなく炭化水素希釈剤の2次崩壊生成物が蓄積してきた。それはアルカリ溶液では洗浄できず、UとPuのFP～特にRu～からの浄化係数が落ちた。このため、有機溶剤を時々反応経路から抜き、再生か、埋設した。

4.1.2 直接事故に到った設備操作の説明

1993年4月6日現地時間12時58分、再処理工場の建屋201職場No.1で、UとPuを抽出する第一サイクル機器の一つで爆発的破壊が発生した。

事故が起った機器AD-6102/2の目的は、抽出プロセスに入るための出発物質の調製だった。

機器は、鋼製容器で、容積34.15 m³、直径2.8 m、高さ6.3 m、壁厚14 mmだった。それは、直径4 m、深さ7.7 mのキャニオン(V字型)の内に置かれ、ステンレスで内張りされ、厚さ1.2 mのコンクリート遮蔽により囲まれていた(図4.3)。

技術規定[Tech.Spec.=保安規定]によれば、機器AD-6102/2における充填と溶液調製プロセスを安全に実施する為に最小限予定されていたのは、一般的な安全要求の他、次の措置だった。

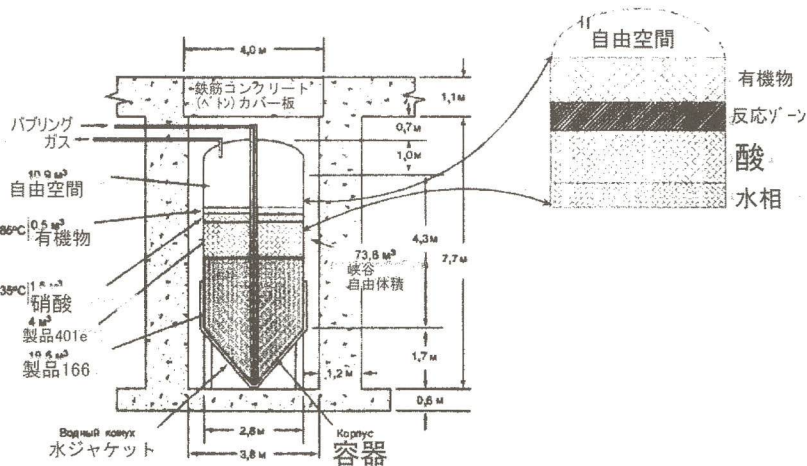


図 4.3 機器 AD-6102/2 の図面と、事故時のコロイド分布状況

- 原料となる規定濃度(90.0 g/リットル)の硝酸の調製
- 水溶液清澄槽中の有機物蓄積量チェック
- 流量 50 m³/時の圧縮空気により溶液を攪拌し、硝酸濃度と温度(40-45℃)を全体的に均一化する
- 少なくとも流量 20 m³/時の空気で常に泡立て、気体状生成物を希釈する
- 定期的に機器を完全に空にし、蓄積した有機物を除去する

最後に機器を完全に空にしたのは 1993 年 4 月 1 日だった。4 月 1 日から 6 日までの間に機器中で調製された製品の全量は 115m³ だった。破壊の日、その中には製品 401e* が 4m³ あり、それが全量 19.5 m³ の製品 166* により 2 回に分けて希釈された: 第 1 回(12m³)は 5 時 30 分、第 2 回(75m³)は 9 時 30 分で、1.5m³ の濃硝酸が加えられたのは 10 時 30 分だった。

[脚注* 簡単のため処理製品は技術文書に従い記号が付けられている: 製品 401e は高放射性生成物抽出処理後の Pu、U と Np 再抽出硝酸溶液; 製品 166 は第 1 サイクル抽出処理後の蒸発硝酸ウラン濃縮液。]

こうして、機器中には 449 g の Pu (10¹² Bq) と 8757 kg の U (1.1・10¹¹Bq)があり、β-γ 放射体の全放射能は 1.2・10¹⁴ Bq だった(表 4.1)

表 4.1 AD-6102/2 中の溶液の組成

製品タイプ	体積 m ³	濃度、 g/リットル					β-γ 放射体の全放射能* Bq/リットル
		Pu	U	HNO ₃	Th	Np	
401e	4	0.0166	37.4	94.5	0.0355	0.062	2.8・10 ¹⁰
166	12.0	0.0196	441.1	30			2.5・10 ⁸
硝酸	1.5			896			

注*1 次作業文書によれば、機器中には 2・10¹³ Bq の β 放射体があった。これは、Sr90+Y90 調整線源で校正した β 放射線測定法によるチェック結果による。表では、現実の放射性核種混合物に対する過剰校正を考慮した全放射能の評価値が与えられている。

事故後の計測器指示分析により、攪拌又は泡立てが無く、全体の攪拌が不十分だったことが証明された。検出器指示によれば、12 時に、機器 AD-6102/2 中の圧力が上がり始めていた。

12 時 40 分から 13 時 00 分までの間に引継ぎが行なわれ、別の班が当直になった。12 時 50 分頃、運転員は当直技術者に、機器 AD-6102/2 の圧力が上がっていると報告した。確認の結果、圧力は

2.0 気圧に達し、上がり続けていることが判明した。当直技術者は、隣接機器を通るラインを用いて圧力を抜くよう指示したが、この操作による目に見える結果はなかった。

4.1.3 機器 AD-6102/2 の事故破壊

12 時 55 分、機器内圧は 5.0 気圧に増加し、上がり続けた。12 時 58 分、爆発の数秒後、機器が破壊し、屋根の上に炎が見えた。

機器破損の 1-2 分後、消防隊が事故現場に到着し、屋根と機器ホールの火元は 10 分間で消し止められた。発生現場付近の目視観察によれば(キャニオンへの直接接近は、事故状況から機器ホールは天井により覆われ、又、放射能も高かったので、不可能だった)、第 1 にキャニオンを蓋う板が動いていた;第 2 にキャニオンがあった場所真上の機器ホール天井が部分的に破損しており、機器設置場所から数メートルの所で蒸気ガス混合物が空間爆発したことを証明していた。他に、通信、電動機器と照明用の電線も切れ、暖房系も壊れ、機器ホールの幾つかの場所で～特に爆発地点から対面にある～人造石材と窓枠が破損していた。

機器破損の基本的な原因は、次の状況と認識された。

- 1993 年 4 月 1 日から 6 日の間に機器中に約 150 リットルの有機物が蓄積
- 運転員による技術規定の深刻な違反:硝酸を添加する前とその後 2 時間、内容物が攪拌されなかった;抽出通過断面積が減っていた
- 機器中に劣化した溶剤があり(放射線分解や化学分解の結果)、それは環状パラフィンを多く含んでいて、硝酸とより活発に反応する化合物が蓄積された
- 機器上部の温度が下部より大幅に高く、設備で予定されていた 70℃未満での不可逆反応は不可能だった

これらの全ての状況により、危険な発熱酸化反応が進展し、有機物が硝酸によりニトロ化した*。

[脚注* 機器 AD-6102/2 における事故は、核燃料サイクル事業所における TBP と硝酸の激しい反応事例としてユニークである。文献によれば、少なくとも 4 件の類似例が確認される:

・1953 年 1 月 12 日、サバンナ・リバー事業所(米)において、uranilnitrate 硝酸溶液を蒸発中、爆発が起こり施設を破壊し、建屋を損傷した。TBP が正しくない時に蒸発器の中に落下し、爆発反応が引き起こされたことが明らかになった。

・1953 年 7 月、ハンフورد工場(米)で、uranilnitrate と硝酸の混合物を蒸発時に事故が発生した。ポンプ故障のため蒸発器内の水位が安全以下に下がり、混合物濃度が規定以上に上がった。機器の損傷は無かったが、硝酸が大気中に放出された;

・1975 年 2 月 12 日、サバンナリバー事業所において、denitrator に事故が発生した。uranilnitrate と 3 酸化ウランを溶かす時に、爆発と燃焼が発生したが、損傷は有意でなかった。要員が denitrator に注意せず TBP を入れた。

・1980 年 7 月、ポートホーン(カナダ)のウラン精製工場で、サバンナ・リバー(1953 年)と類似の事故が発生した。爆発は、蒸発器を壊し、配管を破損した。]

4.1.4 放出源の放射線及び物理-化学的パラメータ

機器の事故破壊時に大部分の放射性物質は、壁の開開口部と屋根を通して大気に到達した。

放出量評価のため 2 つの方法が用いられた。

- 事故前後の機器とキャニオンの中の放射性核種バランスによる
- 土地の放射能汚染と事故後の気象条件からの逆算

事故時の技術文書によれば、機器中には(449±120) g の Pu と(8757±286) g の U があった。機器復旧作業中に、機器 AD-6102/2 とキャニオンから(577±117) g の Pu と(8707±350) g の U が回収された。明らかに、両者の差は計測誤差を超えない。更に、破壊ゾーン中の Pu 量は事故前の機

器中含有量よりも若干多かった。この説明として、キャニオンから放射性物質回収中に、それまでの再処理工場の運転により汚染していた残留放射能も回収してしまったのだろう。このように、U と Pu のバランスからは、大部分は破損機器近くの建物内部に残ったという定性的な結論しか得られない。従って、放出放射エネルギーの評価のために、形成された放射能汚染跡における放射線状況データから放出源パラメータを再現するモデルが用いられた。

放射線状況に関する入力データとして、2 つの異なるデータ群が用いられた。

- 空間 γ 測量結果: 汚染跡を横切る 9 つの地上ルートに沿う、又、16 居住地における γ 線量率
- 120 の雪と 13 の土壌試料測定結果: シベリア化学コンビナート環境保護部隊と第 81 中央医療衛生隊産業保健ラボ、研究組織により得られ、論文発表されている。

汚染跡の放射性核種空間分布解析によれば、事故放出とその大気拡散は、次の 2 つの放出源により最も巧く記述される。

- 第 1 に、50–60 % の放射性物質が建屋壁開口部を通り放出され、高さ 15–30 m まで上昇した
- 第 2 に、40–50 % の放射性物質が建屋屋根開口部を通り放出され、高さ 100–150 m まで上昇した。事故放出量の評価結果を表 4.2 に示す。

表 4.2 事故放出量、放射能 10^{12} Bq

放射性核種	V.A.Pitkevich 他(1993)	Savkin M.N.他(1995)
全放出量*	36.7	25.2 ± 9.0
内訳:		
Ru-106	11.1	7.9
Ru-103	0.37	0.34
Nb-95	17.4	11.2
Zr-95	7.8	5.1
Ce-141	-	0.37
Ce-144	-	0.24
Sb-125	-	0.10
Pu-239	7.4×10^{-3}	5.2×10^{-3}

注* 第 81 産業保健ラボにより得られた試料の α スペクトル測定データによる。
平均の U-238/Pu-239 放射能比は 0.22 だった。

独立評価の結果は相互に近く、全放出放射エネルギーは平均を取って 3.09×10^{13} Bq、そのうち Pu-239 は 6.3×10^9 Bq としてよい。このように、大気放出されたのは、機器中にあった Pu の約 0.6 %、 β - γ 放出核種の約 25 % だった。

放射性雲が通過中にエアロゾル・サイズの直接測定は行われなかった。大気輸送モデルによる評価では、全 β - γ 放出核種と 65 % の Pu の降下速度は 0.15–0.2 m/秒で、寸法中央値 ~ 10 – 20μ のエアロゾル分布に相当する。Pu-239 の放射能の約 35 % は、より大きな寸法中央値 ~ 20 – 30 ミクロンの粒子を含み、降下速度は 0.3–0.5 m/秒の範囲にあった。

建屋 201 中の 2 次エアロゾル分布が 1993 年 5 月に調べられた。 β - γ 放射性エアロゾルの放射能分布測定によれば、粒子の寸法は対数正規分布により近似でき、中央値は $20 \pm 6 \mu$ で、分布の幾何標準偏差 $\beta g = 4.4 \pm 1.6$ だった。

移行性[transportable]成分割合は、 β - γ 放射核種で 1.6–6 %、 α 放射核種で 5–10 % だった。得られた結果により線量計算が出来る。エアロゾルは事実上完全な不溶性の放射性核種酸化物であった。

ンのβ-γ測定が終わった。これらのデータを数値積分すると(建屋 201 と液体廃棄物埋設ゾーンを除く)、この土地に降下したβ-γ放射核種の放射能が評価でき、事故当日で $1.3 \cdot 10^{11}$ Bq だった。

事故時に空気中の放射性核種濃度の直接測定は行われなかった。爆発の1.5～2時間後の空中β放出エアロゾル濃度は、破損機器近くで100 Bq/リットルだったが、別の場所では10 Bq/リットル未満だった。

更に、構造物片の除去作業中、βエアロゾルによる空气中放射能濃度は、建屋内と隣接地域で1.6 kBq/リットルまで、区画の屋根で800 Bq/リットルまでになった。

事故直後に、日例の雪解け水の汚染測定が行われ、その後は再処理工場から流れ出る雨水の汚染測定が行われた。それぞれ30 Bq/リットルと3 Bq/リットルを超えず、α核種は0.08 Bq/リットル(流出水)を超えなかった。

4.2.2 修理-復旧作業

事故の最初の時間からその影響清算まで、再処理工場における修理-復旧作業は、事故影響清算に関するスタッフにより策定された計画に従い行われた。

放射線状況、事故時作業の特徴と放射線安全を確保するため現実の条件の評価から出発し、全ての修理-復旧作業と除染を要員の計画被曝線量を上げずに～つまり、通常の慣行では年間50 mSvに設定されているカテゴリ-Aに対する線量限度を超えずに～行う原則が決定された。

要員の個人線量負荷を制限するために重要な意義を持つ数ある主な計画の中には次のものがあつた:事故局所化に関する初期措置(1993.04.06 承認)、再処理工場における安全確保に関する措置計画(1993.04.06)と建屋 201 内の修理-復旧に関する措置計画(1993.04.07)。

建屋 201 の復旧では、建築構造物の固体廃棄物を収集し固体廃棄物埋設場へ搬出し、建屋周辺の区画、道と通路と再処理工場敷地を除染し、建屋 201 周辺とその屋根からの雪を収集し溶かし、雪解け水を集め専用水路に流した。埃の発生を減らし、事故区域から汚染物の搬出を防ぐために、初期作業段階では、液体ガラス・ペースの防護-粘着被覆が用いられた。以後、これは止めて、表面除染が困難にならないようにした。

全ての作業は、複雑困難な放射線条件下で作業を実施する際に用いられる指示-許可システムに従い組織化された*。

[脚注* 指示-許可システムでは、作業を安全に行うため課題レターを用いる。そこに示されているものは次の通り:作業内容、場所、その実施時間、必要な安全措置、装備目録、部隊編成、安全作業実施に責任を有する個人]

表 4.4 再処理工場における放射線安全確保に関する措置のリスト

作業名	実施期間
指示により働く要員の汚染確認:消防士含む	4月6日
汚染区域を囲み、人々を出す	遅滞無く
爆発時の人々の配置確認	4月6日
要員の WBC による組織的検査	4月6-7日
現地状況の放射線測定評価	
爆発後	4月6-7日
毎日	常時
被害ゾーン中の電源設備と計測制御系の状況確認	4月6-7日
要員と防火設備の保健処理と除染	4月6日より(平常になるまで)
自動車道のチェック	常時
線量測定と事故警報の妥当性検証	4月6-7日
区画、施設、土地、屋根の除染計画調整	4月7日
直毎の用水路、職場専用水路の水のチェック	常時

事故作業参加者の放射線安全性確保に関する主な措置のリストを表 4.4 に示す。

事故清算作業の放射線安全確保に関する総合措置の中で、重要な位置を占めたのが要員の個人防護だった。修理・復旧作業では、典型的には、次の個人防護装備が採用された。

- 基本及び補足の専用服と専用靴
- 個人防護装備:呼吸器(呼吸機 ShB-1、「Lepestok-200」又は「Astra-2」)、手(レジンと木綿紙の手袋、ミット)と目(防護眼鏡、盾板)
- 予防的な装備(安全帯、防護帽と下に被る頭巾)

それぞれ具体的な場合における総合防護措置の選択は、場所、実施作業の特性と作業の環境条件を考慮し行われた。

4.2.3 要員の被曝線量

事故に関連して被曝した要員の総数は 1946 人だった。

この個人集団は 3 つに分けられる。

1. 事故体験者-160 人。事故破損時に建屋 201 に居た(125 人は再処理工場技術要員;29 人はシベリア化学コンビナート建設組織、6 人は軍人)
2. 消防士-20 人。爆発の 1-2 分後に到着し、10 分間で火元を消した
3. 1993 年 4 月 6 日から 8 月 1 日までの事故影響清算参加者-1920 人(事故体験者からの 154 人を含む)。内訳:再処理工場-1185 人、シベリア化学コンビナート機械修理工場-139 人、シベリア化学コンビナート他部門 388 人、建設組織-208 人

外部γ線

機器 AD-6102/2 破損時に近くには 3 人の建設組織労働者と一人の衛士が居た(図 4.6)。残りの人々は、機械ホールに隣接したかなり離れた区画に居た。体験者は全て、規定の特殊服を着ていた(白服カバーオール、上下連結作業服、帽子と特殊靴)。

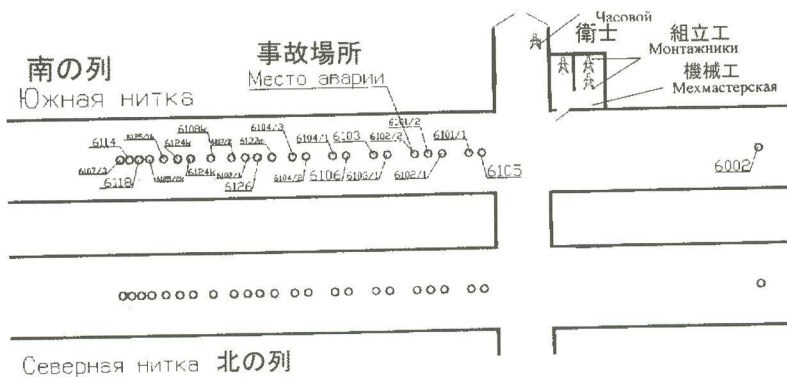


図 4.6 建屋 201 内事故時の要員位置

機器破損とガス爆発時に、線量警報が作動した。放射線事故発生時の要員防護措置計画に従い、建屋 201 に居た全労働者に通知され、きれいな区画に集められた。事故を知ると直ちに要員は、作業場所近くに保管されていた個人呼吸器防護装備(「Lepestok」型)を付けた。事故体験者に外傷や不慮の事故はなかった。

再処理工場指導部より、初期作業に従事しない要員は、工場敷地を離れるよう指示が出た。

事故体験者の個人線量管理データによれば、IFKU 型線量計の感度限界 0.2 mGy を超え被曝したのは 6 人だけだった。彼らに対する個人線量値は 0.2 から 0.5 mGy の範囲にあった。

消防士の外部被曝個人線量測定管理は、IKS-A 型 TLD を用い行われた。総員(20 人)のうち、感度限界 1 mGy 未満は 6 人、残りは 1 から 7 mGy の線量を受けた。消防士の平均個人線量は 4 mGy だった。

4 ヶ月間の個人線量管理結果から事故影響清算参加者の被曝線量を分析すると、平均個人線量は 4.64 mSv だった。1920 人に対する外部 γ 線による集団線量は 8.91 人 Sv。その内、再処理工場の同僚 1185 人分は 5.85 人 Sv だった。

シベリア化学コンビナート各組織の、外部 γ 線の被曝線量範囲に対する人数分布を、表 4.5 と図 4.7 に示す。

表 4.5 外部被曝線量範囲に対するシベリア化学コンビナートと側面組織の要員数分布

区分 人数	線量範囲、 mSv				
	15 まで	15-25	25-40	40-50	50 超
再処理工場	1043	95	39	8	-
他部門	375	13	-	-	-
機械修理工場	137	2	-	-	-
建設組織	189	12	5	2	-

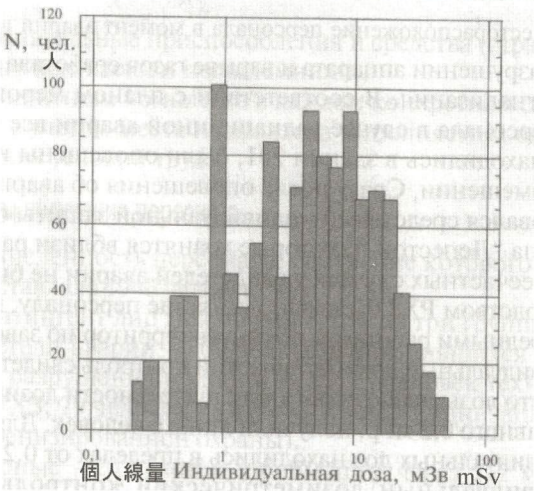


図 4.7 再処理工場と他の組織の労働者(最初の 8 ヶ月、1993 年、1204 人)の外部 γ 線線量分布

明らかに、放射線安全規則に規定されている、通常作業に関する要員に対する基本的な線量限度(50 mSv/年)超過はなかった。

外部 β 線

チェルノブイリ原発事故影響清算経験は、事故施設復旧作業時の外部 β 線の意義を証明している。しかし、チェルノブイリ原発事故前と同様、その後も、個人 β 線量計は、ロシアの原子力事業所には導入されていない。従って外部 β 線量評価のために、計算法が用いられた。これは点線源からの空間への影響関数の積分によるもので、無限均質組織等価媒体中での線量分布を記述する。

β 線と γ 線量の比は、事故清算者の顔の皮膚、水晶体と生殖腺に対し計算された(表 4.6)。

コメントすべきこととして、顔の皮膚、水晶体と生殖腺の β 被曝は事実上 Ru-106 と娘核種

表 4.6 事故後初日の作業場所における β 線と γ 線量率の比

作業実施場所	β/γ 線量率比		
	顔の皮膚	水晶体	生殖腺
再処理工場敷地	5.7	1.1	0.7
建屋 201 屋根	15	3.0	1.6
機械ホール	21	4.0	2.1
連絡廊下	27	2.9	0.6

Rh-106 により規定された。それらの γ 線量への寄与は約 10 %に過ぎなかった。

器官と組織の外部被曝線量とその線量当量を計算すると、 β 線の外部被曝実効線量に対する寄与は、敷地での作業で 9%、建屋 201 屋根、廊下と機械ホールでの作業で約 20%だった。

吸入 β - γ 核種による内部被曝

要員の生体中の放射性核種含有量測定はホールボディカウンターWBC を用い行われ、その最小検出放射能は Ru-106 と Ru-103 で 1.11 kBq、Zr-95 で 1.48 kBq、Nb-95 で 0.74 kBq、誤差 $\pm 30\%$ だった。1993 年 4 月から 8 月まで 732 人が測定され、そのうち 296 人が再処理工場労働者だった。

内部被曝で最も重要な核種は Ru-106 である。その最大許容量を超える含有量が見つかったのは再処理工場の同僚の 15 人(約 5 %)で、最大値は 20 kBq だった。これは、再処理工場労働者の 95 %の Ru-106 摂取による期待実効線量は 0.7 mSv 未満だったことを意味する。また 7 人では、Ru-106 による肺に対する線量当量が、最大 15–30 mSv で、実効線量は 3 – 9 mSv だった。

もし内部被曝線量分布が対数正規分布で幾何標準偏差 $\beta g = 3$ なら、分布の算術平均値は 0.3 mSv となる。このように β - γ 核種摂取による実効線量は、外部被曝の約 5 %になる。

Pu 摂取による内部被曝

事故影響清算参加者の Pu 吸入摂取時の被曝線量は、2 つの方法により評価された。

- 事故前の年々に生物物理ラボで行われた尿中の Pu 放射能測定結果の、事故後との比較
- 計算による推定方法。作業場所の Pu-239 と Ru-106 の比から出発

事故の 7 年前に第 1 の方法により測定された 80 人のデータによれば、Pu-239 の含有量に有意な差は見つからず、事故摂取量の評価は出来なかった。

第 2 の推定方法によれば、事故影響清算作業場所の空気中の Pu-239/Ru-106 比は $0.7 \cdot 10^{-3}$ で、Pu-239 摂取による肺に対する実効線量の平均値は 1.6 mSv と評価され、線量当量 0.2 mSv に相当する。

全ての放射線作用要因による実効被曝線量

個々の被曝構成要素の分析によれば、主な放射線作用要因は、事故体験者でも事故影響清算参加者でも、外部 γ 線だった。この線量構成要素は、全員に対する個人線量管理により十分正確に測定され、平均 4.64 mSv だった。

残りの線量構成要素の外部 γ 被曝に対する比は、次のように評価される。

～20 %－身体露出部の外部 β 線

5 %－ β - γ 核種からの内部被曝

3 %－Pu-239 摂取による内部被曝

このように、平均個人線量は 5.85 mSv で、全期間に対する事故清算参加者の全集団線量は 11.2 人 Sv となった。

4.3 環境の放射能汚染

4.3.1 放射能痕跡の説明

事故放出による放射能痕跡は、安定した風速 8–13 m/秒の南西(190–210°)風の時に形成された。放射能は安定した積雪の上に降下した。雪は場所によって数 m の厚さに達していたが、5 月中旬には完全に溶けた。放射能跡の様相は、図 4.8 に示すルートに沿う地上放射線探査データから得られた。明らかに痕跡はシベリア化学コンビナートから北東に向かって延びている。約 7 km の所から東に転じたが、Georgievka 村に向かい北に転じた。居住地 Nadejda 村の南西と、Georgievka 村の北に面積 1 km² ほどの照射線量率の高い～それぞれ 100 と 50 μ R/時以上「染み」が 2 つ形成された。跡の残りの地域にも、面積 100–150 m² で、照射線量率と β 線束が平均値の 5–7 倍ある局在化した染みがあった。

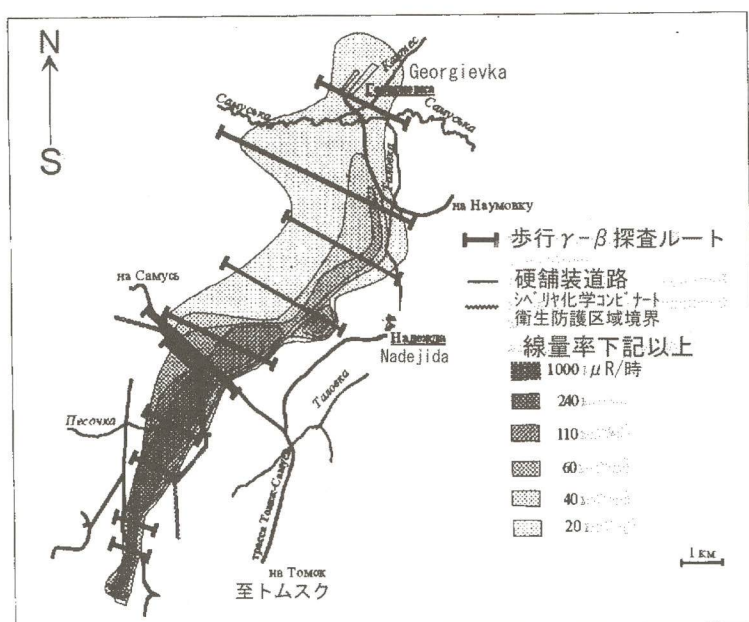


図 4.8 痕跡の γ 線量率等高線(1993.05.13 現在)

土地汚染の特徴は、～小面積(1m² 未満)においてすら～非均質性だった。これは放射能 10⁵ Bq までの「ホット」粒子の存在と関連している。例えば Georgievka 村付近のそういう粒子の密度は 400 /m² と評価された。雪試料の浮遊成分と水溶成分を分けてスペクトル測定すると、放射能の約 90 %は浮遊成分側にあった。

距離 3.5–7 km の所で痕跡を横断すると、照射線量率と放射性核種汚染密度には 2 つのピークがあった(図 4.9)。これは、放射性雲の上昇高さそれぞれ 30 と 150 m で、風向がそれぞれ地表 (190°) と 100–200 m 高さ(210°)という、2 つの跡の重なりとして説明される。

事故発生時から半年間、放射能痕跡地域では、様々な機関と部門により、300 以上の土壌と雪の試料が採取され分析された。その結果、核種組成は、Pu-239 (放出源に近くなると 2 倍になる)を除き事実上、再処理工場からの距離に依存しないことが確認された。シベリア化学コンビナート敷地外の放射能汚染面積と、痕跡境界内の降下核種組成に関するデータを表 4.7 と 4.8 に示す。

表 4.7 事故後様々な時点における放射能汚染面積、 km^2

照射線量率範囲、 $\mu\text{R}/\text{時}$	1993.04.06	1993.05.13**	1993.07.15	1993.10.12	1994.05.18
20 以上*	43.4	33.0	28.5	13.1	-
20-40	21.0	23.0	20.0	10.7	なし
40-60	10.5	5.0	6.3	2.2	同上
60-110	7.4	3.0	1.6	0.2	同上
110 超	4.5	2.0	0.6	なし	同上

* $15 \mu\text{R}/\text{時}$ の等高線内の初期放射能痕跡面積は、ロシア気象庁測定によれば、 89 km^2 だった。

** 1993.05.13 の測定による計算評価値。

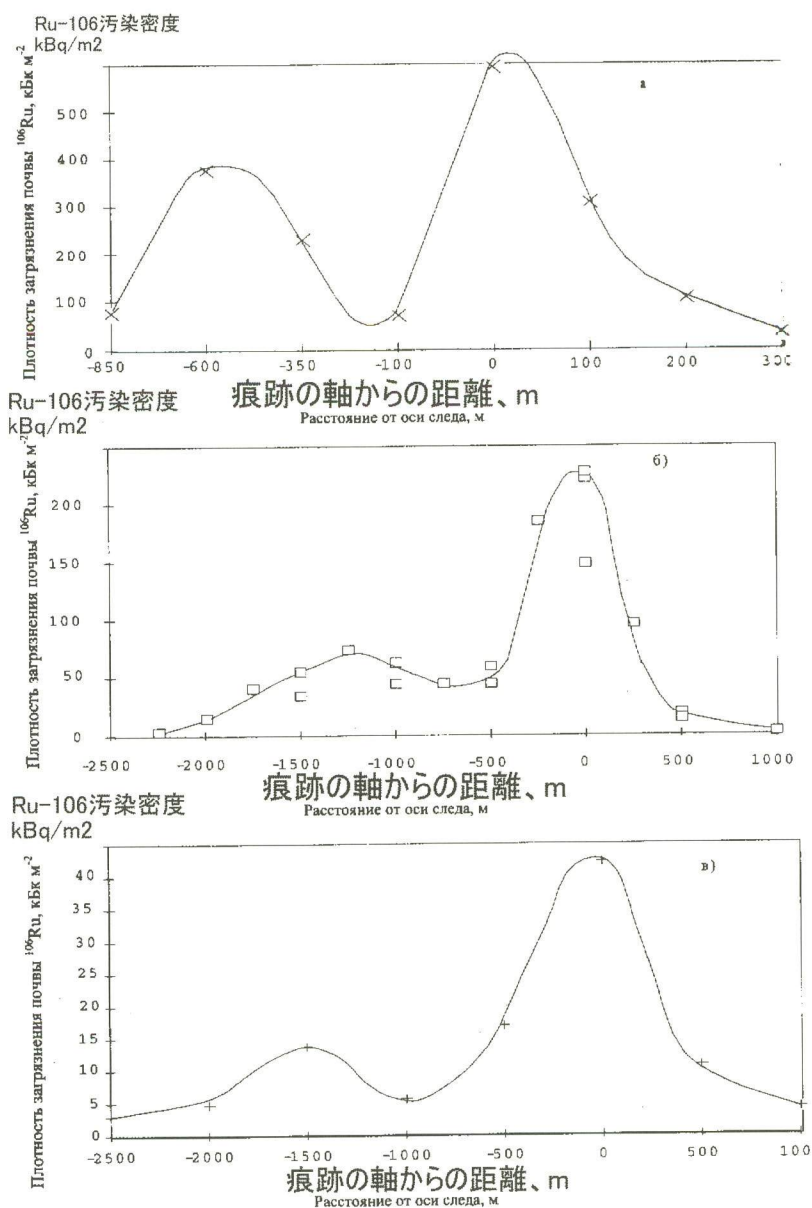


図 4.9 跡の軸横断方向の Ru-106 土地汚染密度: (1993.04.06 現在) 再処理工場からの距離 4.5km (a)、7.0km (b) と 12.0km (c)

表 4.8 事故痕跡降下物の核種組成、1993.04.06 現在

放射性核種	Zr-95	Nb-95	Ru-103	Ru-106	Sb-125	Ce-141	Ce-144	Pu-239
核種組成、%	20.4	44.0	1.4	31.4	0.4	1.5	0.9	0.01

強調すべきこととして、放射能跡の $20 \mu\text{R}/\text{時}$ の外部境界は、(トムスク州測候所データによる天然バックグラウンド $6-15 \mu\text{R}/\text{時}$ と比べ) 有意な土地汚染だけを分離するという要求だけから出発し設定された。この外部境界における開放場所の γ 線量率を最初の 1 年間積分すると 0.2mGy となった(天然バックグラウンドを差引)。これは、我が国や国際的な放射線事故時の介入指針値より大幅に小さい。図 4.8 から判るように、等高線 $240 \mu\text{R}/\text{時}$ (1993.05.13 現在) は、開放場所ではほぼ年間線量率 5mSv に対応するが、完全にシベリア化学コンビナートの衛生防護区域内にある。しかしそれでも、住民の放射線防護措置の計画時には、シベリア化学コンビナートの保全区域外の全地域は事実上、事故時介入の対象として扱われた。

4.3.2 環境物の放射能汚染

環境物の放射能汚染レベルが低く、放射性崩壊も比較的速かったので、事故放出放射性核種の移行に関する有意なデータを得ることは出来なかった。Pu-239 の挙動観察は余計に困難だった。と言うのは、跡地域の Pu 全蓄積量の 90 % 以上は、以前の降下によるもので、この事故によるものではなかったから。そこで下に、事故時放射線管理の自然界に対する結果と、主な環境物汚染の予測評価を示す。

大気

シベリア化学コンビナートの 9 個の定置放射線管理ポストでは、フィルタ-換気施設によりエアロゾルが連続採取されているが、2 つだけが事故放出雲が拡散するセクタにあった(図 4.1 と図 4.8 参照)。空気試料から Nb-95 が記録された: シベリア化学コンビナート敷地では $1.5 \cdot 10^{-3} \text{Bq}/\text{m}^3$ (4 月 6 日 12:00-4 月 7 日 11:00) と $3.3 \cdot 10^{-4} \text{Bq}/\text{m}^3$ (4 月 7 日 11:00-4 月 8 日 12:00); Naumovka 村地域で $3.3 \cdot 10^{-5} \text{Bq}/\text{m}^3$ (3 月 30 日-4 月 7 日)。他の放射性核種の濃度は検出限界より低かったようだ。4 月 9 日からは空気中の Nb-95 濃度も検出限界未満となり、定置ポストは、毎日試料採取から、通常運転体制に移行した。

ロシア気象庁の放射能測定観測所網は、事故地点から大気塊が輸送された軌跡の方向に配置されていたが、 γ -バックグラウンドの増加や、空気と降下物試料中の放射能変化が記録されたところは一つも無かった。これも事故の局所的性格を証明している。

1993 年 5 月、積雪が溶けた後、跡の軸上でエアロゾルが採取され、放射能が測定された: 事故場所から 7 km の距離で: γ 放射核種 $0.16 \text{Bq}/\text{m}^3$; Pu-239 で $3.7 \cdot 10^{-4} \text{Bq}/\text{m}^3$; 16 km の距離で (Georgievka): Pu-239 で $3.5 \cdot 10^{-5} \text{Bq}/\text{m}^3$ 、他の核種に対しては記録限界以下。

このように、2 次風吹き上げ係数は $2 \cdot 10^{-7}/\text{m}$ と評価され、これはチェルノブイリ原発付近で事故の 1-2 ヶ月後に得られたデータと良く一致している。

表層水

放射能跡は、Samus'ka 川~Tom'川の支流への集水域の一部にあった。そこにある放射性核種量の評価値は次の通り: Zr-95 が $(3.5-3.9) \cdot 10^{12} \text{Bq}$ 、Nb-95 が $(7-7.8) \cdot 10^{12} \text{Bq}$ 、Ru-106 が $(6.1-6.6) \cdot 10^{12} \text{Bq}$ そして Pu-239 が $(2.0-2.5) \cdot 10^9 \text{Bq}$ 。

雪解け期の放射性核種洗い出し予測が、気象庁専門家により行われ、チェルノブイリ事故後開発され Cs-137 に対し適用されるモデルが用いられた。ここで Ru-106 と Cs-137 の移行メカニズ

μは同一と仮定された。水と相互作用する時に含まれる放射性核種は土壌層と吸着平衡状態となり、それは分配係数により特徴付けられる。この係数は水の体積(表層流出層 10.8 cm)と土の体積(相互作用層約 1 cm)に依存する。

β - γ 核種の水溶相の洗い出し係数を保守的に評価し、分配係数を 200 とすると、5 %となった。Pu-239 に対しては 1 %だった。固体相中の洗い出し係数は全ての核種に対し 0.3 %を超えなかった。より現実的に洗い出し係数を評価すると、少なくとも 1 桁は低くなるので、交換形態にある放射性核種の割合は、負可逆的に吸着されている割合の 1-5 %に過ぎなかった。

このように雪解け水による放射性物質の Tom'川中への洗い出しは $(7-19) \cdot 10^{10}$ Bq を超えなかった。ここで、雪解け水が通る期間、Samus'ka 川の底は氷で覆われており、底堆積物の汚染が防止された。これについては、一連の底堆積物試料のスペクトル測定分析が証明している。1993 年 6-7 月に Samus'ka 川河口で採取された試料からは、事故起源の放射性核種は見られなかった。

森林

シベリア化学コンビナート境界外の放射能跡面積の 90 %以上は針葉樹林で、主に松、杉と樺(高さ 10-12 m)である。針葉と根に降下した物質の核種組成は、事実上、雪や土壌と変わらなかった。針葉に対する放射性核種の維持係数は $(2.9 \pm 2.1) \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{kg}$ だった。この地域に対する特徴的な森林面積と植物体体積を考慮し、降下物の 25-30 %が樹冠に降りたと評価された。

農地

放射能跡に入る農地は、農業企業「Sibiryak」の土地で、中心は Naumovka 村にあった。汚染したのは 743 ha の耕地、248 ha の草刈地と 139 ha の牧場だった。

耕地は、殆ど飼料穀物生産用である。平均穀物収穫量は 1.5 t/ha。草刈場と牧場は、基本的に耕されない。年間の草刈量は 3 t/ha、牧場からの家畜肥育用に刈る緑色植物の量は年間 15 t/ha である。飼料用穀物の一部は外販される。農地から得られる残りの飼料は、現地の乳牛(約 350 頭)の飼料になる。年平均ミルク生産量は 1000 t。乳製品は殆ど地域住民に販売される。

放射能跡ゾーンにある農地の平均表面放射能は 4 月中旬で $40-120 \text{ kBq/m}^2$ で、個別例では 240 kBq/m^2 に達した。この時期の農地での外部線量率は $25-30 \mu \text{ R/時}$ を超えなかった。ここで、事故降下物は積雪の上に降りたので、事故後初年目の植物製品の汚染は、殆ど根からの経路によった。

知られているように、土地汚染に主に寄与している放射性核種の特徴として、動植物製品への移行係数が低かった。評価に寄れば、植物製品(緑の植物体、干草、飼料用穀物)中の放射性 Zr、Nb と Ru の含有量は、摂取時(放牧、草刈、収穫)で、 3 Bq/kg に達しなかった。これらの飼料を用い生産された畜産品中の放射性核種含有量は 5 Bq/kg を超えなかった。

4.4 住民被曝線量

放射能跡の境界内にある唯一の居住地となったのが Georgievka 村で、そこには 73 人が定住し、うち 18 人が 17 歳までの子供だった。住民の構成を図 4.10 に示す。

村には、38 の自留地があり、それは住居、家畜小屋、果樹菜園を含んでいる。家は、純木造、1 階建、面積は各 $25-40 \text{ m}^2$ である。給水は、噴水井戸。自留地の緑地面積は 36.3 ha、そのうち菜園は 26.5 ha である。住民は家畜を持っている。1993 年夏には、38 頭の乳牛～そのうち 15 頭が乳を出していた～、71 匹の豚、22 匹の羊と 3 頭の馬が居た。

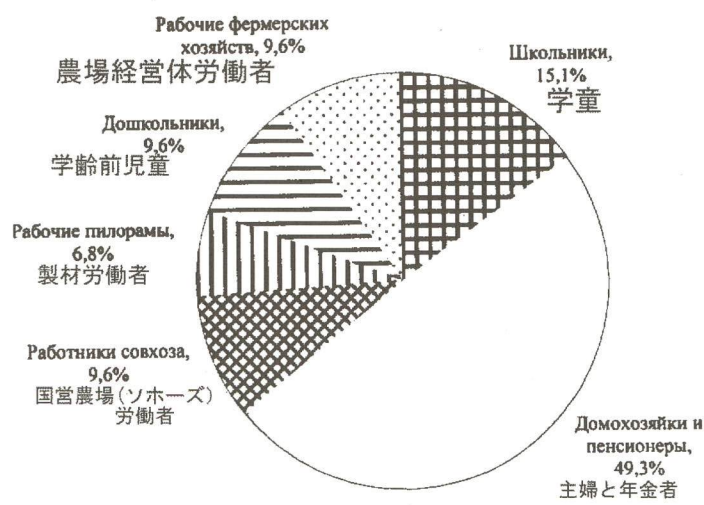


図 4.10 Georgievka 村の住民の構成

表 4.9 Georgievka 村の定住民と一時的住民による現地産品の平均摂取量

製品	住民カテゴリー	
	定住	一時
ミルクと乳製品、 リットル	740	-
肉、 kg	60	-
じゃがいも、 kg	440	440
野菜、 kg	170	170

事故前の Georgievka 村には定住民の他、春-夏期(5-8 月)に一時的に～町と隣接する Naumovka 村の住民で、Georgievka 村に別荘と菜園を持っている～95 人が住んでいた。

Georgievka 村の定住民と一時的住民による現地産品の平均摂取量を表 4.9 に示す。

放射性雲は、事故爆発の 20-30 分後、Georgievka 村に達した。降下実効時間(雲の移動時間)は約 30-40 分だった。村地域を雲が通過した期間、学童を除く定住民の殆どは、農作業をしていた。

1993 年 4 月 6 日の後半村に居たシベリア化学コンビナート地上放射能測定グループのデータによれば、Georgievka 地域の外部線量率は事故後 6-15 μ R/時(この地域のバックグラウンド値)から 30-60 μ R/時まで上がった。現地の外部線量率の変化を図 4.11 に示す。 β 粒子線束は 30 から 3000 粒子/cm² 分だった。

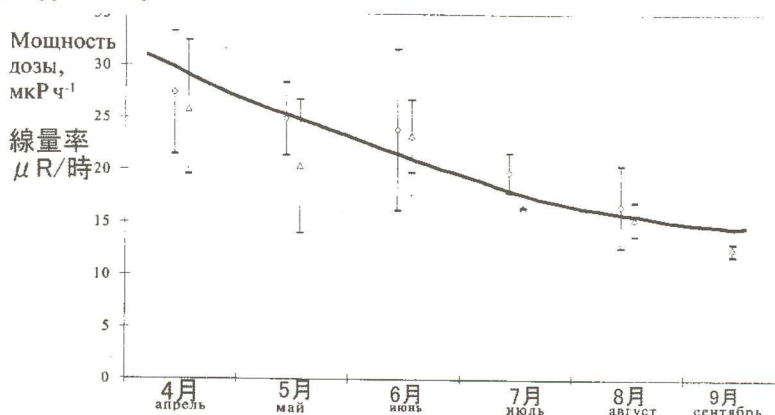


図 4.11 Georgievka 村の開放場所の γ 線量率の変化、 μ R/時

Georgievka 村地域の放射性核種による汚染を測定するため、事故後期間中に 70 以上の雪と土壤試料が採取され分析された。試料中には、Cs-137、Sr-90、Zr-95、Nb-95、Ru-103、Ru-106、Ce-141、Ce-144 と Pu-239 が見つかった。

雪と土壤試料のデータと事故前の降下物データを対比し、Cs と Sr による土地汚染は、全地球的な降下物と多年のシベリア化学コンビナート移動によると確認された。この他の γ 放射核種による汚染は、事故放出の結果である。Pu 汚染は、10 %以下が事故放出による。つまり、大部分の汚染は多年に及ぶシベリア化学コンビナートの活動による。全体として、事故放出による村への降下物の核種組成は、シベリア化学コンビナート境界外の他の跡地への降下物と変わらなかった。表 4.10 に事故放出による村の土地の平均汚染密度を示す。

表 4.10 Georgievka 村地域に内する事故放出放射性核種による土地汚染密度

放射性核種	Zr-95	Nb-95	Ru-103	Ru-106	Ce-141	Ce-144	Pu-239
汚染密度、kBq/m ²	24	54	1.4	30	1.1	1.1	0.015

田舎の地所レベルでは、汚染は比較的均質で、差は 2 倍を超えなかった。しかし、非常に小さい寸法の区画レベルでは 100 倍の差が発生していた。地面に放射能の高い染みや点が存在し、非均質性が見られた。

時の経過による外部線量率の低下は、放射性崩壊に対応するもので、他に大きな要因は無かった(放射性核種沈降、除染実施、等)。例外が見られたのは、菜園の外部線量率の変化で、そこでは 5－6 月には低下が速かった(～2 倍)。これは、土壤の深耕による放射性核種の埋め込みと関係している。

住民の居住区画、私物と皮膚の放射線管理によれば、土壤からこれらの物体への放射性核種移行係数(「物体の表面汚染密度」/「村の土地汚染密度」の比)は：履物 $3.2 \cdot 10^{-2}$ 、衣服 $1.5 \cdot 10^{-2}$ 、床 $0.9 \cdot 10^{-2}$ 、肌着とシーツ $0.7 \cdot 10^{-2}$ 、皮膚 $0.5 \cdot 10^{-2}$ だった。これらの値は、チ原発事故後放射能汚染ゾーンにあった居住地で得られた類似の係数値に近かった。

事故放出による 1993 年夏-秋期中の食品中放射能濃度は $0.2 - 1.0 \text{ Bq/kg}$ ～衛生防疫監視局で用いられている標準手法の感度限界～未満だった。一括試料(重さ～10 kg)の γ スペクトル測定(Ru-106 と Cs-137)と放射化学(Sr-90、Pu-239)分析結果を表 4.11 に示す。

表 4.11 Georgievka 村産のミルクとじゃがいも中の放射性核種含有量

製品	放射能濃度、Bq/kg			
	Ru-106	Cs-137	Sr-90	Pu-239
じゃがいも	0.23	0.49	0.10	$3.9 \cdot 10^{-3}$
ミルク	0.061	1.36	0.16	$3.5 \cdot 10^{-3}$

事故後初年の被曝線量評価に際しては、人体に対する次の被曝経路が検討された。

- 放射能雲が居住地上空を通過する時の放射性核種からの外部被曝
- 地上に降下した放射性核種からの外部被曝
- 放射性雲通過時と 2 次風巻き上げの結果、大気地表層に含まれる放射性核種の吸入摂取
- 汚染食品の摂取

Georgievka 住民の様々な職業および年齢グループに対する事故後初年の平均被曝線量評価値を表 4.12 に示す。これから判るように、放射線作用を決定する要因は土壤の上に降下した放射性核種からの外部 γ 線である。

等価線量合計に対する外部被曝の寄与は、住民の様々な職業・年齢集団に対し 75－85 %であ

る。事故後初年の主な線量形成核種は Zr-95、Nb-95 と Ru-106 だった。

内部被曝線量は、90 %以上が主に Ru-106 と Pu-239 の吸入により形成された。ここで放射性雲通過時の放射性核種吸入摂取からの線量への寄与は、2 次風巻上げによる摂取からの年間線量の約 4 分の 1 である。

事故前期間の現地産物中の Pu-239 含有量についてのデータがないので、事故放出による追加汚染の信頼出来る評価は出来ない。そこで上限評価として、現地産物の Pu-239 放射能(表 4.11)の経口摂取による内部被曝を評価した。しかしここまで譲っても事故放出放射性核種の経口摂取による線量は、全等価線量の 1 %未満で、食餌からの Sr-90 と Cs-137～事故放出中にはない核種～による内部被曝の 6 %でしかない。

表 4.12 事故後初年に対する Georgievka 村住民の実効被曝線量
(防護措置を考慮しない期待線量－1 行目、及び、それらを考慮した実際の線量－2 行目)

職業一年 年齢集団	人 数	個人線量構成成分、 mSv								集団 線量 10-3 人 Sv
		外部γ線		内部被曝				外部 β線	全等 価線 量	
				吸入		経口				
		放射性雲	降下物	放射性雲	風巻上	ミルク	ジャガイモ			
・年金生 活者	36	2・10 ⁻⁵	0.237	0.009	0.035	1.8・10 ⁻⁴	2.8・10 ⁻⁴	0.023	0.30	11.0
		2・10 ⁻⁵	0.222	0.009	0.033	1.3・10 ⁻⁴	-	0.022	0.29	10.3
・子供(学 年齢)	11	-	0.212	-	0.042	2.0・10 ⁻⁴	5.0・10 ⁻⁴	0.013	0.27	2.9
		-	0.092	-	0.038	1.3・10 ⁻⁴	-	0.006	0.14	1.5
・子供(学 年齢前)	7	2.5・10 ⁻⁵	0.262	0.008	0.031	4.3・10 ⁻⁴	1.3・10 ⁻³	0.017	0.32	2.2
		2.5・10 ⁻⁵	0.108	0.008	0.029	2.9・10 ⁻⁴	-	0.007	0.15	1.1
・製材労 働者	5	2・10 ⁻⁵	0.312	0.009	0.035	1.8・10 ⁻⁴	2.8・10 ⁻⁴	0.011	0.37	1.8
		2・10 ⁻⁵	0.293	0.009	0.033	1.3・10 ⁻⁴	-	0.010	0.35	1.7
・農業労 働者	7	-	0.101	-	0.023	1.8・10 ⁻⁴	2.8・10 ⁻⁴	0.011	0.14	0.95
		-	0.095	-	0.022	1.3・10 ⁻⁴	-	0.010	0.13	0.9
・農場企 業労働者	7	2.5・10 ⁻⁵	0.266	0.009	0.035	1.8・10 ⁻⁴	2.8・10 ⁻⁴	0.023	0.33	2.3
		2.5・10 ⁻⁵	0.247	0.009	0.033	1.3・10 ⁻⁴	-	0.022	0.31	2.2
平均		1.6・10 ⁻⁵	0.23	0.007	0.035	2.1・10 ⁻⁴	3.0・10 ⁻⁴	0.019	0.29	
合計	73									21.2

Georgievka 村の定住民の事故後初年に期待される集団線量は、防護措置を考慮せず、0.0212 人 Sv と評価され、一時住民は 0.0072 人 Sv と評価された。

予測として、放射性崩壊を考慮するだけで、2 年目には外部γ線は 6.4 分の 1 に下がる;風巻上げによる放射性核種の吸入摂取は更に 50 分の 1 に下がる;食餌からの放射性核種の経口摂取は、土壌－ミルクと土壌－根菜間の移行係数が事故後初年と同じ条件で、1.5－1.9 分の 1 に下がる。

このように、事故から 2 年目の個人の实効線量は、こういう保守的な前提で、Georgievka 村の様々な住民カテゴリーに対し 0.016－0.049 mSv と評価される。つまり、天然バックグランド放射線による被曝線量の 1 桁の%である。

4.5 防護措置と効果

4.5.1 事故影響清算に関する作業組織

シベリア化学コンビナートにおける放射線事象は、ソ連崩壊後初めての、放射線緊急事態発生時に防護と対策をするロシアのシステムの深刻な実験だった。1993 年 4 月 6 日、ロシア緊急事態委員会付属の委員会が設けられ、シベリア化学コンビナート敷地外の放射線状況運解明と事象影響清算に関する作業が組織化され管理された。4 月 7 から 13 日までこの委員会は V.A. ウラジミロフ議長の下で、事故地区において職務を果たした。

この他、原子力省令 No.241 により 1993 年 4 月 7 日から、E.I.ミケリンの下に省庁間委員会が設けられ、事故の原因調査とシベリア化学コンビナートの事故施設自身の影響清算に関する作業を管理した。この委員会の仕事は、直接シベリア化学コンビナートにおいて 4 月 8 から 17 日まで続いた。

こうして、運用上の最初の決定と行動は、4 月 6 日に、シベリア化学コンビナート、「緊急生体医療」連邦管理部第 81 中央医療衛生部、及び、州の緊急事態スタッフと民間防衛軍の部隊により行われた。

図 4.12 に、事故対応に責任のある現地部門の実際の通報体制と放射能状況に関する運用情報受領体制を示す。明らかに、1 次通報は(シベリア化学コンビナートを除き)事故の 1-2 時間後で所定の通報体制より若干遅れた;より詳細な情報は 5 時間後に州行政庁の評議会に提出された;住民に事故について知らされたのは 7 時間後だった。

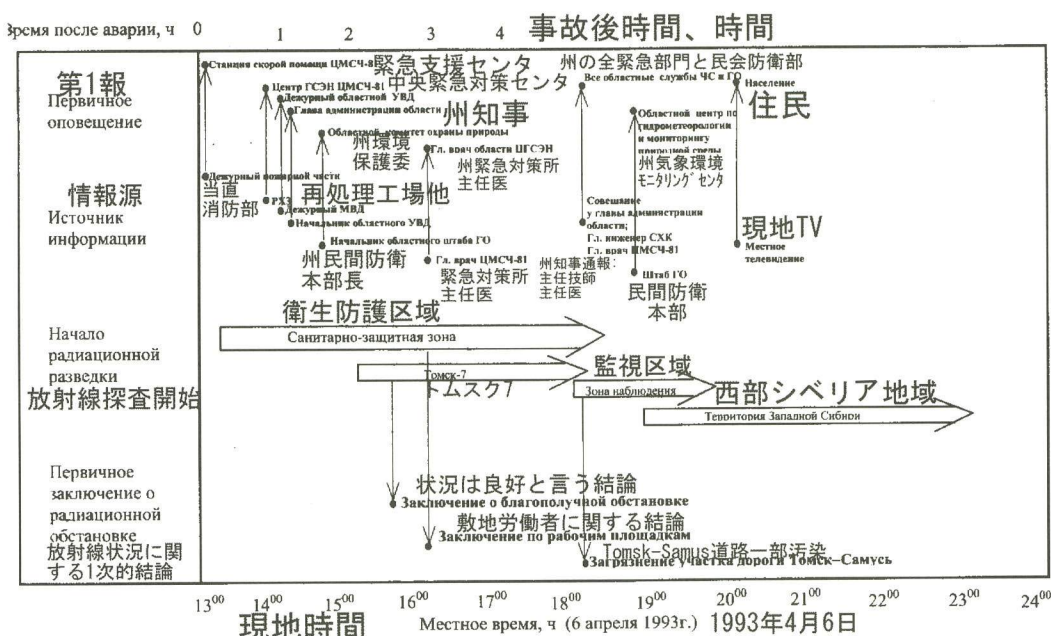


図 4.12 事故後 1 日間における通報と放射線調査の組織体制

Tomsk-7 の放射線状況が良好と言う結論は事故の 2.5 時間後に得られた。シベリア化学コンビナートの衛生-防護ゾーン外の放射能汚染ゾーン境界が設定されたのは事故翌日現地時間 16:00 だった。

4.5.2 防護措置実施のための指針

事故時点において、シベリア化学コンビナートにおける原子力産業施設監視ゾーン内の住民被曝制限は、通常運転時には、被ばくのおそれのあるグループの人々に対する次の 3 つの臓器群に対する年間線量当量限度に基き規制されていた。

群Ⅰ—全身、性腺と骨髄 — 5 mSv/年

群Ⅱ—群ⅠとⅢに属さない筋肉、甲状腺他の器官 — 15 mSv/年

群Ⅲ—皮膚、骨組織、手首、前膊、脛、足裏 — 30 mSv/年

これらの上限設定に基き、線量率、粒子束、皮膚・衣服と表面汚染、呼吸器と消化器系を通じての様々な放射性核種摂取、それらの空気中濃度の許容限度が基準化されていた。各個別の場合には、住民に対し作用している放射線状況と人間に対する影響の特徴を考慮し、上述の線量限度を超えないよう、全権国家機関が様々な放射線状況パラメータの管理レベルを規制し設定できた。

事故が発生し、住民に対する放射線作用が所定の線量限度を超える可能性がある時には、住民防護措置の決定に関する基準値が用いられた。これらの基準によれば、緊急防護措置として最初の10日間に、5–50 mSv の線量の可能性がある場合にはまず住民の収容が指示され、次いで、20–250 mSv なら子供と妊婦の避難が、又、50–500 mSv なら全員の避難が予定されている。年間線量が50–500 mSv なら現地条件により移住が予定されている。食品管理が予定されているのは、初年の全身被曝予測線量が5–50 mSv 又は個別器官で50–500 mSv の場合である。

この他、チェルノブイリ事故後、我が国では、食品中の放射性CsとSrの許容レベルという形で誘導レベルや、居住地施設の暫定汚染基準が用いられた。

シベリア化学コンビナートの事故後2日目既に、Georgievka 住民の期待被曝線量は住民防護措置の決定基準より大幅に低いことが明らかになった。大多数の放射線状況パラメータは、個別局所地点の地表β粒子束を除き、誘導基準も超えなかった。地表β粒子束は、事故時の介入レベル(誘導レベル)を超えたので、公式に局地的な除染が必要だった。

しかしシベリア化学コンビナートにおける事故は現地政府、社会と住民を不安にさせた。これが指導動機となり、一連の措置が採られることになった。これらは、防護効果の他に、社会的及び心理的緊張を下げる効果が想定されたのかも知れない。そういう措置として、村の土地除染、子供の一時的脱出、放射線的に「きれい」な食品の供給があった。

4.5.3 村の除染

除染は1993年4月13日、未だ積雪がある時に始まり、7月終りまで続いた。大部分の作業が行われたのは、通り、家付き菜園、そして、農場と製材所だった。汚染は局所的に非均一だったので、上述の表層部全面積を除去せず、汚染の高い場所だけが選択された。まず、積雪がある時には、数平米の寸法までの個別区画の表層部が除去された。更に雪解け後、面積0.2から1平米の局所的な染みの表土が除去された。村から埋設所には、又、放射能汚染した板、薪他の物体やゴミが運び出された。

除染は、次の管理レベルが達成されるまで行われた。

- 居住区画内面と私物 — $100 \text{ } \beta \text{ 粒子/cm}^2 \cdot \text{分}$
- 他の除染物(通り、庭、菜園等) — $200 \text{ } \beta \text{ 粒子/cm}^2 \cdot \text{分}$
- 住宅 — $20 \mu \text{ R/時}$ まで
- 覆いのある作業場(天蓋の下) — $30 \mu \text{ R/時}$ まで
- 開放区画(開かれた庭、菜園、通り等) — $40 \mu \text{ R/時}$ まで

次の作業段階で、菜園の深耕が行われ、ミネラル肥料が施され、村の中央通りがアスファルト舗装された。

除染作業の実施により、全部で約380 tの土壌と雪が埋設場に運ばれた。作業が行われた全面積は 0.8 km^2 で、処理面積は 0.0125 km^2 だった。全対象面積のうち実際に処理が行われた面積は1.6%、又、人の住む屋敷で除染が最も入念に行われた区画(0.36 km^2)で実際の除染面積は3.5%だった。除染により除去された放射能割合は、局所区画の汚染確率関数の分析に基き評価された。

除染時には最高汚染区画が除去され、その除染係数は 0.15 ± 0.05 だった。従って、除染により防止された Georgievka 村民の集団線量は $1.2 \cdot 10^{-3}$ 人 Sv と評価された。村における除染作業実施時の要員自身の集団線量は $1.4 \cdot 10^{-3}$ 人 Sv と評価された。このように、要員の被曝線量の方が、住民予防線量よりも少し高かった。

4.5.4 住民に「きれいな」食品の確保

食品から生体中への放射性物質の可能な取り込みを減らすために、一連の措置が行われた。

第 1 に、住民には勧告の形で、1993 年には野菜の耕作を自主的に止めるよう提示された。ここで、耕作を停止するかどうかとは無関係に、住民には無料で野菜と果物が供給された。各土地所有者に対する分量と種類は、年間の野菜と果物の生産を事実上完全に補償するものだった。

第 2 に、住民から 1993 年に屠殺予定の家畜が買い上げられた。このため住民は、至近年において現地産の肉製品を食餌から除き、商業網を通り入る製品を摂取出来た。

第 3 に、土地所有者には、家畜用に無料で「きれいな」飼料～じゃがいも、配合飼料と穀物～が供給された。各所有者に対する供給量は、土地の広さに比例しており、通常の飼料生産量に相当していた。これにより家畜を持つ住民は、厩舎収用期の初め(10 月)から「きれいな」飼料に移行できた。

これらの措置実施により住民に全部で、じゃがいも 430 t、他の野菜と果物 13.1 t、複合飼料 4.5 t と 12 t の穀物飼料が供給された。

肉買い入れ量は、生体重さで 20 t だった。

補足防護措置として、キノコとイチゴ採取のため森へ行くことが禁止された。

常時及び一時住民の全員(168 人)が 1 年間搬入された食品を食べたと仮定すれば、 $1.8 \cdot 10^{-4}$ 人 Sv の線量が防止された。

現地産の肉の買い上げの結果、Georgievka 村民の集団線量の予防量は $9.7 \cdot 10^{-6}$ 人 Sv と評価された。ここでは、これらの食品を(常時居住民 73 人が)1993 年 10 月から 1994 年 9 月までの期間、自分達の食餌から完全に除外したと見なした(年間一人当たり摂取量 60 kg)。

搬入された飼料を供給した結果による現地民の最大防止線量は、たったの $2.5 \cdot 10^{-5}$ 人 Sv だった。この値は、厩舎収用期である 1993 年 10 月から 1994 年 9 月まで、事故起源の放射性核種が「飼料－乳牛－ミルク」の連鎖に全く入らなかったと仮定し、得られた。更に、1993 年秋の搬入飼料供給により、1994 年秋の屠殺まで、事故起源の放射性核種が家畜の肉に全く入らなかったと見なした。

このように、「きれいな」食品確保に関するあらゆる措置による現地民に対する予防線量の合計値は、 $2.1 \cdot 10^{-4}$ 人 Sv と評価され、ここで費用は約 1 億 4 千万ルーブリ(1993 年価格)又は 12 万 8 千ドルだった。従って、単位防止集団線量(1 人 Sv)当りの費用は 6700 億ルーブリ/人 Sv[6 億 1 千万ドル/人 Sv]だった。

4.5.5 子供の一時的搬出

事故後最初の日々に、年齢 7 歳までの小さい子供は全員(7 人のみ)、村から運び出され親類に行った。残りの子供の一時搬出も当局により組織化された。搬出は任意で両親の同意を得た。子供には無料でトムスク州の疾病予防・治療期間に行き、遠足旅行を続ける可能性が提示された。こうして村から全部で 18 人の子供が搬出された。平均して、子供が出発したのは 4 月中旬で、不在期間は約 2.5 ヶ月だった。防止された実効線量は $2.3 \cdot 10^{-3}$ 人 Sv と評価された。

第4部

4.5.6 農業面での防護措置

事故後最初の月に得られた農地の放射線状況データと、将来の収穫物の汚染予測から、農業生産を制限しない根拠が得られた。それでも予防的性格を持つ農業措置に関する勧告が策定された。特に、農作物の定期的な放射線管理導入と、外販用製品に対してはその証明が勧告された。農業技術的措置として想定されたものは、一連の土壌中放射性核種の固定促進、その酸性度低下、土壌の石灰化と泥炭撒布(100－200 t/ha)とカリウム施肥によるカリウムと有機物の含有量増加だった。深く耕し層を完全に入れ換えるのは、腐植度が低いので妥当でないと見なされた。農業労働者防護のため、キャビン密閉型のトラクタの使用が想定された。農産物の2次汚染を下げるため、コンバインにより穀物が直接収穫された。上述の勧告の他、最もラジカルな措置として妥当と見なされたのは、1993年に最も汚染した農地を輪作から外した～面積が狭く、地域全体から見れば生産量も少量だったから。

最後の提案に従い、1993年に耕地 625 ha と牧草地 72 ha が輪作から外された。乳牛は別の牧草地に放牧され、外された農地からの飼料の不足分は、総額 6 千百万ルーブリ、総量 1000 t の配合飼料の無料供給により、生産者に補償された。

これらの措置の結果、「土壌－飼料－ミルク－人間」の連鎖からの放射性核種摂取による集団線量の防止量は $3.6 \cdot 10^{-4}$ 人 Sv と評価される。この評価では、輪作から外された農地で生産され得た飼料量(約 2 千 t)は、350 頭の乳牛を 1993 年 6 月 1 日(放牧開始)から 150 日間食わせるに十分であると仮定した。乳牛の搾乳量は、10 リットル/日と想定された。

4.5.7 経済費用効果の評価

前に強調したように、Georgievka 村で行われた措置は予防的性格のもので、その主な目的は事故により引き起こされた事実による社会的及び心理的ストレスの低減だった。そうは言っても、これらの措置は総体として、住民の線量負荷の低減に向けられた。従って、投資資本の経済効果がどうだったのか、それぞれの対策についての評価が興味深い。

表 4.13 に作業範囲、経済的支出、防止線量と単位防止集団線量当りの費用を示す。得られた結果をより明らかに理解するため、費用はルーブリで表示し、対策実施時の公式平価を用いドルに換算した。表 4.13 から判るように、放射線防護原則の観点から正当化される措置は一つもない。

表 4.13 防止された線量と防護措置に対する費用

措置	作業量	防止線量 Sa、 10-3 人 Sv	費用 Xc 百万ルーブリ (1993 年価値)	Xc/Sa	
				十億ルーブリ /人 Sv	百万ドル /人 Sv
居住地除染	376t の土壌と雪。 除染面積 1.25ha	1.2	4.6	3.8	3.5
子供の一時的搬出	18 人を 2.5 ヶ月	2.5	10.0	4.0	3.6
現地肉製品の買い上げ	生重量 20 t	0.01	48.0	4800	4400
搬入野菜の供給	じゃがいも 27.5 t、 野菜と果物 13.1 t	0.18	11.3	628	571
個人経営体に搬入飼料 の供給	配合飼料 4.5 t、じゃがいも 403 t、干草 12.0 t	0.025	81.1	3244	2950
農業活動の一時的中断 と、企業「Sibiryak」に搬 入飼料の供給	耕地 642 ha、牧草地 72 ha、配合飼料 1000 t	0.36	61.0	169	154
平均				50.5	46
合計		4.275	216		

絶対価格でも、単位防止集団線量当りの費用でも最も高価な措置は、農業活動分野に関するものだった。これは全く明らかな結果である。何故なら、事故放出された放射性核種 Ru-106 と Pu-239 の土壌から農産物、更に人体への移行係数は、極めて低いからである。表のデータが実証しているように、事故の「値段」は、社会の放射線学的素養、及び、決定に影響する人々と意思決定者の準備レベルが高く、事故の結果発生した状況に対応する際の社会-心理状況を妥当な範囲内に管理できるかどうか強く依存する。

4.6 結論概要

原子力事故7段階国際尺度によれば、シベリア化学コンビナートにおいて1993年4月6日に発生した事故[訳注:「トムスク7事故」]は、第3段階(要員の過剰被曝のない深刻な事象)に分類される。

全事故処理期間(4ヶ月)に対する要員の平均個人被曝線量は約6 mSvで、個人最大被曝線量は50 mSv—放射線安全基準に規定されている年間線量限度—に達しなかった。要員の集団線量は11.2人 Svだった。

住民と環境に対する放射線学的な影響は最小限だった。住民の個人線量は1 mSvに達せず、集団線量は要員の500分の1だった。放射線防護の原則から出発すれば、住民の被曝線量低減に向けた如何なる措置も、この条件では要求されなかったはずである。

そうは言っても、国の事故対応システムは、当面、現実の危険認識を社会的に形成するため有効な手段を持ち合わせていない。従って、社会-心理学的ストレスを下げるため、防護措置が実施された。子供の一時的搬出、除染と農業活動の制限などである。放射線防護上「あらゆる場合」に、この過剰な行政活動を行うべきかは、議論がある。何故なら、一面ではそれは正当化できない物質的支出を要求し、別の面では常に望み通りの目的—住民と社会の社会-心理学的反応の緩和—が達成されるとは限らないからである。

小さな放射線事故時に合理的に介入なしで済ませられるか否かは大きな問題である。先ず、その時の政治的利益や社会意識の心理的外圧に抗してでも優れた科学的な専門家の勧告を実施に移せる意思決定者の能力に懸かっているようである。