

## 添付資料2 注目文献の概要

## 1-01

文献タイトル(原題)	Contamination of some important kinds of plants by fission products
文献タイトル(和訳)	数種の重要な植物の核分裂生成物による汚染
著者/所属機関(国)	Ajdacic´ N, Martić M (Boris Kidric Inst. Nuclear Sciences, Beograd, YUG)
掲載雑誌	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry
発表年	1989

我々が分析した多くの植物や生産物のうち、最も重要な類の結果が得られた試料のみ発表することとした。数値データを表1に示す。表2のデータは、牛乳や乳製品、ベビーフードのサンプルから得られた結果の一部である。

牛の飼料や動物由来の食品について分析を行ったが、これは乳や肉がヒトの体内放射能汚染初期における直接的な手段であることによる。

飼料として使われる牧草は、一方は降水量の多かった地域で収集されたもの、もう一方は、チェルノブイリ事故前後で通常通りのものであった。アルファルファは、非常に広大な土地に植えられており、特に重要である。というのも、動物の体内器官に放射性核種が直接入り込む要因となり、またその肉・乳やそれらの加工品を通じてヒトの体内器官へも入り込む要因となるためである。我々が分析した薬草で、医薬品や化粧品産業にて使用される最も重要と思われるものは、カミツレ、セイヨウヤマハッカ、パセリである。これらは、非常に多くの製品の基本原料である。

1986年5月1日に観測地点周辺の広い地域において、記録された雨量が多量であった。63.5/24時間の総量のうち、61.5mmが17～19時の間のみであった。地面、地表の水やあらゆる種類の植物の高濃度汚染がこれらの結果によることは、疑いの余地がない。特に、ユーゴスラビアの大変広い地域にわたる生物圏の非常に高い濃度の汚染は、降水量の多さによることは明白である。

互いに遠く離れた試料収集場所で検出した同種の植物の汚染レベルは、明らかにほぼ同じで非常に高かった。(いくつかの小地域を除いて、果物や野菜の分析結果は、セルビア共和国全域の高濃度汚染を示しており、地表水についての分析結果も同様であった。)特定地域の汚染レベルは、1986年5月初めの降雨の含有物に直接関係している。

1986年5月の様々な放射性核種における植物汚染度の変動係数は、汚染前の期間と比べて、牧草では  $n \cdot 10^4 \sim n \cdot 10^6$  程度である。薬草では、これらの要因は一桁低い値にとどまっている。これらは、チェルノブイリ事故前でも牧草より高い放射性核種の蓄積を示し、よって1986年5月にも例外的に高い汚染濃度を示すこととなった。

危険に対する正確でタイムリーな情報伝達は、適正な食料及び飼料の保護に非常に役立つ。これは、同一地域で栽培されたのち、最大限の汚染の前後で刈り入れおよび採集されたアルファルファの試料分析結果によっても証明されている(表1)。

牛乳、乳製品及び肉の汚染に関し、生物圏で検出した全ての多少なりとも放射能毒性のある核種の存在に十分注意を払うことは、放射能の危険性評価において必要である。子供、妊婦および育児中の母親にとって、食品中のSr90の存在は無視できないが、チェルノブイリ事故後長い時間経過してもなお限界値は決められていない。

## 1-05

文献タイトル(原題)	Early estimates of UK radiation doses from the Chernobyl reactor.
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ原子炉による英国内放射線量率の初期推定
著者/所属機関(国)	Fry F A, Clarke R H, O'riordan M C (National Radiological Protection Board, UK)
掲載雑誌	Nature (Lond)
発表年	1986

1986年4月26日以降、キエフ近郊のチェルノブイリ原子力発電所事故は、大気中に大量の放射性物質を拡散させた。風により、放射性物質はまずヨーロッパ北部及び西部へと運ばれていった。放射能は最初に5月2日に2000kmほど離れたイギリス南部で検出された。

表1は、チャイルトン上空を雲が通過する間の24時間におけるこれらの放射性核種の積算濃度を列挙したものである。これらの値は、全体としてイギリスにおける典型的なものである。

国内の放射性物質の堆積量はかなり変動的であり、主として降雨の有無によって異なる。一般的に、イギリス南部は雲が通過する間降雨が少なく、一方イギリス北西部、北部ウェールズ、スコットランド、北部アイルランドでは散発的に激しい雨が降った。

上記(表1)放射性核種のうち、最も重要な放射性核種はI131、Cs134、Cs137である。というのはこれらは食物連鎖を通じてヒトに移行するからである。ミルクはこのような移行の重要な初期における指標である。チャイルトンでは、ミルクに含まれるI131濃度の代表的なピークは $\sim 400\text{Bq l}^{-1}$ であった。セシウム同位体の濃度は、Cs137でピーク値が $\sim 400\text{Bq l}^{-1}$ であり、Cs134で $200\text{Bq l}^{-1}$ であった(表2参照)。

葉物野菜もまた、ヨウ素やセシウム同位体の食料からの摂取において主要な原因物質となっている。(表2参照)。

チェルノブイリ汚染に対する人体被曝には、いくつかのメカニズムがある。放射線量が体内に到達するまでの一連の流れは、以下のとおりである。放射性雲の通過による外部照射; 雲に含まれる放射性物質の吸入;  $\beta$ 線による皮膚の放射能汚染; 地表の堆積物質による外部照射; 放射能汚染食品の消化吸収がある。上記の概算線量をそれぞれ表3に示す。

$\gamma$ 線量測定結果より、翌年以降いくらか上昇した線量率が継続し、1991年5月までに、北部の臨時に増加する線量は $400\mu\text{Sv}$ 、南部は $20\mu\text{Sv}$ となるであろう。同時期の自然界における放射線量は、平均 $7500\mu\text{Sv}$ である。

表3で見積られた線量は、2つの年齢別及び地域別にグループに分けられ、年齢および地域別加重線量についても示してある。5600万のイギリスの人々にとって、 $70\mu\text{Sv}$ の個人加重線量は事故後年間 $4 \times 10^3\text{manSv}$ の集団線量であることを意味する。この値は、自然界からの人への年間集団線量、すなわち毎年約 $10^5\text{manSv}$ の数%にすぎない。

以上のことから、自然界の放射線による通常の間放射線量に対する増加分は、全世代の平均で、イギリス北部で約15%、南部で1%となると見込まれる。全世代および地域の平均では約4%である。この超過線量は、その後数年で大幅に減少するであろう。

## 1-06

文献タイトル(原題)	Long-term behavior of radiocesium in dairy herds in the years following the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後 10 年間の乳牛群の放射性セシウム長期挙動
著者/所属機関(国)	Voigt G, Paretzke H G (GSF-Inst. Strahlenschutz, Neuherberg, DEU), RAUCH F
掲載雑誌	Health Physics
発表年	1996

チェルノブイリ事故後南バイエルン州で汚染の追跡調査がなされてきた。その一環としてCs137移行挙動の経時変化を長期観察した。バイエルンの農場(農場 A)の牛乳や植生中に沈着したCs137をガンマ線スペクトロメトリで測定し、この結果に基づき移行係数を推定した。

飼料-畜産物移行係数は、畜産物(ここでは牛乳)放射能濃度と、一日当たりの平均放射能摂取量(ここでは食した牧草の生重量と、牧草と飼料の放射能濃度の乗算結果)との比である。

図2に農場Aの牛乳中のCs137放射能濃度の推移を表した。超短半減期4日(99.2%)と長半減期1950日(0.8%)の2つの指数関数により濃度減少が示された。1986~87年冬の濃度増加は、事故により直接放射性核種が沈着した5月の干草を飼料にしたためである。1989年以降の移行原因は植生への根吸収と想定される。事故4年後の1991年以降は一定となり核実験時代の飼料-牛乳移行係数と一致する。しかし、事故後3年間は牧草を汚染させる、直接の汚染、降雨による飛散、再浮遊の要因が働いたと推測される。

1993年に農場Aとこの農場近辺にある農場Bとの放牧形式の影響に関する比較試験を行った。農場Aは4箇所の放牧場所でローテーション放牧(非継続放牧)をしている。この形式はバイエルン州では一般的である。農場Bは1箇所だけの継続放牧方式を採用している。両農場の家畜数、牧草地面積、土壌、植生中のCs137放射能濃度を表1に示した。農場Aは2000m<sup>2</sup>/頭、農場Bは1000m<sup>2</sup>/頭の放牧面積である。両農場は4kmしか離れていなく同じような土壌特性をしているが若干の違いがある(表2)。

両農場の牛乳及び植生中のCs137、K40の放射能濃度の時間推移を図3、4に示した。カリウム含量が多く粘土含量が少ない農場Aでは植生中のCs137濃度が高いと予想されたが結果は異なり両農場に違いは見られなかった。K40も同じ濃度であった。両農場の植生中のCs137、K40の放射能濃度が同じであったため、土壌中の安定カリウムの土壌-植生吸収は同じであると想定された。牛乳中のK40放射能濃度は同じであった。しかし、事故のフォールアウトは同量であり土壌、牧草のCs137放射能濃度が同じであったのに、農場Aの牛乳中濃度は農場Bの10倍であった。農場Aの牛はより広い牧草空間で食しているため放牧圧は低く土壌からのCs137吸収は少ないにもかかわらず牛乳中の濃度が高いという結果になった。両農場の土壌-植生移行係数は同じであったため、結果には放牧圧の違いが反映されていると思われる。植生の放射能のほか牧草の組成に違いもなく、ローテーション牧草地の草はより高い牧草が多く高さが不均一という違いしか観察できない。

## 1-08

文献タイトル(原題)	Detection des radionucléides artificiels dans les produits laitiers après l'accident de Tchernobyl
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後の乳製品中の人工放射性核種検出
著者/所属機関(国)	Janin F, Leprovost G, Lapeyre C, Guiard A (Direction Générale de l'Alimentation, Ministère de l'Agriculture, Paris, FRA)
掲載雑誌	Radioprotection
発表年	1988

本調査で提示した結果は食料総務局(Direction générale de l'alimentation)の依頼に応じて農業省の各獣医部門研究所で分析され収集されたものである。

1986年5月6日に欧州共同体レベルでの放射性ヨウ素 131 最大勧告値が設定された(表1)。農業省の管轄において食料品中の人工放射能レベルの監視が強化され、17の県獣医部門研究所で放射能測定が行われた。欧州共同体委員会は6月17日からチェルノブイリ発電所 1000km 圏内の生産物輸入を保留にし放射性 Cs137、Cs134 の規制を実施した(表2)。各県で6牛乳サンプルに基づくヨウ素の放射能評価がガンマ線スペクトロメトリを用いて行われた。フランス西部では I131 平均レベルは 30Bq/kg 未満、東部の方が高く、5月第1週には北東部で最大値 700Bq/kg が記録された。ヨウ素の放射能レベルは5月後半には平均 100Bq/kg 未満になった。牛乳中のヨウ素は Cs137、Cs134 に置き換わり、Cs137、Cs134 の最大値は5月初めに南東部で発生した大雨時に検出された。セシウムの放射能レベル減少はヨウ素より遅かった。5～6月に収穫した干草を牛が食したため 1986～87年初冬に牛乳中のセシウムの放射能レベルが上昇した。ヤギ乳、羊乳の汚染は牛乳より相対的に高かった。5月第1週にヨウ素 131 が 1000Bq/kg を超えるものもあったが牛乳同様測定結果はばらついていた。昔ながらの放し飼いで放牧させているヤギ、羊の乳の放射能レベルは相対的に高かった。粉ミルクは乳児用であるため特に監視が強化された。チーズはヤギと羊のチーズで最大値が観察された。どの畜産品も市場排除する必要はなかった。

乳は、人が摂取するヨウ素、セシウムの媒体となった。19000の食料品サンプルが分析され、うち10000が乳製品であった。事故後に採取された牛乳はどの規制も適用されることなく消費できた。牛乳中の I131 の実効半減期は5日と推定された。フランスの食料品中 5000以上のサンプルが検出下限 10Bq/kg 未満であった。Cs137 に 25Bq/kg、Cs134 に 10Bq/kg 未満の放射能を要求する、欧州共同体よりさらに厳しい基準を設けた 1/3 の国々に輸出することが可能なレベルであった。

この事故で、ヨウ素、セシウム同位体を長期間継続して迅速に検出するために、国の各地に研究所を設置する必要性が明らかになった。貯蔵できない製品の流通を遅らせないために分析時間は短かくあるべきであった。自動制御可能なポータブル検出器は感度が不十分であり、本調査に参加しなかった獣医部門研究所にガンマ線スペクトロメトリを配布した。1987年末に17研究所が稼動し畜産物監視計画に加わる。

## 1-13

文献タイトル(原題)	Irradiation of population in the republic of Serbia after the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後のセルビア共和国国民の被曝
著者/所属機関(国)	Maksic R (Federal Ministry of Economy, Belgrade, YUG), Radmilovic V (Federal Ministry of Labour, Health and Social Policy, Belgrade, YUG), Pantelic G, Brnovic R, Petrovic I (Inst. Occupational and Radiological Health "Dr. Dragomir Karajovic", Belgrade, YUG)
掲載雑誌	U.S. DOE Reports
発表年	1997

環境放射線を監視する国家プログラムが 1960 年にセルビア共和国で設けられ、チェルノブイリ事故後は規制や監視プログラムの更新がなされてきた。1992 年以降は 18 の町に設置された線量計によってベータ線及びガンマ線の外部線量測定が年 2 回行われている。

本調査は事故後に食物摂取を通じて Cs137 及び Sr90 放射能から生じる国民の実効線量を概算する目的において実施された。1986～1994 年の野菜、果物、肉、穀物、乳製品、ミルク中の Cs137 放射能(表 I)、Sr90 放射能(表 II)を測定し、成人国民の摂取量と実効線量を算出した(表 III)。両放射能による国民の実効線量はこの期間に減少していった。

## 1-23

文献タイトル(原題)	Radionuclide contents in environmental samples as related to the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故に関連する環境試料中の放射性核種含量
著者/所属機関(国)	Shiraishi K, Muramatsu Y, Nakajima T (National Inst. Radiological Sciences, Nakaminato, JPN), Yamamoto M (Kanazawa Univ., Ishikawa, JPN), Los I P, Kamarikov I Y, Buzinny M G (Ukrainian Scientific Centre of Radiation Medicine, Kiev, SUN)
掲載雑誌	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry
発表年	1993

1985～1991年にチェルノブイリ周辺地域(ウクライナ)と茨城県から環境試料、特に食材を採取した。試料を無水無灰状態にした(dry-ashed)後、Sr90以外の放射性核種はゲルマニウム検出器を備えたガンマ線スペクトロメーターにより、Sr90は発煙硝酸分離を行った後に低バックグラウンドベータ線スペクトロメーターにより、安定元素は誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)により定量した。

牛乳、コイ、食事(total diet)、甜菜、根菜、ニンジン、チーズ、キュウリ、干しリンゴ、インゲン、葉菜、調理したキノコ、ジャガイモ、埃、水に含まれる6放射性核種(Cs137、Cs134、K40、Co60、Mn50、Sr90)(表1)と12安定元素(Na、K、Ca、Mg、P、Fe、Zn、Mn、Al、Sr、Cu、Ba)(表2)を測定した。ウクライナで採取したミルクの平均放射能濃度はSr90が0.251～1.18Bq/lで茨城より10倍高く、Cs137が5.87～77.3Bq/lで茨城は0.033Bq/lであり200～2000倍高かった。Cs134もCs137と同様の傾向を示した。K40は両国ともバックグラウンドと同レベルであり事故との関係はなかった。Co60とMn50はほとんどが検出限界程度であった。チェルノブイリ発電所30km圏内で採取した鯉のCs137、Cs134、Sr90は茨城より10～1000倍高かった。食事試料から算出した一人当たりのSr90摂取量は、ウクライナが0.25Bq/日、文献から引用した茨城の摂取量は0.1Bq/日程度、Cs137摂取量はウクライナが2、3倍高いだけであった。K40は同レベル、Cs134、Co60、Mn50は検出値以下であった。しかし、食事に関して結論を導出できるほどの試料数はなかった。埃はウクライナのSr90とCs137濃度が高かった(茨城の濃度は文献値から引用して比較)。水、根菜、葉菜の両国の差は10～1万倍であった。

表1、2から、放射性核種の濃度比(Sr90/Ca、Cs137/K、Cs134/K、Cs137/K40、Cs134/K40、K40/K、Cs134/Cs137)を算出した(Bq/g又はBq/Bq)(表3)。ウクライナ試料のCs134/Cs137比は採取時期に応じて0.1～0.3であった。

試料数が少ないが、両採取場所の放射性核種レベルを比較すると、ウクライナは茨城より高く、試料によって数倍から2、3万倍異なった。両国の成人男性のCs137及びSr90摂取による年間線量当量をICRP Publ.30を用い概算した(表4)。データ対象者は一日一人当たり0.3リットルのミルクを飲用したとして概算に用いたところ、Sr90線量当量は30倍、Cs137線量当量は500倍の差があった。しかし、事故から時間が経っているため食事試料では2倍の差しかなく、ウクライナ人の年間線量当量は自然放射線レベルより若干高い程度であった。

## 1-26

文献タイトル(原題)	Prevention of Internal Exposure to Cesium-137 (Cs137) Radiation in Inhabitants of an Area Contaminated by the Chernobyl Accident.
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故による汚染地域の住人におけるセシウム-137(Cs137)放射線の内部曝露の防御について
著者/所属機関(国)	Takano K (Shinshu Univ. School of Medicine, Matsumoto)
掲載雑誌	Environmental Health and Preventive Medicine
発表年	1996

1991年5月から、チェルノブイリ事故による汚染濃度が高いベラルーシ共和国のゴメリ州チェルチェルスク郡の住民に対するCs137の内部被曝を避けるため、全身カウンターにてこの地域の住民の内部被曝量を継続して測定した。4箇所のサンプル採集地点のCs137濃度はA:37~185、B:185~555、C:555~1480、D:1480(kBq/m<sup>2</sup>)以上であった。また、GM半導体検出器にて牛乳、牛肉、豚肉、キノコ、ジャガイモおよび小麦粉のCs137汚染レベルも測定した。

また、住民の生活習慣と測定したセシウムの汚染レベルとの関連性も分析した。チェルチェルスクの住民528人と農業生産物のセシウム蓄積量を測定した。住民のCs137内部汚染レベルと居住地域のCs137による表面汚染レベルについて相関関係はみられなかった。しかしながら、年齢及び性別による内部被曝レベルの比較は、成人男性と子供の男女、成人男性と女性の間で重要な差異があった(p<0.001)。年齢とCs137の内部被曝量との関連性の点からは、女性において相関関係はみられなかったが、男性においては、強い相関関係があった(r=0.776)(図3)。

地域の保健機関により厳重に管理されているため、学校給食は子供の被曝レベルを低減させる一因となっている。成人男性と女性の違いは、屋外労働時間の違いや牧草地や湖および森由来の食品摂取量の違いによるものと考えられる。

GM半導体検出器による農業生産物の測定値のいくつかは、ベラルーシ共和国の保健省による暫定基準を超えていた。測定された牛乳、牛肉、豚肉及びキノコは超えていたが、ジャガイモや小麦粉は超えていなかった。

牛乳(r=0.829)、牛肉(r=0.916)、豚肉(r=0.896)およびキノコ(r=0.670)の測定結果は全て畑や牧草地表面のCs137濃度と強い相関関係を示していたが、ジャガイモや小麦粉はそうでなかった(図4)。Cs137による高い地表汚染のあった地域で生産された牛乳、牛肉、豚肉およびキノコには、Cs137量がベラルーシ共和国の暫定レベルを超えるものがあった。一方、Cs137による低い地表汚染レベルであった地域で生産された食品や、ジャガイモ(この地域の主要食品)、小麦粉(パンの材料)の測定結果は、全てベラルーシ共和国の暫定レベルよりも低かった。

この調査によれば、汚染地域住民のCs137内部被曝レベルは、居住地域のCs137濃度ではなく消費した食品のCs137濃度と関連性がある。従って、汚染食品を避けることで、住民は内部被曝とその危険性を低減させることができる。

1-27

文献タイトル(原題)	Radioactive Contamination of Food in Stepanivka Village, Zhytomyr Region, Ukraine: in 1992 and in 2001
文献タイトル(和訳)	1992年及び2001年のウクライナ Zhytomyr地方の Stepanivka 村における食品の放射能汚染
著者/所属機関(国)	Tykhyy V (Inst. Mathematical Machines and Systems, National Acad. Sci. Ukraine, Kyiv, UKR)
掲載雑誌	KURRI-KR
発表年	2002

チェルノブイリ事故により汚染された村で、1992年と2001年に食品の放射能汚染測定を実施した。Stepanivka村は、チェルノブイリ原発の西方120kmに位置し、周辺地域のCs137による表面汚染が典型的なレベルである(3~5Ci/Km<sup>2</sup>)。付近の土壌は、軽量で酸性の泥炭ポドソルで灰色、Ph4.6~5.5である。

**水:**村の飲料水は、深さ120mの掘抜き井戸からの集中的な供給と、深さ1~3mの個人用井戸による。掘抜き井戸の水の総ガンマ線量は約100Bq/lであったが、ラジウム、トリウムとその娘核種によることは明白で、当地域は花崗岩鉱床として知られている。個人用の井戸の水に含まれる平均ガンマ線量は、59Bq/lで、0~179Bq/lの範囲の値であった。本調査では詳細な放射能調査の機会が得られなかったが、同地域の類似した土壌セシウム汚染レベルにおける他の調査では、1992年の水の放射能濃度は、1999年よりも9倍高かった。

**乳:**2001年の乳のCs137汚染は、1992年よりも1/9に低下していた。干草の5つのサンプルの平均濃度は1992年に500Bq/Kg(乾燥重量)であった。2001年の2つのサンプルでは、1125および711Bq/Kgであった。汚染の主因については、詳細な調査が必要である。

**食肉、家禽肉、卵、魚:**これらの食品は稀少であり、測定用サンプルはわずかであった。

**ジャガイモ:**食料として、また豚や鶏の飼料としても重要である。

**キノコ、ベリー類:**多様なキノコ類およびベリー類(主にブラックベリー、ビルベリー)は、大変重要な食品であり、ほとんどは森で採集したものを食している。放射性物質を含むことが知られていたため、1992年の消費量は2001年よりも少ないが、同量で計算した。

調査地域におけるCs137とSr90の主要食品類からの摂取量について、計算結果を表3に示す。調査結果から、2001年のCs137平均摂取量は、1992年よりもほぼ1/3に低下しており、それぞれ89kBq、33kBqであった。1992年には、Cs137の年間摂取量の61%が乳、30%がキノコとベリー類の合算であった。2001年には、乳の割合は20%に低下し、キノコとベリー類は59%となった。キノコとベリー類のCs137含有量は、1992-2001年でおおむね一定である。

一方、食品のSr90汚染はかなり増加し、乳はほぼ3倍、乾燥ベリーは12倍であった。植物中のSr90の移行は、堆積した燃料粒子の化学変化により時間とともに増加したことを示す多くの調査結果がある。

体内摂取量については、Stepanivka村で、地域産の食品によるCs137の平均摂取量が1992年は1.2mSv/年と算出された。同様に算出して、2001年では0.37mSv/年となった。

1-28

文献タイトル(原題)	Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of rural inhabitants in Russia after the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後のロシアにおける農村住民の内部被曝に対する各種食料品の作用
著者／所属機関(国)	Travnikova I G, Bruk G J, Shutov V N, Bazjukin A B, Balonov M I (Inst. Radiation Hygiene, St. Petersburg, RUS), Rahola T (STUK-Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, FIN), Tillander M (Univ. Helsinki, Helsinki, FIN)
掲載雑誌	Radiation Protection Dosimetry
発表年	2001

チェルノブイリ事故の影響を受け放射性核種で汚染されたロシアの Bryansk 州に位置する住民 350 人の村 Veprin で、農産物や天然食材中の Cs137 濃度を定期測定し、住民の食生活調査と並行して Cs137 体内量測定を行った。測定結果を基に、住民が内部曝露した年間実効線量を算出し、1986～1996 年の線量を再構した。内部線量低減対策効果を評価した。

Veprin 村近辺の泥炭土壌や冠水牧草地土壌は放射性核種が定着しにくく、住民が曝露する総線量のうち内部線量により多く影響を与えている。Veprin 村の土壌－食物平均移行係数は Bryansk 州の全汚染地域より大きく、ミルクは 4～5 倍、ジャガイモは 1.5～2 倍であった。ジャガイモ、ミルクは時間経過とともに Cs137 が減少し、ジャガイモは耕作、施肥を行う土壌で栽培されるため、より減少が早かった。一方、農産物とは反対に、野生キノコ (forest mushrooms) や野生のベリー類 (forest berries) への Cs137 移行に有意な減少はなかった。事故後 Cs137 及び Cs134 で汚染された地元産食材の消費は保健衛生上禁止されたため、住民は食事内容を変更せざるを得なかった。ミルクは I131 汚染され、地元産の代替として他地域のミルクが販売されたが消費量は事故前の 30% であった。USSR 崩壊により他地域のミルク販売がなくなり再び住民は地元産ミルクを消費し始めたが、事故後 10 年経過しても住民のミルク消費は事故前の 65% であった。

住民の Cs137 内部線量に対し、農畜産物(ミルク、肉等)による曝露は 83% (1987 年) から 66% (1996 年) に低下し、野菜による曝露は 10% となった。反対に、天然食材(キノコ、魚等)による曝露は 6% (1987 年) から 25% (1996 年) へと増加した。住民の Cs137 体内量とミルク(事故後初期段階に消費) 及びキノコの消費量には相関関係があった。

内部線量の評価は WBC(全身計測)測定に基づいても実施され、食物からの Cs137 体内摂取量に基づき実施された評価結果と合致した。従って、住民の食事内容調査及び適用した評価手法モデルの正確性が示された。

土壌から食物連鎖に従う移行が自然に減少していったこと、地元産の消費を禁止したことから、住民の体内線量は 1987 年以降急激に減少した(図 4)。1990 年代は地元産の消費により減少が緩やかになった。事故後 10 年間の住民の内部線量は対策により約 1/2 となった。長寿命の放射性核種(Cs134, Cs137, Sr90)により住民が被曝した内部線量は、1 年目の 10mSv を含めて 35mSv であった。対策をとらなければ、10 年間の内部線量は 70mSv になっていたと想定された。この期間、成人住民の外部ガンマ線量は、1 年目の 14mSv を含めて 34mSv であり内部線量と同量であった。

1-30

文献タイトル(原題)	Radiological situation on private farms after the accident at the Chernobyl nuclear power plant
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ原子力発電所事故後の民間農場における放射能状況
著者/所属機関(国)	Prister B S, Sobolev A S (Ukrainian Inst. Agricultural Radiology, Kiev, UKR)
掲載雑誌	U.S. DOE Reports
発表年	1997

ウクライナの Polessye にて、大人3~4人と子供(16歳以下)2~3人の典型的な家庭から食品試料を採集し、試料中の Cs137 について測定を行った。

これまでの牛乳中の Cs137 の減少は、Cs137 の土壌吸収による複合体結合および対応策適用の結果である。この2つのプロセスにて、1994年までに牛乳中の Cs137 含有量が集団農場では1/10~1/20に減少した。一方、民間農場では1/4から1/6に減少した。すなわち民間農場の牛乳は Cs137 の溶解濃度約80%であり、集団農場のそれは20%にすぎなかった。民間農場の牛乳と肉中の Cs137 濃度は、集団農場よりも数倍高い値であった。

また、Polessye の住民は食事における特徴として、キノコやベリー類の消費量が多い点がある。Polessye の様々な地域におけるキノコの Cs137 含有量は、800~32000Bq/Kg と値に幅があり、結果として、キノコによる Cs137 摂取量も値のばらつきがある。

1994-1995年に、“Khiborob”集団農場(Rovno 地方 Dubrovitsa 地区)の家庭の食事における放射線核種の摂取について、分析が行われた。これにより、3-5km 離れた村の家庭の食事は、様々な成分にて Cs137 摂取量に大きな違いがあることが判明した。Milyachy 村では、対応策を適用した牧草地で生産した牛乳(Cs137 含有量は 80-110Bq/l)を消費した場合は牛乳から49%、キノコから6%の摂取となる。対応策なしの場合、牛乳(230-550Bq/l)から63%、キノコから11%であった。Velyun や Zagreblya の村では、牛乳(Cs137 含有量は 14-30Bq/l)から13-15%、キノコから21-26%であった。

調査した村の人々は、森での生産物の消費状況により3グループに分類できる。年金受給者、集団農場の労働者および森林労働者である。森林労働者は、集団農場労働者の2倍のキノコを消費する重要なグループである。他にも、森林労働者は森で乾燥干し草を作り(Cs137 濃度は 10000-15000Bq/kg)、冬の牛乳中の Cs137 含有量は、300-450Bq/l という期間があった。干し草を、森で作ったものから集団農場の耕作地で作成した干し草(Cs137 濃度は 800Bq/kg)に替えた後、牛乳中の Cs137 含有量は 45Bq/l まで減少した。家庭の食事では、牛乳の Cs137 の相対的摂取量は80%から55%に減少した。

Polessye の家庭における食事からの Cs137 摂取量は、主として家庭で消費されるキノコの量と牛由来の食品に含まれる Cs137 含有量による、と結論づけられる。ヒトの体内器官における Cs137 摂取量を減らすためには、濃縮飼料と吸着剤の提供、および牛の汚染飼料排除が必要である。牧草地の対策が適用済であれば、集落では牛乳よりもキノコの方が Cs137 摂取量の関連性が高い。住民へは、キノコ採集にあたり汚染度の高い地域や、土壌からの放射性核種蓄積率の高いキノコの種類について周知するべきである。

個別放射線量を超えないようにする課題は、事故後10年経過してもなお存在している。

## 1-36

文献タイトル(原題)	Measures introduced in Norway after the Chernobyl accident – A cost-benefit analysis -
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後にノルウェーで導入された対策－対コスト効果分析－
著者／所属機関(国)	Strand P (National Inst. Radiation Hygiene, Osteras, NOR), Brynildsen L I (Ministry of Agriculture, Oslo, NOR), Harbitz O (Norwegian Food Control Authority, Oslo, NOR), Tveten U (Inst. Energy Technology, Oslo, NOR)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

チェルノブイリ事故により生じ得る健康リスクを抑制するためにノルウェーでとられた対策の効果と経済性について論じた。事故後 3 年間羊、トナカイ、ヤギ、牛、野生淡水魚の放射能レベルは介入レベルを超えた。対策は以下の 3 つのアプローチで推進された。1) 耕起と施肥による土壌から植物への放射性核種摂取低減、2) セシウム結合剤添加や屠殺時期変更による飼料から家畜への摂取低減、又は特別給餌計画による家畜中放射能レベル低減、3) 食物規制や食事内容勧告による人の摂取低減。

汚染レベルに応じて国を 3 区域に分割し、「禁止区域」内の食肉レベルでない肉は動物飼料とした。「計測区域」の動物にはセシウムを含まない或いは低レベルの飼料を与えベントナイト投与をした。「禁止区域」に指定される地域は 1987 年になくなった。屠殺を承認する牛を限定した。ヤギ乳チーズは放射性物質がある場合凝縮されるため動物飼料用に切り替えた。野生淡水魚は販売禁止となるものもあった。事故時に屋外で栽培をしていたレタスとパセリの販売が禁止された。農業省は耕起と施肥を勧告し、多方面で効果が現れたと思われる。1988 年、豊作だった高汚染キノコを食した羊の放射性セシウムレベルは 1987 年の 3～4 倍に跳ね上がった。「通常区域」や店頭羊、ヤギ、牛の肉には検査を行い、その結果に従い区域調整等の対策をとり効果を上げた。地衣類を食するトナカイから高放射能が検出され、1990 年から反芻胃用含プルシアンブルー丸薬を定期使用する予定である。

対策の結果、1987 年に不適格判定から免れた羊肉、ラム肉、ヤギ肉の価値は 1986 年 3700 万 USドル、87 年 3300 万ドル、88 年 4100 万ドルであった。対策に要した費用は 1987 年 570 万ドル、88 年 850 万ドルであった。国民が曝露していたであろう放射線の低減量は 1987 年 450man Sv、88 年 200man Sv であった。1987～88 年に使われた財源は、達成した放射線低減量の見地からは正当であったと思われる。

対策によりフォールアウト曝露による国民の平均線量は 0.3mSv まで低減した。これは自然界の外部ガンマ放射線の 1/2、家屋内のラドン線量の 1/10 に相当する。一方、集団線量は 1man Sv であり健康リスクを考慮するレベルである。事故時は一人当たりの許容限界値は平常時より高めに設定される。ノルウェーでは事故 1 年目は 5mSv、以降は 1mSv を目安に対策をとってきた。対策別に要した費用と低減した線量を表 1 に示した。トナカイ肉の廃棄はコスト的に低減集団線量当たり最も高かった。関係機関が発した食勧告が絶対的にも相対的(対コスト効果)にも最小コスト対策であった。事故直後国民の大部分は食物、飲料水の汚染を心配はしたが自主的に食習慣を変更した人は少なかった。サーミ文化消滅、山間部住民人口減、食肉製品破壊を危惧する声もあったが影響は限定的であった。農業の見地からは 1986 年、87 年よりも 88 年の方が問題が多かった。

## 2-01

文献タイトル(原題)	Consequences for agriculture
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故の農業への影響
著者/所属機関(国)	Fesenko S.V., Balonov M.I., Voigt G. (International Atomic Energy Agency, Vienna, AUT), Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. (Russian Inst. Agricultural Radiology and Radioecology, Obninsk, RUS), Bogdevich I.M., Zhuchenka Yu. (Res. Inst. Soil Sci. and Agrochemistry, Minsk, BLR), Howard B.J. (Lancaster Environment Centre, Lancaster, GBR), Kashparov V.A. (Ukrainian Inst. Agricultural Radiology(UIAR), Kiev Region, UKR)
掲載雑誌	Nuclear Engineering International
発表年	2006

Chernobyl Forum の「チェルノブイリ事故と対策が与えた環境への影響:20年の経験」と題する報告書の調査データに基づき、ベラルーシ、ロシア、ウクライナの農地の汚染状況、ミルクや食料による住民の被曝状況、主要対策とその効果を記述した。

Cs137の放射能レベルが37kBq.m<sup>-2</sup>を上回る農地は、上述3カ国において466万haで、このうち99万haは185kBq.m<sup>-2</sup>を上回った。大半の汚染農地はポドゾル及びピートから成る低肥沃な土壌で、養分、腐植土が少なく、酸性、粗いローム質の砂で占められている。従って、放射性核種の土壌内可動性が高く植物による吸収が早いため、放射性核種による長期的な影響を深刻にする一つの要因であった。初期段階においては、I131が関心を集めミルクが内部被曝線量を増加させる原因であった。放射性ヨウ素と並び、放射性セシウム同位体、Zr95、Ru103、Ru106、Ba140、Ce141、Ce144も重視された。

1990年代初頭に、Cs137汚染レベル555kBq.m<sup>-2</sup>を土地の30%を超えるウクライナの農地が農業使用から除外された。影響を受けた地域では土壌の肥沃度を改善し作物や植物の放射性セシウム摂取を低減させようと化学的な対策が優先的に施行された。各対策の規模は3カ国で異なりどの対策を取るかが繰り返し見直され更新された。牧草地への対策は3カ国において大きな効果を上げ、飼い葉の汚染は1/10-15に減少した地域もあった。有効性は牧草の種類や土壌の性質に左右された。耕地に対しては、耕起、石灰散布、カリウム添加のような処置がなされた。最も効果を出したのは50-70cmまで深く耕起することであったが肥沃層が浅いため限定的な処置であった。既に汚染された家畜に汚染されていない(或いは汚染の少ない)飼料を与えると肉の汚染が軽減するため、3カ国では頻繁にこの対策が用いられた。ヘキサシアノ鉄酸塩(プルシアンブルー)は高効率の放射性セシウム結合体として飼料添加された。

1990年代半ば経済状況悪化に伴い事故対策が滞り耕地の生産性は低下し汚染製品割合が増加した。対策効果は1986-92年に最大に達し畜産物汚染レベルは徐々に減少した。汚染地域の対策でおさめた成功は大きかったものの、高汚染レベル、放射性核種移動が多いこと(特に湿ったピート土壌から)、対策規模縮小化、情報伝達の不徹底等から住民は主にミルクから甲状腺癌、その他の病気に罹った。土地の回復措置や食料の放射能軽減策としては、農地使用禁止、通常の耕作(事故1年目)、表土除去及び埋め戻し耕作、化学及び有機肥料添加、地表改良、乳牛飼育禁止、飼い葉の変更や清浄な飼料の利用、食料モニタリングなど広範な対策が取られたが、事故後20年経てもまだ基準濃度以上の食料を生産する広大な地域が存在し、1mSyを超える年間実効線量地域住民は数百万にもものぼることから、対策は2045-2050年まで継続する必要がある。

## 2-03

文献タイトル(原題)	Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by Cs137 after the Chernobyl accident – Report 2. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 y after the accident (1986-1997)
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後 Cs137 汚染食品摂取による内部被曝—報告 2 事故後 12 年間(1986～1997)のウクライナ田園住民の摂取線量
著者/所属機関(国)	Likhtarev I A, Kovgan L N, Vavilov S E, Perevoznikov O N, Litvinets L N (Ukrainian Acad. Technological Sci., Kyiv, UKR), Anspaugh L R (Univ. Utah, UT), Jacob P, Proehl G (GSF-National Res. Center for Environment and Health, Neuherberg, DEU)
掲載雑誌	Health Physics
発表年	2000

1996年の第1報告書では放射性セシウム摂取による線量の現象学的モデルを用い、北ウクライナの Rivne 州の成人住民のチェルノブイリ事故後6年間にわたる内部曝露を推定した。第2報告書に当たる本紙では、Zhitomir, Rivne, Kyiv 州の田園地帯住民約300万人の事故後12年間にわたる Cs134, Cs137 摂取線量を推定した。推定は、国のモニタリング拡大活動の一環であり、4400箇所から採取した個人が所有する牛の12万の乳サンプルと10万の住民から得た Cs137 測定量に基づき、2つの方法で線量評価を行った(図3)。一つ目の方法では土壤中と牛乳中の Cs137 汚染濃度に基づき「参照」線量を推定した。このような線量はウクライナでは一つの居住地の正式な推定量として使用され、対策決定、経済的な免除や財政補償を決定する上での指標となった。もう一つの方法では Cs137 体内負荷量の WBC 測定に基づき「実際」線量を推定した。実際線量は、より現実には則していると考えられており、事故後の対策、住民の自己制限レベル、住民の行動変化のような、線量に影響を与える全要因の時間変数を含意している。

1986年時点では事故が発生した時既に植物は成長していたため葉に放射性核種が直接沈着し、牛乳以外の食材が Cs137 摂取源であった。12年間に曝露した実際線量が 0.5mSv を超える住民は40%、5mSv 超は10%、50mSv 超は0.3%であった。全身計測に基づく個人の実際線量は一貫して(1986年を除く)参照線量より低かったものの、1987～1989年の1/3～1/4から1990年代半ばの1/1.5まで下降した。1987～1991年は他地域産食材の消費を促進する対策が遂行され、住民自身も自己管理を強化した結果減少した。1991年以降ウクライナの社会状況、経済状況が不安定であったこと、住民の地元産食材のリスクに対する考え方が変化し地元産食材を再び消費し始めたことにより対策効果は減少し、1987年以前の数値に戻った。

北ウクライナでは摂取による集団線量の90%が私的生産される牛乳によった。実際線量は参照線量より小さく、差は事故後にとられた対策の効果性に帰した。Cs134, Cs137 摂取による田園地帯住民の12年間の集団参照線量は13300person-Sv、集団実際線量は5300person-Svであった。従って、8000person-Sv が対策により阻止されたと評価した。現象学的モデルは単位面積当たりの Cs137 放射能と土壌-牛乳移行パラメータに正規化される組込み式(integrative)構想に基づく。このモデルは空間、時間を問わないと考えられている。

## 2-08

文献タイトル(原題)	Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture
文献タイトル(和訳)	重大放射線事故及び農業に及ぼす放射線学的影響
著者/所属機関(国)	Alexakhin R M, Fesenko S V, Sanzharova N I (Russian Inst. Agricultural Radiology and Agroecology, Kaluga Region, SUN)
掲載雑誌	Radiation Protection Dosimetry
発表年	1996

原発事故の影響を受けた、放射能汚染に曝される地域から得られた食品の消費は、人々にとっての主要被曝源になると思われる。と同時に、この消費経路は効率良く規制可能である。農作物上の規制、人々の内部被曝線量に係る特性、農業対策の効果は、前 USSR で起こった二大事故の経験を生かして分析されてきた。1957年の南ウラル(Kyshtym 事故)及び1986年のチェルノブイリ原子力発電所の事故、これらの両事故の影響を除去する目的で、農作物汚染レベル減少対策を現状に合わせながら考案、試験した結果、人々の線量負荷は低減された。これらの経験から、農作物への放射性核種移行を阻止する農業対策が、放射線安全上最も有効な手段であることがわかった。

Kyshtym 事故地域では、1957-1959年に農作物1万トンが処分された。6200haの地域が除染のために主に深耕法を採用し、放射性核種に汚染された表層土壌は深さ50cmまで掘られた。EURT(東ウラル放射能事故跡地)地域では、1958年には、農地から10万haが除外され、1958-59年に2万haの地域が日常的に耕作された。その結果としてガンマ線量比が減少し土壌から植物へのSr90移行が抑止された。

チェルノブイリ事故での放射性核種による環境汚染後には地元民が内部及び外部被曝を受けた。CIS加盟国民が事故直後の1年目に受けた総実効線量の内訳は内部線量45%、外部線量52%、生涯を通じて受ける線量の内訳は39%、60%の割合であった。内部被曝は、食物連鎖において放射性核種の可動性を決定づける汚染土壌の放射生態学的特徴に従属する。多くの場合、人々の外部曝露線量は高レベルの農地汚染だけではなく農地の使用方法や土壌特性にも関係する。事故後の主たる汚染食品源は、事故直後も長期的観点においてもミルクであることがロシア連邦地域の放射汚染状況評価により言及された。この経路による人々へのCs137移行は現在までに75-95%を占めた。ミルク以下、多い曝露経路は順に、肉、マッシュルーム、ベリー類、ジャガイモ、野菜、豆類と続いた。

農業方法、食の習慣、国民の習性、農業運営制限と対策、天候、日常の労働状況等が曝露を左右する。放射線量を低減するために事故の初期段階では厳しい制限を引き、後の段階では農作物の放射性核種蓄積量を低減することが非常に重要である。農作物の汚染低減は3つの要因、即ち、土壌-植物系での放射性核種のバイオアベイラビリティ(bioavailability)低減を決定づける自然のバイオ・ジオ・ケミカル(biogeochemical)過程、対策、放射性崩壊によって達成された。

2-09

文献タイトル(原題)	Countermeasures in agricultural production as an effective means of mitigating the radiological consequences of the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ原発事故の放射線学的影響の効果的緩和手段としての農業生産対策
著者/所属機関(国)	Alexakhin R M (Russian Inst. Agricultural Radiology and Agroecology, Kaluga Region)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

1957年の南ウラルでの事故と1986年のチェルノブイリ原発事故の二大事故の経験から農業対策研究が進展した。農作物保護対策では次の2つの方針が重要である。

1)汚染食品から取り込まれる人体の内部被曝を低減する対策:農地の土壌タイプ、作物の特性、国民の食習慣、農作の方向性、堆積する放射性核種の組成、に左右される。3種類の土壌による内部及び外部線量の差異を表2にまとめた。

2)土壌除染によって内部被曝線量を抑止する対策:チェルノブイリ事故後のように広大な地域が汚染した場合、コスト面、技術面両面で実施は容易ではない。

チェルノブイリ事故後農作物の放射性核種吸収が減少するように施行された対策は次のとおり2つに分類される。

1)土壌の肥沃度を増大させる対策、経済的に動植物の生産性を高める対策:耕作(汚染表土を希釈)、酸性土壌へのライミング、有機及びミネラル(特にカリウム)肥料施用、Cs137蓄積量が少ない農作物の栽培、人間の手を加えることによる天然牧草地改良、介入レベル未満の農作物加工(例えばミルクをバターへ加工処理)、基準値内に収まる生産物を最終的に確保するための家畜飼料の組織化。

2)農作物の放射性核種濃度を低減する技術を導入する対策:砂質土壌への粘土添加、ゼオライト、マイカ、モンモリロナイト使用、搾乳用家畜飼料へのシアノフェラート添加。

前述した中で効果の高かった対策は、牧草地改良、農地の化学的処理、肉畜に対する特別な食餌導入(屠殺前に汚染されていない食餌を給与)、農作物の選択、であった。肥料では特にカリウムがCs137との土壌-植物移行率の差により効果を上げた。作物、土壌の種類によりCs137移行低減には1.5-4倍の開きが現れた。窒素添加によりCs137の植物移行が増加してしまうこともあった。農地はCs137汚染レベルに応じて対策が取られ(表6)、植物のCs137蓄積量低減のためにCs摂取の少ない種が選択され栽培された(表7、表8)。植物のCs137蓄積量は事故後の時間経過に伴い牧草地(表9)、農地(表10)で低下した反面、30km圏内ではSr90植物吸収量はSr90を含んだ風雨により時間経過と共に増加した(図1)。

チェルノブイリ事故以降の農業対策と効果を表11及び12でまとめた。多様な保護対策の結果、Cs137介入レベルを超える農産物量は減少してきた(表13)。人間の経口被曝主要源であるミルク中のCs137減少は牧草中のセシウム減少によるものであった。内部被曝線量は約1/3に低下、土壌除染による外部放射線量はあまり費用対効果がなかったが、国民の総被曝線量は大幅に減少した。

## 2-10

文献タイトル(原題)	Evaluation of the impact from the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故による影響の評価
著者/所属機関(国)	Cigna A A (ENEA, Vercelli)
掲載雑誌	ENEA-RT (Energia Nucleare e delle Energie Alternative)
発表年	1992

チェルノブイリ事故当時、ICRP(国際放射線防護委員会)勧告(1978年)と欧州委員会規則(1984年)が多くの国々で使用されていた。ICRPは事故時だけではなく被曝源が管理下にある平時に対する勧告も度々行ってきており、一般人に対する年間実効線量上限値は5mSv/年(平均0.5mSv/年)、生涯にわたる年間実効線量上限値は1mSv/年(平均0.1mSv/年)と定めている。重大事故後の対策はこの原則に戻ることを目的とする必要がある。

事故後1年目の国別個人平均実効線量を図2に示した。ソ連は、領土が広大であること、線量が各地で大幅に異なることから5地域に分けた。事故対策は勿論各人各国で様々であったが、政府の反応としてはリスクと利益のバランスを考慮せず過大防護になりがちであった。隣国同士でも全く異なる対策がとられることもあり、対策に論理的な基準がないと人々に混乱を与えた。放射線防護には、経済的、社会的要因を考慮しながら放射線低減を図るよう、実施可能な対策を最適に用いなければならない。表4にアルゼンチン、イタリア、北欧、英国、米国における一人1Sv当たりの現在の経済損失をまとめた。顕著な差異は見られないため、類似の対策がとられていると推測できる。経済損失と違い健康への影響は多岐にわたり調査が困難であるが、1980-1989年のイタリアにおける月ごとの出生数をまとめた(図3)。顕著な違いはないが1986年後半と1987年前半に出生数は低下している。前者は中絶の結果、後者は事故後の妊娠を回避した結果かもしれない。健康上の他の影響については推定不可能であるが、心理的な問題が多くの家族の生活習慣に影響を及ぼした。

牧草や葉菜中の放射性核種の実効半減期はヨーロッパで一致していたため、減少のメカニズムは個々の地域条件から独立しているという仮説を立てることができた。1957年英国 Windscale 事故後、西 Cumberland で測定されたミルクと牧草中の Cs137 の半減期は減衰の早いもので9日、I131は5-6日であり、チェルノブイリ事故後も同じであった。主要核種の実効半減期は10-20日であった(表7)。放射性核種除去において動物の代謝が重要な機能を果たし核種の化学的性質はあまり重要ではないと解釈できる。イタリアの60年代の放射性降下物調査により、食物中の汚染レベルを予測する方法は確立されており、事故後10年間の Cs134、Cs137、Sr90 が計算された。表11に社会への情報伝達に係る問題解決策(情報の統一化、情報の自由公開、最大許容基準の現在値及び最適値、研究施設の認可)と、その長所及び短所をまとめたがここで解決策を提案する意図はない。それは政府当局の務めである。チェルノブイリ事故から学んだことは、大きな原発事故によって嚴重注意区域外で国民の健康を脅かすような事項は存在しない或いは少ししか存在しないということである。

## 2-11

文献タイトル(原題)	Corroboration of assessments of environmental contamination in the USSR due to the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	ソ連のチェルノブイリ事故環境汚染評価の確証
著者/所属機関(国)	Cooper E L (Atomic Energy of Canada Ltd., CAN)
掲載雑誌	日本アイソトープ・放射線総合会議論文集
発表年	1992

IAEAは1990年に国際チェルノブイリプロジェクトを立ち上げ、5つの調査班(Task)を組織した。Task 2は環境影響を調査対象とし、ソ連の科学者によって行われた環境汚染評価をほぼ確証した。初期段階では深さ5cm、現在では土壌の種類によっては最大深さ40cmでサンプリングしていること、地下水のサンプリングに汚染の可能性があること、研究設備の更新が必要であること等問題点もあるが、食物、環境サンプルのサンプリングと分析において良好に組織化、品質管理が行われている。概ね評価方法は適切であり、Cs137及びCs134の分析結果は放射線防護の目的から見て十分な質のものであると結論付けた。Sr90の分析には問題点もあるが、Cs137と同レベルの堆積量がある30km圏内を除くほとんどの地域では、Sr90はセシウムよりも影響の少ない放射性核種であるため、評価全体に影響を及ぼすものではなかった。

ソ連は広範囲で適切に整理された環境汚染データバンクを有している。Seibersdorfで組織された研究施設間の相互校正が実施された結果、ガンマ線分析で得られた結果の差異は小さかった(<25%)。差異の大きい分析結果もあったが参加施設全体から見れば少数であった。ガンマ放射体核種に対しては過小評価が多かったが、食物と環境サンプルのCs137及びCs134分析データは良質であった。Sr90及びPu239に対して放射化学分析されたサンプルの標準偏差は通常より大きかった。標準偏差が大きい結果は低い結果に打ち消されるため全体傾向を示すことは難しい。Sr90とPu239を過大評価する傾向が見られた。放射化学分析に問題を有する研究施設が多いと思われた。屋内外線量測定に関しては、最大線量は人工物のない場所(undisturbed areas)、最小線量は庭、土、建物のある場所(disturbed areas)、アスファルトであり、屋内の方が低線量であった。屋外の主要核種はCs137及びCs134であり、Sb125及びRu106は微量であった。

カナダの放射防護の理念と現状についても述べられた。カナダではICRP(国際放射線防護委員会)の勧告に常に従っているものの実施が遅いこともある。例として、ICRP26の勧告を反映する原子力管理規制(the Atomic Energy Control Regulations)の修正がまだ制定途上にある。しかし、カナダの規制母体である原子力管理委員会(the Atomic Energy Control Board)はプロセスを早めたいと願っており、1991年にICRP60勧告を取り込むため規制の変更を提案した。ICRP60との違いは、1995年までに原子力関連業務従事期間5年を削除し代替として20mSv上限値を盛り込むことであり反対の声も上がっている。

## 2-12

文献タイトル(原題)	Chernobyl fallout: internal doses to the Norwegian population and the effect of dietary advice
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故・フォールアウト:ノルウェー国民の内部被曝線量と食の勧告効果
著者/所属機関(国)	Strand P, Selnaes T D, Boe E, Harbitz O, Andersson-Sorlie A (National Inst. Radiation Hygiene, Osteras, NOR)
掲載雑誌	Health Physics
発表年	1992

食物分析と全身線量測定を用いて国民の放射性セシウム摂取量及び被曝線量を評価した。国民の放射線量は何を食べているかに従属する。淡水魚、ミルク、トナカイ肉が摂取主要源であった。食に関する勧告、農業上の除染対策により国民の被曝線量は減少した。

定期身体測定は、オスロ市民、Sel(ノルウェー東部)市民、農業-狩猟従事者、Sami のトナカイ養畜従事者の4群に分類した。4群のうち最低であったオスロ市民群の1987年の放射性セシウム平均経口摂取量は11,000Bqであり、ミルクが主要源であった。次に低いSel市民群の平均摂取量はオスロ市民群の2倍の25,000Bq、1988年以降順に31,000Bq、25,000Bq、14,000Bqであった。この全身測定を元に概算した4年間の放射線量は順に0.15、0.11、0.10、0.06mSvであった。放射性セシウム摂取量の半分以上が淡水魚及びミルク消費に起因するものであった。オスロ及びSel市民群の調査に基づいて、国民の放射性セシウム年間平均摂取量は事故後1年間で11,000-25,000Bqであったと想定できる。農業-狩猟従事者群に関しては、摂取量が3年間で順に69,000Bq、116,000Bq、107,000Bq、概算線量は0.4、0.6、0.7 mSvであった。摂取量の90%が淡水魚、トナカイ肉、ミルク由来であった。Samiのトナカイ養畜従事者は、摂取量が127,000、234,000、190,000、90,000 Bq、線量が0.9、1.7、1.1、0.9mSv、摂取量の90%がトナカイ肉由来であった。成人の勧告上限値80,000 Bq y<sup>-1</sup>を越えている年があったため、農業-狩猟従事者及びSamiのトナカイ養畜従事者群の40-80%は食習慣を変えた。Samiの養畜従事者群の40-62%がトナカイ肉及び淡水魚摂取を減らし、農業-狩猟従事者群の70-79%が淡水魚の摂取を減らし、Sel市民群の25-46%が淡水魚、羊肉、トナカイ肉のような食品消費に注意を払った。従って、被曝量減少という結果になった。Samiのトナカイ養畜従事者群は、食習慣を変えなければ経口摂取したであろう線量の25~14%、農業-狩猟従事者群では50%しか摂取しなかった。50年後のSamiトナカイ養畜従事者被曝線量は対策無しでは100-200 mSv、対策有りでは20mSvと概算している。農業-狩猟従事者は、対策無しで6-12mSv、(淡水魚消費を考慮するだけの)対策で5-9mSvと推定している。80,000 Bq y<sup>-1</sup>を超える摂取の割合は1989年まで増加傾向にあり1990年に減少した。

被曝線量は食調査結果から推定することも可能である。全身測定に基づく推定線量よりも食試験結果から推定する線量の方が2-4倍高かった。原因の一つとして、調理中に減少する線量を経口摂取量の計算に含めていないことが挙げられる。事故後3年間の相関係数は0.71であった。

## 2-13

文献タイトル(原題)	Efficiency of measures aimed at decreasing the contamination of agricultural products in areas contaminated by the Chernobyl NPP accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ原子力発電所事故汚染地域の農産物の汚染減少を目的とする対策の効果
著者/所属機関(国)	Prister B, Loshchilov N, Perepelyatnikova L, Perepelyatnikov G, Bondar P (Ukrainian Scientific Research Inst. Agricultural Radiology, Kiev)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1992

チェルノブイリ事故の放射性核種により汚染されたウクライナの Polessye 地域でとられた農業対策の結果を考察し、その効果を解析した。

野菜、特に葉類の消費及び販売禁止、牛の放牧、事故後に行った飼料の投与禁止、これらの禁止処置は農村の人や牛を保護するために放射線状況把握前に実行された。牧草或いはサイレージ(貯蔵飼料)消費に起因する家畜の放射性核種摂取低減のために、放射性核種の植物移行を決定づける土壌パラメータに影響を与える経路の決定、耕作、施肥或いは農業技術改善による牧草地改良は、放射線状況が現状に戻るまで定期的な実施された。

ヨウ素の危険性は平均で 45 日続いただけで以後は牛乳から検出されず、Cs134、Cs137、Sr90 (セシウムより少量)が内部被曝線量の原因となった。1987 年以降は、汚染土壌の農業化学的特性と放射性核種の植物移行特性分布が農作物汚染予想源となった。

植物の Cs137 移行係数には土壌の pH タイプによって 3-29 倍の差があった(表 2)。植物種、これに見合う土壌特性、対応する汚染レベル、これらを的確に選択することが効果的な対策の一つであることは明白である。同種(species)ではあるがその中の種類(varieties)によって作物中の放射性核種蓄積量が異なる(表 3)ため、作物の種類(varieties)を適正に選択できれば簡単且つ効果的、コストのかからない対策となる。Polessye 地域はポドソル土壌であり、深さ 20cm しか耕起できず通常チゼルプラウ(chisel)で耕起する。チゼルプラウは土を反転させいため即ち土の移動が少ないため穀物への放射性核種移行を増大させる(表 4)。多くの調査でカリウムが植物の Cs 摂取低減に効果的な元素であることが示されてきた。窒素添加は穀物の Cs137 蓄積量を 3 倍まで増加させるが、窒素、リン、カリウム合成或いは複合肥料(リン、カリウム含有量を窒素よりも多くする)散布は効果を大きくする。石灰添加は穀物の放射性核種含有量を減少させ収穫量を増加させる(表 5)。Cs137 移行係数は、鈹質の芝-ポドソル土壌よりも泥炭、泥炭湿地土壌の方が最大 100 倍大きい(表 6)。自然の草地の生産性を高めることで 1/3.5 まで牛乳への Cs137 移行を低減する(表 7)。石灰とミネラルを施肥後放牧(milling)、植草を行い草地を再生させた。無機土壌よりも有機土壌のほうが土地再生効果は高い(表 8)。

高いレベルまで放射線防護を達成するためには、統一複合体系として対策を実行すること、そして放射線状況の現状の動向に即した対策を遂行すべきことは明白である。

## 2-16

文献タイトル(原題)	Estimate of dose reduction effects due to countermeasures after the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故対策による線量低減効果の推定
著者/所属機関(国)	Mueck K (Austrian Research Centre Seibersdorf, AUT)
掲載雑誌	Radiation Protection Dosimetry
発表年	1991

オーストリアの事故対策、線量低減効果を理論的に算出した。予想どおりミルク及び直接汚染された食物に関して取られた対策で大きな効果を上げた。市場では温室栽培かどうか等栽培方法の区別はつかないため全面的に新しい野菜(葉菜)販売禁止、牛へ新しい草給餌禁止、酪農場での低放射能ミルク選定、井戸水飲用禁止、鹿の狩猟禁止、導入介入レベルを超えた食材販売禁止、屋内に居るようにという勧告がなされた。

対策による線量低減効果の比較を図3に示した。数値には、少人数ではあるがおそらく平均より被曝量の多い人口の線量低減効果が反映されていないが結果を変えるほどではないと思われた。

明らかに、成人の線量低減最大効果は3つの対策、(i)葉物販売禁止(38%)、(ii)牛への牧草給与禁止(8%)、(iii)飲用目的の低放射能ミルク選別(28%)、によるものであった。他の全対策による線量は26%減少しただけであった。1歳児に対する上記3対策の効果はより顕著であり、順に26%、38%、29%の減少効果を出し、他の全対策による減少効果は6%だけであった。牛に、新鮮ではない事故前の干し草を与えたことによりI131線量の大幅な減少効果を生み出した。

放射性核種別減少効果については図4に示した。I31の線量減少は明白であり、全低減量に対しI131低減量は成人が36%、5歳児が73%、1歳児が75%、事故後2、3週間で達成された。この結果から、対策を初期段階で実行することの重要性がわかる。特に成人よりも倍の減少効果があった乳幼児において重要である。前述したように、1歳児は最初の2、3週間にI131だけで全線量のうち75%の減少効果があり、全放射性核種による減少効果は85%であった。また、対策を施さない場合予期される成人被曝線量の30%を対策により低減できた。子供の場合効果はもっと大きく、1歳児で55%の低減、このうちの94%が3対策に起因した。Mueck(参考文献21)によれば事故後1年間のヒトの全実効被曝量は、成人が0.53mSv、5歳児が0.28mSv、1歳児が0.47mSv、このうち経口摂取線量だけを見ると、成人が0.46mSv、5歳児が0.21mSv、1歳児が0.40mSvであった。

顕著な効果は多消費食品(ミルク、野菜、肉)で得られただけであり、低摂取食品(羊やヤギの乳、猟獣や猟鳥、井戸水、ホエー豚)は、高放射能濃度の食材でも効果は少なかった。ヒトの一生涯という長期的な観点から対策効果を考慮したとしても、例えば汚染された下水汚泥肥料を添加することに関する対策は効果が少ないと思われる。このような事故の後では、費用対効果が低い場合、特に乳児の暴露を低減するために対策の取捨選択が必要である。

## 2-18

文献タイトル(原題)	Review of the impact of a large scale accident on a remote far field
文献タイトル(和訳)	大規模原子炉事故が遠隔地に及ぼす影響のまとめ
著者/所属機関(国)	Conti L F C, Azevedo H L P, Vianna M E C M, Ferreira L M J B (Brazilian Nuclear Energy Commission, Rio de Janeiro, BRA)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

チェルノブイリ原発事故後にブラジルで取られた放射線防護策や社会学的考察について述べた。

ブラジルでは事故の第一報を受けた直後から対策を開始し、国際線航空機のスミア試料測定がなされた。その結果検出量は微量であり、国内線からは検出されなかったが、国境に小規模な空気監視網を設置し、リオデジャネイロの農場で採取したミルク試料を分析した。しかしこの対策は検出を予期してなされたものではなく、国民へ実際のデータを提示するための国内状況説明材料として実施された。自然発生を超える異常な増加はなかった。最初の検出は1986年5月にブラジルに帰着した船体と積荷からであった。Cs137 125Bq/m<sup>2</sup> 及びI131 10Bq/m<sup>2</sup> が船体から検出された。汚染の可能性を心配するブラジル国民に情報伝達するためにこれらの処置は有益なものであった。

事故対策第2段階としては、直接汚染されたヨーロッパからの輸入食品汚染レベル管理が必要であった。1986年8月から1989年までに3700の食品サンプルを分析し、輸入ミルクと肉に重点が置かれた。粉ミルクからは最大2400Bq/kg、肉からは最大230Bq/kgのCs137及びCs134が確認された。輸出する牛肉関連商品にも留意した。

米国連邦官報(Federal Register)を参考に、導入介入レベル(DIL)として、粉ミルクにはCs137 3700Bq/kg、その他にはCs137及びCs134 600Bq/kgが設定された。1年間ミルク1Lと肉300gを摂取すると仮定した結果、実効線量は50mSvとなり、EC提唱値とも合致した。しかし、ブラジルは事故影響を直接受けた訳ではないのだから汚染製品を禁止すれば良いという意見が多く、DILは一般に受け入れられなかった。また、もっと低い数値を採用した国が多かったこと、ブラジルは粉ミルクに対して3700Bq/kgと定めたがECは液体ミルクに対してDILを370Bq/kgと決定し数値が一桁違うことも混乱を招き受け入れられない要因となった。

表1には1986年5-8月(袋詰め日基準)にアイルランドから輸入した粉ミルクのCs137推移量を示した。袋詰めに先立ち保管していたと思われる6月分から1500Bq/kgの濃度が出ていることは興味深い。サンプル収集時に袋詰め日基準としても意味がないことを示す。もう1つの重要輸入品である肉の国別汚染状況は表IIにまとめた。輸出品に関しては、ブラジルも事故後検出状況に関する証明書を添付するよう求められたが、問題が発生したのはコンビーフ産業の二次製品であり輸入肉を製造工程で使用した牛肉エキスだけであった。

上述したようにブラジルではDILが広まりにくかった。特にブラジルのような原子力産業を保有していない他の国々へ発信するための信頼性を有する情報を一括収集し、事故と影響及び拡大性の包括的な評価を行う、承認された国際機関の必要性を示唆していた。

## 2-19

文献タイトル(原題)	Role of the United States Food Safety and Inspection Service after the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ原発事故以降の米国食品安全検査局の役割
著者/所属機関(国)	Engel R E (Food Safety and Inspection Serv., United States Dep. Agriculture, Washington, D.C., USA), Randecker V, Johnson W (Food Safety and Inspection Serv. Science, United States Dep. Agriculture, Washington, D.C., USA)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

事故後に米国農務省食品安全検査局(FSIS)は輸入肉類の影響を評価する監視プログラムを実施した。事故の性質に関して確保でき始めた情報を元に、Cs134、Cs137、Sr89、Sr90、I131の5核種のための監視を決定した。1986年5月に全セシウム(Cs134とCs137の合計)に対する介入基準は2775Bq/kg、I131に対しては56Bq/kgと設定された。1988年10月に監視プログラムが終了するまでに、ヨーロッパ14カ国から輸入した肉製品から抽出した6195試料のうち3702試料の放射能濃度が自然放射能を超えていた(表II)。最大検出値を有する国と自然放射能以上の試料数を有する国とは必ずしも一致しなかった。9カ国の肉類試料は37Bq/kgを超えていた。ヨウ素及びストロンチウムの検出結果は自然放射能基準と変わりなかった。

2775Bq/kg値は緊急防護措置ガイドライン(PAG)を用いて設定された。国民の健康を保護する目的で米国で確立されている2桁の安全幅を持たせた方が適切と考慮された。この安全幅100を本来設定されている安全幅に組み込んで、当初は277Bq/kgという介入基準を作った。しかし、FSISは1986年の調査から、米国では肉消費量が考えていたよりも低量であるという予備データを得て、もっと少量であるならば介入基準が高くとも良いという結論に至った。1986年10月、セシウムに対する介入基準値は、全食品に対する米国規制対応基準値と合致するよう2775Bq/kgから370Bq/kgへと下げられた。

1987年6月にブラジルでヨーロッパ産の牛肉を用いて製造した牛肉エキスからセシウムが検出されてからは1987年8月まで米国市場流入防止処置をとった。

1988年10月までに、試料に含まれていたほとんどのセシウム濃度は自然放射能と区別できないレベルにあった。従って、費用対効果がないためFSISはヨーロッパから輸入した肉類試料収集を中止し、別の優先事項に費用を回すことにした。

事故後FSISが取った対策方針は、(1)米国が提唱する暫定的なPAGを用いた現実的な介入基準を設定する、(2)放射性核種の最大認可摂取量と食品消費データとの両方から介入基準を計算する、(3)5核種に対する輸入肉製品の監視、抽出、試験をする、(4)国民の健康状態に合わせて定期的に介入基準を評価し改正する、(5)規制中の対策を評価し有益性を判断し続ける、であった。この後、WHOは食品に対し導入介入基準を発行した。国際食品規格(Codex)委員会は国際貿易管理を担っていくことになるであろう。従って、食品の安全を守る役人は、今後、基準ガイドライン設定に務め夫々の母国で消費される食糧を監視するだけでなく、国際貿易される食糧の監視も監督し、全ての国々の利益のために務めを果たしていくことになるであろう。

2-22

文献タイトル(原題)	Chernobyl nuclear accident, April 1986: Repercussions on the food chain and on man. Extract from EUR 11226 report
文献タイトル(和訳)	1986年4月のチェルノブイリ核事故:食物連鎖及び人への影響、EUR11226報告書の抜粋
著者/所属機関(国)	Cazzaniga R, Dominici G, Malvicini A, Sangalli E (Joint Research Centre, Commission of the European Communities, Ispra (VA), ITA)
掲載雑誌	Toxicological and Environmental Chemistry
発表年	1989

チェルノブイリ核事故のため、欧州委員会の Ispra 共同研究センターの放射線防護部門は、緊急事態に的確に運営管理を行う目的の下有益で必要な要素の採取、測定、処理、評価を実施する対策本部を組織した。本紙では、北イタリア Ispra の主要汚染媒体である地上レベルの大気、地面の沈着物、草、ミルク中の放射性核種濃度、国内各地の住民の人体内に取り込まれた放射性ヨウ素、放射性セシウム濃度の監視結果を示し、1960年以降の測定結果と比較した。

図 1、2 に地面レベルの大気において 1986 年事故直後に測定した Cs137、I131 濃度の 24 時間の挙動と降雨量(mm)を示した。両核種とも、雨の日は浄化作用により大気中の放射能濃度が低下した。5月の Cs137 濃度は 1963年に比べ2桁以上であった(図 3)。I131 濃度の 1/10 ではあったが、Cs134 と Cs137 濃度は驚異的な量が即座に検出された。

地面に沈着した主要な放射性核種は、Be-7、Sr89、Sr90、Ru-103、Ru-106、I131、Cs134、Cs137 であった。1986年5月の Sr90/Cs137 比は 1958~1982年に比べると 1/30 であったため、揮発性の高い放射性核種だけが存在したと推測された。1986年5月の Cs137 沈着量は 1963年の4倍であった。事故前のフォールアウトは Sr、Cs、Pu であったが事故により放出されたのは Cs、I であった。

大気中の放射能や雨水により地面に沈着した放射能は食物連鎖の入り口である植物の葉表面に残留した。草や葉菜の汚染レベルから人が摂取する線量を推測できた。植物や野菜の生長に伴い放射性核種濃度は減少した。野草中での環境的半減期は I131 が 4.6 日、Cs137 が 13.5 日であった。放射性ヨウ素(I131+I132)は1週間で 1/5 までに減少し、放射性セシウムは 35 日で 1/100 までに減少した。従って、野菜中の放射性ヨウ素、放射性セシウムはほぼなくなった。

牛乳中の I131 濃度は5月初めは高かったが6月には微量となった。Cs137 濃度は5月末から6月初めにかけて最大であったが徐々に減少し7月以降一定となった。北イタリアでは春が遅かったため野草の生長が遅くなり牛は貯蔵飼料を食していたため、5月前半に野草中の放射能濃度が高かったにもかかわらず牛乳中の I131 濃度、Cs137 濃度は低かった。牛乳中の Sr90/Cs137 比からも揮発性の高い放射性核種が多く存在したことが示された。

人体に取り込まれた放射性ヨウ素(I131)は甲状腺の濃度が5月3日に最大となった。放射性セシウム(Cs134+Cs137)摂取は10月から一定となり始めた。

チェルノブイリで放出された放射性核種から北イタリア住民が被曝した線量は自然放射線で被曝する線量範囲内での変動に相当した。

## 2-25

文献タイトル(原題)	Consequences of the reactor accident in Chernobyl in the Federal Republic of Germany: Environmental contamination, radiation protection measures, radiation risk assessment
文献タイトル(和訳)	西ドイツにおけるチェルノブイリ原子炉事故の影響:環境汚染、放射線防護対策、放射線リスク評価
著者/所属機関(国)	Kaul A (Federal Health Office, Neuherberg/Munich, DEU)
掲載雑誌	Environment International
発表年	1988

チェルノブイリ事故による西ドイツ国内放射性汚染の時間的経過、地域差の大きい土壤汚染状況を概観し、被曝線量推定、自然放射線との比較、後発的影響のリスク評価を実施した。閾値より十分低いリスク評価結果であることを述べた。

大気、雨、土壌、水道水、植生、食材に関する放射能濃度測定結果を示した。事故直後に南バイエルン州で発生した雷雨のため、土壌及び植生のベータ線量とガンマ線量が急激に増加した。主にI131、Te132に起因して、ミュンヘンでは数分間に0.08(土壌からの自然放射線と宇宙線による数値)から1 $\mu$ Sv/hへと増加した。事故後のCs137による国内土壤汚染状態は地域差があった。バイエルン州南東部は40kBq/m<sup>2</sup>以上、ドナウ川南部では約20kBq/m<sup>2</sup>、ドナウ川北部は5kBq/m<sup>2</sup>未満であった。ミュンヘンでは、I131で葉菜が最大20kBq/kg、ミルクが最大1kBq/l汚染された。

ドイツ放射線防護委員会の勧告に基づき、子供の甲状腺線量を30mSvに制限すべくI131 500Bq/l超のミルク、250Bq/kg超の葉菜は販売禁止とされた。食物消費量から算出されたCs137実効線量は0.6mSvであったため、Cs137に関する食材制限は勧告されなかった。後日欧州委員会は食材のCs134、Cs137汚染限界値を、ミルク、乳製品、乳児食品に対し370Bq/kg(Bq/l)、他の食物に対しては600Bq/kgと設定した。

国民が現在そして将来吸収する線量を放射線生態学を用いて地域ごとに評価した。

自然放射線と、事故起因の放射線量を比較する方法、疫学試験によるリスク因子に基づき後発的影響を定量化する方法、2つの方法を用いて、甲状腺癌、胎芽、胎児、遺伝的影響、総合的な身体的リスクについて評価がなされた。事故の影響による国民の実効線量は上限2mSvと想定され、甲状腺癌は2%の増加を見込んでいる。広島、長崎の研究結果によれば50mSvの急性被曝が障害閾値である。遺伝的欠陥のある新生児出生率は2~3%と推定された。2mSvが原因となり癌死亡率は0.002%増加すると見込まれるが、現在の国民癌死亡率は20%である。

事故1年目の臓器線量は、自然放射線起因の平均年間線量の半分以下であった。事故のフォールアウトによる生涯曝露線量は自然放射線量の1~5%であった。高汚染地域(ミュンヘン地域)の子供への影響として、甲状腺癌による死亡が100万分の1増加するという結果が、治療による曝露を受けた子供の疫学的研究からのリスク因子に基づき数学的に導出された。発達障害に関しては閾値をかなり下回る線量であった。動物実験に基づき数%の自然突然変異率が数学的に算出された。

2-28

文献タイトル(原題)	Ein Jahr nach Tschernobyl: II. Aufgaben der Veterinarverwaltung im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Reaktorunfalles
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ後の1年:II 原子炉事故の影響との関連における獣医学的管理の課題
著者/所属機関(国)	Grove H-H
掲載雑誌	Archiv fuer Lebensmittelhygiene
発表年	1987

本第2報告書では、チェルノブイリ原子力発電所事故後にドイツの獣医師官が観察してきた重要な職務をまとめた。1986年12月19日に議会は「放射線汚染に対する国民の防護(放射線防護予防)を承認するための法」を通過させた。この法により、事故後国内で様々な規定に則っていた状態から食品の放射能汚染限界を統一決定するように変化した。ドイツ政府の放射線防護委員会の勧告により、牛乳及び新鮮な乳製品中のヨウ素131含量のみが規制され、その他の放射性核種又は他の食品に対する規制はなされなかった。従って、獣医師官の主要な職務は消費者に助言を行うことであった。放射線による食品の汚染について警告を発した。的確な助言を与えるために、獣医師官は放射線学や放射生態学の基礎訓練を受け、防護委員会の勧告に対して適切な解釈をするべきである。

放射線学の語彙や基礎知識について言明した。1)放射線学上の専門用語に関する理解:人間に対する放射線作用を評価する次元として「実効線量」(mSv 又は mrem)がある。放射線の影響を定量化することで、比較、リスクの評価が可能となる。2)人間が回避できない放射線汚染に関する理解:少量の発癌性を有する低い放射線量の領域では直接の評価はできないが、高い放射線量から導かれる仮定で評価することは可能である。現在ドイツでの癌リスク(致死的な自発的癌発生率)は20%であり、チェルノブイリ事故により20.01%に増加すると評価はできるが、疫学的に追跡することは不可能である。3)食物及びそのバイオアベイラビリティにおける放射性核種移行に関する理解:生物体に対する放射線の影響は、外部放射線曝露及び放射性核種の取込みに細分化でき、外部放射線ではアルファ線及びベータ線は皮膚を深く透過しないため、ガンマ線の影響だけに限定できる。他方、吸入、経口摂取による取込みに関しては3種類の放射線全てが有機体内で作用を及ぼす。生物体は放射性元素と安定元素を区別しないため同じ代謝経路をたどることになる。獣医師官の見解によれば摂取経路は着目すべき点である。一つのフォールアウトから、植生、土壌、水系(湖、小川)に沈着、土壌から飼料作物へ、飼料から動物由来食品(乳、肉、卵、蜂蜜等)へ、と様々な食物連鎖の中で移行が発生する。フォールアウトの65%以上が茎葉に沈着し表皮に吸収された。根吸収は少量であった。放射線防護委員会の見解によれば事故のフォールアウトによるヨウ素131の影響はあまり大きくなかった。

助言の他には、関係機関と協力し共同作業を行った。農家、酪農家、屠殺業者、食肉検査担当、狩猟者、猟師等との間断ない連携により消費者の健康を保護した。とりわけこのような調整措置により500Bq/LのI131を含むミルクの摂取を阻止できた。1986年末～87年初頭にかけての放射性セシウムの集中摂取をも未然に防止した。

## 2-36

文献タイトル(原題)	An example of rehabilitation strategies for radioactive contaminated areas in Belarus
文献タイトル(和訳)	ベラルーシの放射能汚染地域に対する再建対策の一例
著者/所属機関(国)	Firsakova S K, Zhuchenko Yu M (Res. Inst. Radiology, Ministry of Emergency Situations, Gomel, BLR), Voigt G (GSF, Neuherberg, DEU)
掲載雑誌	Journal of Environmental Radioactivity
発表年	2000

CIS 加盟国の個人放射線量上限は 1mSv/年である。1995 年に個人線量が 1mSv/年を超えた地域であるホメリ州の Chechersk 地区を調査し、線量全体のうち食物消費がもたらす影響を推定し減少させる手段を提案した。

1994 年の Chechersk 地区住民の平均個人線量を概算した。この地区の 113 村のうち 90 村では Cs137 平均個人線量は 1mSv/年未満、残り 23 村のうち 10 村の個人線量が 1mSv/年に減少するには何の対策も施さない場合 2000 年まで待つ必要があると予測される(表 3)。23 村での平均個人線量は最大 80%が牛乳に起因する線量であるため、Cs137 内部線量を減少させるには放牧用草地の根本的改良が有効である。改良対策を施行する前後の牛乳消費から生じる内部線量を比較した(表 4)。Cs137 平均汚染レベルが 405kBq/m<sup>2</sup>の牧草地を改良した後に収穫した草を 5 年間牛の食餌として使用すると、牛乳消費による線量が 75%低減され、個人線量は 0.98mSv になり上限を下回ると予測される。

Chechersk 地区産の生産物は地元で消費されるとともに非汚染地域を含めた他地域にも 70～90%が輸送される。生産物の放射能の 9 割は Chechersk 地区内で家畜(主に牛)の飼料中の放射線量となり、1 割の生産物に含まれる放射能が 1995 年の集団線量の原因になったと予測した。集団線量のほぼ半分は牛乳が原因であった(表 6)。改良した牧草地を使用しない私有農場の牛乳中の放射能レベルは高いことが多いため対策が必要である。耕作、施肥等の土壌対策を施しても他地域へ輸送される線量のうち 22%しか低減しないとの予測に反し、実際は輸送される牛乳、肉製品から生じる線量の 40%を低減する。牛乳をバターに、穀物をエタノールに、ジャガイモを馬鈴薯澱粉(starch)にと加工を行うことで輸送線量の減少は増加する。

放置した汚染地域を再生し、個人線量を 1mSv/年未満に低減するためには、放射生態学的に実際の状況を把握し、対策により予測される有効性を分析することが必要である。再生には、農地の生産性、土壌に従属する放射性核種移行率、生産される作物の種類と生産量、生産物の地元での消費量と輸送量が関連する。牛乳中の Cs137 放射能濃度が現在も国の介入レベル 110Bq/l を超える 23 村に対しては、対策を施すことにより個人線量を 1mSv/年未満に減少させることが可能と示された。従って、農地や居住地として再生することが可能である。私有農家への土壌対策は経済的にも効果があり個人線量に大きな影響を及ぼすが、集団線量、輸送線量への効果はあまりない。逆に、汚染地域で生産された食材の加工は集団線量を減少できるため、加工産業が汚染地域再生の一つの重要な鍵となる。

2-37

文献タイトル(原題)	Evaluation of countermeasures in agriculture and food processing
文献タイトル(和訳)	農業と食品加工における対策の評価
著者/所属機関(国)	Leising C, Wirth E (Inst. Radiation Hygiene of the Federal Health Office, Neuherberg, DEU)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

農畜産物の汚染を抑制する目的でとられる原発事故後の様々な対策について論じた。食物汚染低減には4つの手段、廃棄、貯蔵、農業技術の追加適用、産業加工使用がある。経口摂取量を低減するために、食品生産者や加工業者、政治的決定を下す人に向け多角的に提案を行った。対策を決定する前に、実施可能な対策夫々の達成できる低減線量を推定すること。国民の習慣を考慮すること。各対策について汚染低減効果と経費を評価し、状況に応じて適切な対策を選択する方法を述べた。

廃棄は、長寿命の放射性核種により汚染が深刻な食材や貯蔵できない食材に適している。汚染された植物のある土地からの植物生産物は収穫する代わりに地中に埋めて廃棄する。埋めると植物の放射能は埋めた層に散在し希釈される。畜産物の汚染は適正な給餌や屠殺で阻止でき、肉廃棄処分は緊急な場合のみの処置である。生産者への補填費用、助成費用を考慮しなければならない。

貯蔵は短寿命の放射性核種で汚染され貯蔵可能な食材に適している。長寿命の放射線核種汚染でも、生物学的半減期が短く非汚染飼料がある場合には有効である。コスト面では貯蔵に要する費用、貯蔵場所への輸送費を考慮する。缶詰め加工は容易な貯蔵方法である。貯蔵できない葉菜や家畜に対しては収穫や屠殺の延期を行う。放射性 I131 は2週間貯蔵することで30%放射能を低減できる。

直接の沈着による汚染を抑制するために、農業技術を追加する処置もある。汚染が想定される場合、農業従事者に農産物や飼料の収穫を早めるよう勧告する。温室や家畜小屋を遮蔽する。これらの対策は費用を要さずフォールアウト沈着直前の予防策として有効である。スプリンクラーで作物を洗浄する。深耕、施肥を行い放射能を希釈する。栽培する作物種を好適に選択する。農地を食物栽培以外に用途転換する。非汚染飼料を投与する。肉やミルクの汚染を防止するために、アルギン酸カルシウム、ベントナイト、ヘキサシアノ鉄酸カリウムのような、ストロンチウムやセシウム吸着剤を家畜に投与する処置により胃腸管の放射能吸収を抑制できるが費用はかさむ。アルギン酸は牛、羊、豚には有効であるが、ストロンチウムが鶏の骨に蓄積した場合には蓄積量を低減しなかった。農業従事者が対策を勤めて実行できるようモチベーションを与え適切に指導する必要がある。

乳製品製造は短寿命放射性核種に有効である。飲用に使用するために汚染乳を非汚染乳と交換する場合貯蔵費用はかからないが輸送費を要する。アルコール、油、スターチのような貯蔵が容易な生成物製造へ利用目的を変更する処置が可能である。汚染飼料は、肉畜、乳畜ではなく繁殖用の家畜に投与する。高汚染の副産物の除染や加工を施す場合は格別注意を払わなければならない。

2-38

文献タイトル(原題)	Countermeasures used in the Ukraine to produce forage and animal food products with radionuclide levels below intervention limits after the Chernobyl accident
文献タイトル(和訳)	茎葉飼料及び畜産物の放射性核種レベルを介入レベル以下にして生産するためにチェルノブイリ事故後にとられたウクライナの対策
著者/所属機関(国)	Prister B S, Perepelyatnikov G P, Perepelyatnikova L V (Ukrainian Academy of Agricultural Sciences, Kiev, SUN)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

畜産物の放射性核種レベルは、牧草地の植生及び茎葉飼料の汚染レベルに依存する。チェルノブイリ事故の影響を強く受けたウクライナにおいて、家畜に汚染がより少ない茎葉飼料を与えるためにとられた各種対策を講じた。自然牧草地での放射性核種の挙動、牧草地に施行した各種処理方法の効果を述べた。

事故後数年間は干草地や牧草地のルートマット層に放射性核種が沈着していたため、ルートマット層から植物が放射性核種を吸収する量は下方にある土壌から根が吸収する量以上であった。土壌-植物 Cs137 移行係数は乾性草地よりも湿性草地の方が3~8倍高かった。また、自然草地から製造された飼料の Cs137 含有量は草地固有の植生種構成に左右された。

肥沃でミネラルが多い土壌は、乳牛用飼料の生産、安定カリウムやカルシウム蓄積能力に優れた作物種栽培に好適であった。同じ植物でも栽培する土壌の種類により Cs137 堆積量が異なったため、乳牛の肥育最終段階で使用する汚染の少ない飼料作物を生産する場合に考慮した。また、食肉及び牛乳生産をする場合、土壌、草地タイプと Cs137 汚染レベルに応じた使用方法を勧告した(表 7)。土壌改良には土壌特性が関わった。ミネラル肥料、堆肥、石灰、腐泥散布は生産性を高めた。ブミン酸ナトリウム、ゼオライトは高価にもかかわらず効果は低く放射性核種蓄積量を減少させなかった。

牧草地対策については、微量元素含有量の高い腐泥が、ウクライナとベラルーシの Polessye 汚染地域等微量元素の少ない芝 (soddy) -ポドソル土壌で特に有効であった。石灰は酸性土壌に適していた。窒素肥料は対コスト効果があった。放射性セシウム汚染の場合、窒素、リン、カリウム最適含有比が重要であった。施肥により作物への放射性核種移行は 1/1.1~1/1.8 に低減した。対策のコスト効果を概算する場合は、施肥効果が3年続くことを考慮した。腐泥散布は有機成分やミネラル成分を土壌に添加でき、放射性セシウム対策、放射性ストロンチウム対策、どちらにも有効であり、効果は3年続いた。大量散布を行っても植物や動物には無害であった。化学処理は農地より牧草地で効果が高かった。牧草地の表土を改良するために、地ならしや種まきを行った。湿性草地では表面から水が引いた後に施肥を行った。根本的改良としては、耕起、生産性の高い草の栽培、牧草地の木、灌木、小山の除去のほか、ルートマット層の下の汚染された土壌を除去し、新しい汚染の少ない発根層を形成した。家畜飼料に添加する結合剤として効果が大きいのはプルシアンブルー、ゼオライトと腐植土から生成される Humalyt 化合物であった、

## 2-51

文献タイトル(原題)	Activity levels of Cs137 and K40 in the skin and the cutaneous organs of a cow
文献タイトル(和訳)	雌牛の皮膚及び皮膚組織中の Cs137 及び K40 放射能レベル
著者/所属機関(国)	Pichl E, Rabitsch H (Technische Univ. Graz, Graz, AUT)
掲載雑誌	Health Physics
発表年	2003

放射性セシウム(Cs137、物理的半減期 30.1 年)及び放射性カリウム K40(物理的半減期 1.28 × 10<sup>9</sup>年)放射能レベルを定量した。セシウムとカリウムは有機体の全身に均一に分布するとICRPは想定している。本調査では、雌牛の皮膚、角、蹄を測定した。角と蹄は皮膚の一部と見なされることが多い。皮膚は泥、土、干草、糞便からの外部汚染に直接曝露される。Cs137 はチェルノブイリ事故のフォールアウト長期摂取によるものであるが、K40 は通常の飼料に含まれる自然放射能である。事故の影響が大きい時期に生まれ、成長期に高汚染飼料を慢性摂取した雌牛を 6.5 歳で屠殺し試験した。Cs137、K40 の放射能はガンマ線スペクトロメトリで同時測定した。サンプルごとのガンマ線の減衰、冷凍時、サンプル作製時の湿り損失の校正を行い、外皮系組織を蒸留水で洗浄し表皮と毛を剥がして 36 サンプルの測定をした。外部汚染は全身の皮膚表面全体で異なるか確認するため、頭部、腹部、臀部に分割して測定した結果、表面の位置による差異はなく外皮系全体に均一分布していた。脂肪をほとんど有さない皮下組織で、外皮系中の Cs137、K40 の最大放射能濃度が観察された。

角部分の Cs137 放射能濃度は外皮系の放射能濃度データとはかけ離れて高い値であった。角部分では角鞘が K40 放射能濃度最小であった(角の断面図は図 1 を参照のこと)。つまり、Cs137/K40 の放射能比は最大であった。骨部分の Cs137、K40 放射能濃度は蹄部分と同濃度であった。蹄の基本構造(図 3)は角と類似する。蹄の中央部は骨であり骨格系部分とも考えられるがここでは蹄の一部とした。蹄の外部汚染は主に糞便によるものであった。蹄中での最大放射能濃度は、副蹄と、真皮、表皮間の層から検出された。

測定の結果、1) Cs137/K40 放射能比は皮膚とこの付随組織の全測定部位において1より大きかった。即ち Cs137 の放射能は全サンプルにおいて K40 の放射能より大きかった。2) 外皮系中の平均放射能濃度は、Cs137 が 23.3Bq/kg、K40 が 13.3Bq/kg であった。3) 毛及び皮下組織中の放射能濃度が最大であった。4) 皮膚全体(外皮系)のうち皮膚(上皮)の放射能濃度は、Cs137 が 29%、K40 が 27%であった。

Cs137/K40 比が全サンプルで 1 を超えていたこと、生涯にわたり Cs137/K40 比が 1 を超える飼料を食していたこと、全身の組織中の放射能は経口摂取し腸吸収、滞留、排出する過程で汚染されたものであったことから、セシウムはカリウムと同じように皮膚に分布したと結論づけられる。放射能比が皮膚構成部位で異なるのは、細胞の種類、代謝率、放射性核種の滞留の違いによるものである。牛の外皮系は大きい面積を有する組織であるにもかかわらず、放射能は全身の 1%に満たなかった。

2-52

文献タイトル(原題)	Fallout <sup>239/240</sup> Pu and Cs137 in animal livers consumed by man
文献タイトル(和訳)	人間が消費する動物肝臓中の <sup>239/240</sup> Pu 及び Cs137 のフォールアウト
著者/所属機関(国)	Bunzl K, Kracke W (Gesellschaft fuer Strahlen- und Umweltforschung mbH Muenchen, Federal Republic of Germany)
掲載雑誌	Health Physics
発表年	1984

豚、羊、鹿、鳥の肝臓中の Pu239、Pu240、Cs137 を通常の化学分析法により定量した。

動物由来食品に関しては、Pu が肝臓や骨に蓄積することは周知である。様々な動物の肝臓が多くで国で食用として消費される。Pu を取り込み代謝する動物固有の経路があるため、動物種の肝臓中の Pu 濃度の違いを得るために、ミュンヘン近郊の農場から 1 年齢の豚、1 年齢の羊、0.5 年齢以下の鶏、0.5 年齢以下の七面鳥、lower Bavaria 地方の 2 年齢のノロジカ、ミュンヘンの南 80km の 10 年齢のシャモア、Uelzen の 0.5～6 年齢の北ドイツ泥炭地羊(North German moorland sheep)を用いて、Pu239/240 濃度を測定した。Cs137 は肝臓に蓄積はしないがこの濃度も測定した。Pu、Cs は肝臓に均一には分布しない。

シャモア、羊、泥炭地羊(0.5～1.5 年齢群と 2～6 年齢群にグループ分けした)の肝臓中 Pu、Cu 濃度を測定したところ正規分布に従っていなかったため、対数正規分布をとり図 3 にメジアン値をまとめた。Pu239/240 濃度を比較すると、豚、七面鳥、鶏、ノロジカ、羊、0.5～1.5 年齢泥炭地羊、牛が低く、シャモア、2～6 年齢泥炭地羊が高かった。Cs137 濃度は、羊、ノロジカ、豚、鶏、七面鳥が低く、0.5～1.5 年齢泥炭地羊が高かった。つまり、泥炭地羊の肝臓では Pu239/240 濃度が年齢とともに増加し Cs137 は年齢とともに減少した。この観察結果は、シャモアと泥炭地羊は 2 歳以上を実験に用いたが、他の動物は 2 歳以下であったため Pu239/240 濃度が低く観察された可能性がある。Cs137 濃度が泥炭地羊で高くなった理由は明らかではないが、主要な餌であるギリユウモドキ(heather)に Cs137 が蓄積されていたためかもしれない。

本実験結果は年齢に起因する可能性があり、Pu239/240、Cs137 濃度が原子力産業の影響を受けない、現在のバックグラウンドを反映した自然放射能の数値として用いるか検討する必要がある。

2-53

文献タイトル(原題)	Dynamics of Cs-137 distribution in the muscle tissue of swine by single and repeated contamination
文献タイトル(和訳)	1回及び複数回のCs137汚染によるブタの筋肉組織におけるCs137分布の動態
著者/所属機関(国)	Begovic´ J, Stankovic´ S, Mitrovic´ R
掲載雑誌	Radiation Protection, Vol.2
発表年	1980

Cs137汚染を受けた6ヶ月齢ブタの筋肉組織におけるCs137沈着量並びにCs137排出率を提示した。筋肉組織は、人が食する重要な組織であることから実験に使用した。背最長筋、棘上筋、浅殿筋のサンプル、糞尿サンプルを分析した。ブタは、7連続日にわたる複数回汚染群及び1回汚染群に分け、さらに夫々を多量投与汚染と少量投与汚染とに分けた。

Cs137は筋肉組織中にほぼ均一に分布していた。最大放射能を検出した汚染初日を除き、各筋肉組織に複数回汚染と単回汚染による有意な差はなかった。複数回汚染では、多量汚染(2967kBq)、少量汚染(1609kBq)とも時間経過とともに放射能濃度は減少していき特に最初の14日間の減少が顕著であった(グラフ1)。放射性核種の沈着期間に平衡状態が確立するプロセスに違いがあり、排出速度の差になると推測できる。単回汚染では、多量汚染(11,729kBq)の筋肉組織の放射能濃度は少量汚染(5,772kBq)の2倍あった。Cs137排出の有効半減期は14~15日であった。過去に年齢不明の動物対象実験により29.5日と報告された例がある。

反芻動物の場合はCs137、I131のほとんどが糞便から排泄されるのに対し、ブタは尿からの排泄がほとんどであることは本実験と過去の報告とが一致した。複数回汚染と単回汚染の排出速度は異なった。即ち、汚染物質排出の半減期の有効時間が異なった。複数回汚染の排泄の有効半減期は17~20日であった(グラフ2)。汚染量が倍であっても汚染開始後最初の17日間にブタの筋肉組織から排泄されるCs137量は同量であった。この結果は、汚染直後に汚染物質がより速く排出されるために起こった。単回汚染の場合もやはり汚染直後つまり最初の14日間の排出速度が速かった。単回汚染の排泄の有効半減期は5日であった。

2ヶ月齢ブタの沈着係数は7.9という報告があり、本実験結果もほぼ同じであった。単回汚染の方が多量汚染と少量汚染の係数がより近かった。

放射性核種の経口投与濃度がわかる場合、ブタの年齢、種、汚染期間も加味すれば、沈着係数、筋肉からの排出速度定数、排泄の有効半減期から肉とその加工品中の汚染物質含量の推定ができる。

## 2-54

文献タイトル(原題)	Gastrointestinal fractional absorption of radionuclides in adult domestic ruminants
文献タイトル(和訳)	成体反芻家畜における放射性核種の胃腸管吸収率
著者/所属機関(国)	B.J. Howard, N.A. Beresford, C.L. Barnett, S. Fesenko
掲載雑誌	Journal of Environmental Radioactivity
発表年	2009

IAEA の TRS364 改訂にあたり、成体反芻家畜(牛、羊、ヤギ)のセシウム、ストロンチウム、ヨウ素ほか 23 放射性核種吸収率を分析検討し、吸収率の勧告値を導出した。吸収率勧告値は、地球環境及び淡水環境中の放射性核種移行を予測するための手引きとなる TRS364 改訂版に含まれる予定である。本紙では、反芻動物に対して勧告された吸収率とこれらを引用した文献を提示し、単胃動物であるヒト(成人)に対する ICRP の勧告値と比較した。

放射性核種の吸収は、経口摂取と糞便排出の差とすることが多く経口摂取量の比率として示される(「明らかな吸収率  $A_a$ 」)。一方、この手法では吸収された放射性核種の体内から糞便までの内在性分泌を考慮していない。例えば放射性セシウムではこの吸収が >20% である。従って、放射性核種の胃腸管への内在性分泌を考慮に入れた放射性核種の吸収を「真の吸収率  $A_t$ 」と定義することが提唱された。

文献データから勧告された成体反芻家畜の胃腸管吸収率を表 1 に示した。改訂版では算術平均(AM)値が与えられデータ数が 2 以下ではない幾何平均(GM)値を勧告値とする。牛、羊、ヤギには予期したとおり吸収値に差異はなかった。表 1 の勧告吸収率を吸収率のオーダーごとにグループ化した(表 2)。胃腸管吸収率の値は 2006 年に ICRP が再検討し、単胃動物(人)に最適な値を勧告した(表 3)。ほとんどの放射性核種が反芻動物(表 1)の値と同じであったが、Pu、Ru、Zr は表 1 より低かった。Pu 源(土壌やその堆積物)は他の放射性核種よりアベイラビリティが低いと想定したためかもしれない。Zr の場合、子ラット試験を基に ICRP は勧告を行い、他の試験結果で示された  $3 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$  の吸収率を選択しなかったようである。Ru の場合、ヒトを用いた 2 つの試験結果  $7 \times 10^{-3}$ 、 $1.1 \times 10^{-3}$  からではなく、ウサギの 0.55 という 1 つの試験を基に勧告した。本紙で提示した値は両放射性核種とも ICRP が選択しなかった方の試験値と近似している。

本紙では、専門家の判断に基づき、定義した理由(児動物の吸収率は高いため 100 日以上動物の値を使用する、吸収に作用する可能性のある安定元素摂取が高かったり低かったりした場合使用しない等)に合わないデータを排除した後に数学的に導出した値を表 1 とした。ICRP は関連する値を抽出した後に専門家の判断に基づき勧告値を選択した。異なる方法で導出されたため、ここで反芻動物に対して導出した値と ICRP が勧告したヒトに対する値に潜在する違いについて結論を出すことは適切でない。

2-55

文献タイトル(原題)	The importance of source-dependent bioavailability in determining the transfer of ingested radionuclides to ruminant-derived food products
文献タイトル(和訳)	摂取した放射性核種の反芻動物由来食品移行を決定する源依存バイオアベイラビリティの重要性
著者/所属機関(国)	Nicholas A. Beresford
掲載雑誌	Environ. Sci. Technol.
発表年	2000

放射性セシウム、放射性ストロンチウム、放射性ヨウ素、プルトニウムの反芻動物体内組織への移行における環境源依存バイオアベイラビリティを検討し、腸吸収のバイオアベイラビリティ評価を迅速に測定する *in-vitro* 試験法の適性を元素ごとに評価した。本方法論は、静脈注入された放射性同位体と胃腸吸収された放射性同位体とは血漿中で同じ挙動をするという仮定の上に成り立っている。胃腸管吸収の程度に応じての放射性核種の畜産物移行アベイラビリティを、環境源の特性により決定づけられるものと本紙では定義する。また、これを真の吸収係数 ( $A_t$ ) と定義する。既に、摂取された放射性核種が腸壁に移行する割合と定義されてきたものである。本紙の  $A_t$  決定方法は重金属にも適用できると思われる。文献から引用した反芻動物の  $A_t$  値を元素ごとに表 1~4 にまとめた。

表 1 の放射性セシウムの  $A_t$  は摂取源の形態に依存して 50 倍も差があった。従って、環境源依存バイオアベイラビリティは、乳、肉中の放射性セシウム汚染を決定する重要な要因であり、*in-vitro* 法を信頼できる。

ストロンチウムの挙動はカルシウムの挙動に強く影響を受ける。反芻動物の腸に吸収されるカルシウム量はカルシウム要求度に左右され、要求度は年齢、成長速度、泌乳量に左右される。表 2 では放射性 Sr の  $A_t$  が高い値である時カルシウム摂取量/要求量比(表では Ca I:R) が低かった。従って、放射性ストロンチウムの摂取源依存バイオアベイラビリティは乳、肉中の放射性 Sr 濃度を決定する重要な要因ではなく、カルシウム摂取量とカルシウムの状態を把握することが放射性 Sr の食物移行を予測することにつながり、放射性セシウムとは反対に、*in-vitro* 試験結果は現実に則していない可能性がある。

放射性ヨウ素は摂取源のバイオアベイラビリティに関係なく吸収は 100% に近い。ほとんどの形態のヨウ素が消化管内でヨウ化物になり急速に減少する。従って、泌乳反芻動物が摂取する放射性ヨウ素源は乳中の放射能濃度を決定する主要因ではなく、温度、泌乳量、安定ヨウ素の状態、食餌中のゴイトロゲン(甲状腺腫誘発物質)含量が要因となる。放射性ヨウ素吸収は安定ヨウ素経口摂取とも無関係であるが、安定ヨウ素摂取量は排泄場所に関係する。少ない場合甲状腺に蓄積し、少なくなれば甲状腺や乳への移行は最大限となり尿中に排泄される且つ腸へ内在性分泌される。

プルトニウムの土壌-植物移行は少ないため、土壌からの摂取が放牧動物の主要経路となる。摂取された土壌/堆積物から移行する場合より可溶性の形態の方が Pu のバイオアベイラビリティは高い。

## 3-01

文献タイトル(原題)	AFCF and clinoptilolite use in reduction of Cs137 deposition in several days' contaminated broiler chicks
文献タイトル(和訳)	数日間汚染されたブロイラー鶏の Cs137 沈着を減少させる AFCF 及びクリノプチロライトの使用
著者/所属機関(国)	Mitrovic B., Vitorovic G. (Fac. of Veterinary Medicine, Dep. of Radiology, Serbia and Montenegro), Vitorovic D. (Fac. of Agriculture, Dep. of Animal Sci., Serbia and Montenegro), Dakovic A., Stojanovic M. (The Inst. for Technol. of Nuclear and Other Raw Materials, Serbia and Montenegro)
掲載雑誌	Journal of Environmental Radioactivity
発表年	2007

チェルノブイリ事故後研究されてきた放射性セシウムに関する対策において、放射性結合剤使用対策のうち最大効果のある化合物はプルシアンブルーである。また、天然ゼオライトであるクリノプチロライトも家畜における放射性セシウム吸着に使用されてきた。

本研究の目的は、肥育中の最後 2 週間のうちの数日間、慢性的に食餌による Cs137 汚染を受けたブロイラー鶏に対し、混餌投与する方法、胃管を用いて水溶液或いは懸濁液の形態で経口投与する方法の 2 方法を用いて、AFCF 及び天然クリノプチロライトの 2 物質のセシウム結合剤としての有効性を調べることであった。35-47 日齢、ケージ内 5 羽ずつで飼育し標準的な飼料を与えた Hybro 型ブロイラー雄鶏 75 羽を 1 群 15 羽の 5 群に分類した。実験期間 13 日間に、全群に放射能濃度  $1310\text{Bq ml}^{-1}$  の Cs137Cl 水溶液 1 ml を毎日単回経口(胃管)投与した。第 1 群は対照群であり結合剤を与えず、実験群には結合剤を与えた。第 2 群には水溶液 3ml 中 AFCF 0.2g を毎日単回投与(胃管)、第 3 群には AFCF 0.2g を含んだ飼料を投与、1 日につき AFCF 摂取量は 0.24-0.27g であった。第 4 群には水懸濁液 5ml 中クリノプチロライト 2g を単回投与(胃管)、第 5 群にはクリノプチロライト 2% を含んだ飼料を投与、1 日につきクリノプチロライト摂取量は 2.4-2.7g であった。実験 4、10、13 日目に各群のうち気絶した 5 羽を屠殺した。ガンマスペクトロメータ装置 (HPGe, ORTEC) を用いて、胸肉、肝臓、砂囊のサンプルで Cs137 の比放射能を測定した。

慢性的に食餌による汚染を受けたブロイラー鶏に数日間結合剤を投与すると、胸肉、肝臓、砂囊における Cs137 の移行及び沈着を大幅に減少 ( $p < 0.01$ ) させるという結果が得られた。最も効果を出したセシウム結合剤は AFCF であり以前の研究結果と合致した。汚染開始直後から肉及び内臓の Cs137 沈着を減少させることを示した。AFCF の、放射性セシウムとの高い結合能力は鶏の食餌経路において筋肉及び食用内臓の放射能汚染を防止する。胸肉及び臓器における Cs137 の沈着は、汚染時間及び結合剤投与時間経過につれ減少した。AFCF をセシウム結合剤として使用すると、13 日目に Cs137 放射能測定量は、対照群よりも胸肉では 80-83%、肝臓では 89%、砂囊では 83-84% 減少した。低濃度でも使用可能である。天然クリノプチロライトの結合効率は AFCF より悪く、特に実験開始後 10 日間が悪かったが、13 日目に Cs137 放射能測定量は、対照群よりも胸肉では 53-69%、肝臓では 67-60%、砂囊では 59-71% 減少した。クリノプチロライトは長期投与後に効果を示すことを意味する。AFCF の 10 倍の濃度で使用する点が短所であるが、価格が 3 桁違うという経済的な長所があるため特に天然クリノプチロライトを豊富に埋蔵している国々において効果を発揮する。

## 3-02

文献タイトル(原題)	MAG*SEP <sup>SM</sup> technology for milk decontamination in Ukraine
文献タイトル(和訳)	ウクライナで牛乳除染に使用された MAG*SEP <sup>SM</sup> 技術
著者/所属機関(国)	Acuff L S III (Selective Environmental Technol., Inc., GA), Janitskij V V (State Committee of Ukraine Food Ind., Kiev, UKR)
掲載雑誌	Proceedings of the International Conference on Decommissioning and Decontamination and on Nuclear and Hazardous Waste Management, Vol.2, 1998
発表年	1998

最近まで牛乳/乳製品に対して有効な対策がなく、WHO の定めた Cs137 ガイドライン 370Bq/L を超える食品が多数のウクライナ住民に消費された。牛乳から Cs137 を除去する目的で、パイロット規模システムをウクライナのチェルノブイリ地区の酪農加工工場に設置し試験を行った。実験室での事前調査で、牛乳から放射性汚染物質を除去するには、磁氣的に再生可能なイオン交換粒子を用いる MAG\*SEP<sup>SM</sup> 技術が高効率であり、生物学的、物理学的、栄養学的に牛乳の性質へ影響を及ぼさないことが示されていた。

MAG\*SEP<sup>SM</sup> 技術は、毎分 100 ガロン中 100Bq/l レベル未満までセシウム汚染物質を除去する。径 100-400 μm、特別製造されたイオン交換粒子を使用して、液体中から汚染物質を選択的に吸着するシステムである。粒子は、除去過程において、汚染液体中の乱流で浮遊し液体と接触する時間を経過すると磁気分離される。ウクライナの乳製品を使用したサンプルで実施され、初期試験では 94.6% の除去率を達成した。

試験は米国に続きウクライナで実施され続け、以下のことがわかった。

同技術は、ウクライナ並びに WHO がヒトに安全と見なす基準内に達するまで、チェルノブイリ発電所付近で製造された牛乳中のセシウム汚染物質を効率良く低減することをパイロットシステムの試験から実証できた。Cs137 を 90-95% まで減少させ、ウクライナが提唱する、より厳しいガイドラインに近付きつつある。粒子の有効性は、1) 消毒後の粒子の微生物相対数の評価: 漂白、過酸化水素、ヨードホール、70°C の水を用いての消毒処置を評価した、2) 粒子の多重使用: 3000Bq/L まで Cs137 で汚染された牛乳 500ml 中で粒子 10g (乾燥物換算) を 10 分間混合する過程を 100 サンプルまで繰り返し、5 回毎にガンマ分析を行い、10 回毎に粒子を洗浄、消毒した、3) 物理的ストレス負荷試験: 遠心、容積ポンプ、流速、流動条件、多様な粒子タイプ、の中で示された。

MAG\*SEP<sup>SM</sup> 処理を行った牛乳には初期試験において牛乳の化学成分に副作用のないことが示された。毒性及び生物学的試験において、処理が、匂い、色、プロテイン含有量、pH、保存状態、凝固過程、乳清の分離等の特性に影響しないことが確立された。試験には、Selentec (Selective Environmental Technologies, Inc., 米国)、Argonne National Labs (米国)、Ukraine Research Centre for Radiation Medicine が関わっている。

コストを削るため最小限の自動制御で設計され、Ovruch 近辺のウクライナ乳製品管理施設に設置された。厳しい食品品質基準に見合う清潔性を保持し、生物学的汚染物質の潜在性を最小限にするよう設計されている。今後 3-5 年の間にあと 29 のシステムを設置しこの地域においてもっと多くの牛乳除染を遂行する計画である。

## 3-04

文献タイトル(原題)	Investigations on the effect of grazing intensity on the transfer of radionuclides to cow's milk
文献タイトル(和訳)	牛乳への放射性核種移行に対する放牧強度効果研究
著者/所属機関(国)	Voigt G, Schotola C (GSF, Neuherberg, DEU), Crout N M J, Absalom J (Univ. Nottingham, Bonington, GBR)
掲載雑誌	U.S. DOE Reports
発表年	1997

異なる放牧条件下における植物及び牛乳中の放射性セシウム濃度を比較するために、2箇所の農場でフィールド調査を実施した。チェルノブイリ事故対策として既に測定が行われていた、ミュンヘン南東部の2つの農場を選択した。農場Aでは4つの牧草地での輪番放牧スタイル、農場Bでは1つの牧草地だけで放牧を継続するスタイルが実施されている。農場Aの牛乳中の放射性セシウム濃度に影響はなくむしろ安定傾向にあった。異なる牧草地への移動に因る牧草放射能濃度の時間変動は牛乳へ影響を及ぼさない。さらに、両農場の牛乳中のK-40放射能濃度は安定しており季節や場所に左右されなかった。

農場Bの牛乳は農場AよりもCs137濃度が10倍低いことが観察されたにもかかわらず、両農場の土壌と牧草は放射能濃度が同じであり、つまりは両農場の土壌-植物移行率が同じであることを示していた。家畜を限定された場所で集中して放牧させると、CroutのRUINSモデルに従い論理的には牧草地の植物で放射能濃度が減少するはずであったが、ここでの植物の測定結果は異なった。

事故後何年も経て放射性セシウムの動きに変化が現れた。現在は経根吸収による植物移行が主であり、植物付着状態よりも多量に家畜に吸収される。植物中のCs137濃度は影響を与えないが、放牧スタイルを考慮した放牧強度は牛乳中の濃度には影響を及ぼす可能性が考えられる。この推論として挙げられる理由は、高放牧圧下で放射性セシウムが土壌粒子に多く吸着されると、牛の腸を経由する可溶性セシウムの吸収がなく、結果的に牛乳への移行を妨げるということである。これは事故とは無縁の通常の農業条件下でも示されており、より高い放牧圧では牛乳中の放射能濃度がより低いことがわかっているが、この作用は高放牧圧の草では土壌-植物移行が少ないことに起因し、植物中の濃度は無関係である。従って、重大な原子力事故後に所与の牧草地で継続放牧スタイルを実施しながら家畜の密集度を変化させることは、容易に採用できる事故対策として考え得る。

農場調査は飼料中の放射性セシウム濃度を現状に合わせて予測するためには有効である。しかし、土壌、植物の多様な放射能、不均一な草の高さという条件下であり、モデルとしてはもっと均質化した成長速度、汚染分布が好ましく、牧草強度の影響をシミュレートするようプロット調査を実施した。ここで用いた、有機土壌と無機土壌の2種類の土壌と3種類の草の高さをを用いた実験計画では、土壌-植物移行に関する牧草強度の影響を観察することはできなかった。従って、やはり、農場調査で観察したような放牧強度の影響は、植物の放射能ではなく他の原因に起因するに違いなく、おそらくは土壌摂取に起因し、放射性セシウムが植物に取り込まれるのを防止し最終的には家畜の反芻胃中へ吸収されるのを防止すると思われる。

## 3-06

文献タイトル(原題)	Decontamination of milk from the radioisotopes iodine-131 and cesium-134,137.
文献タイトル(和訳)	放射性同位体のヨウ素 131 及びセシウム 134,137 による牛乳汚染の除去
著者/所属機関(国)	Vosniakos F K (Technological Education Inst. (TEI) of Thessaloniki, Thessaloniki, GRC)
掲載雑誌	Advances in Food Sciences
発表年	1996

チェルノブイリ原発事故後、大気や地表で確認された主要な放射性物質のうち、半減期の短いものでは I131 がある。これは、大量に放出され、主に甲状腺に蓄積する。半減期の長いものでは、Cs134と 137、Sr89と 90 の同位体がある。セシウムはカリウムの代替物として筋肉組織に蓄積する。ストロンチウムは、カルシウム代替物として骨組織に蓄積する。

植物、ヒト、および動物による放射性物質の吸収は、直接ないし間接的になされる。間接的な汚染は、長期にわたって食料に最も重大な影響を及ぼす。地面から植物への放射性核種の移行率は、土壌構成による。ギリシャのように粘土無機質の豊富なアルカリ性の土壌は、酸性の土壌よりも安定的に、植物や動物およびヒトへ移行することなくセシウムを保持し続ける。

牛乳はヒトの基本的な栄養源の一つであるため、イオン交換樹脂膜法による主要な放射性核種(ヨウ素、セシウム、ストロンチウム)の除去に注力してきた。セシウムとストロンチウムの除去は陽イオン法、ヨウ素の除去は陰イオン法にて行う。除去作業は、国の機関が定めた基準値より残留放射性物質が低くなるまで行う。

牛乳内のヨウ素やセシウムの測定は、ガンマ線分光法にて直接行われる。Sr90 はβ線のみ放出するため、ガンマ線分光器のみにて測定することはできず、測定が比較的困難である。このため、セシウムに対しての比率という形で概算的に算出される。

樹脂法の選択においては、(a)牛乳への有害物質混入の回避、(b)感覚器官面での変化が生じないこと、および(c)イオン保持できること、の点から考察した。なお、陽イオン樹脂の再生成は希塩酸(約 6%)にて、陰イオンのそれは塩化ナトリウム溶液で行われる。

牛乳の放射性同位体(I131、Cs134,137)の除去過程を示す流れ図は、[図1](#)のとおり。原乳(2°C)を熱交換器により調整後、I131 除去のため陰イオン交換用カラムに通す(この時点で 13°C)。その後牛乳の放射能を照査し、許容限度を超えるヨウ素があれば、許容限度量内におさまるまで陰イオン交換用カラムを再循環させる。I131 の除去完了後、冷却材で 9°Cに調整し、牛乳はクエン酸溶液で酸性化する。その後ろ過により、陽イオン交換カラムを正常に通過できるようにしておく。陽イオン交換カラム通過後、Cs134とCs137の照査により中和に進むか再循環させるかが定まる。中和は水酸化カリウム溶液にて行われる。その次のろ過により、可能な限り不要な固形物を除去する。そして牛乳は、後続の過程へ進めることができる。なお、この手順は、トラブル等特別な状況に対応すべく、いくつかのプロセスの偏移が可能である。

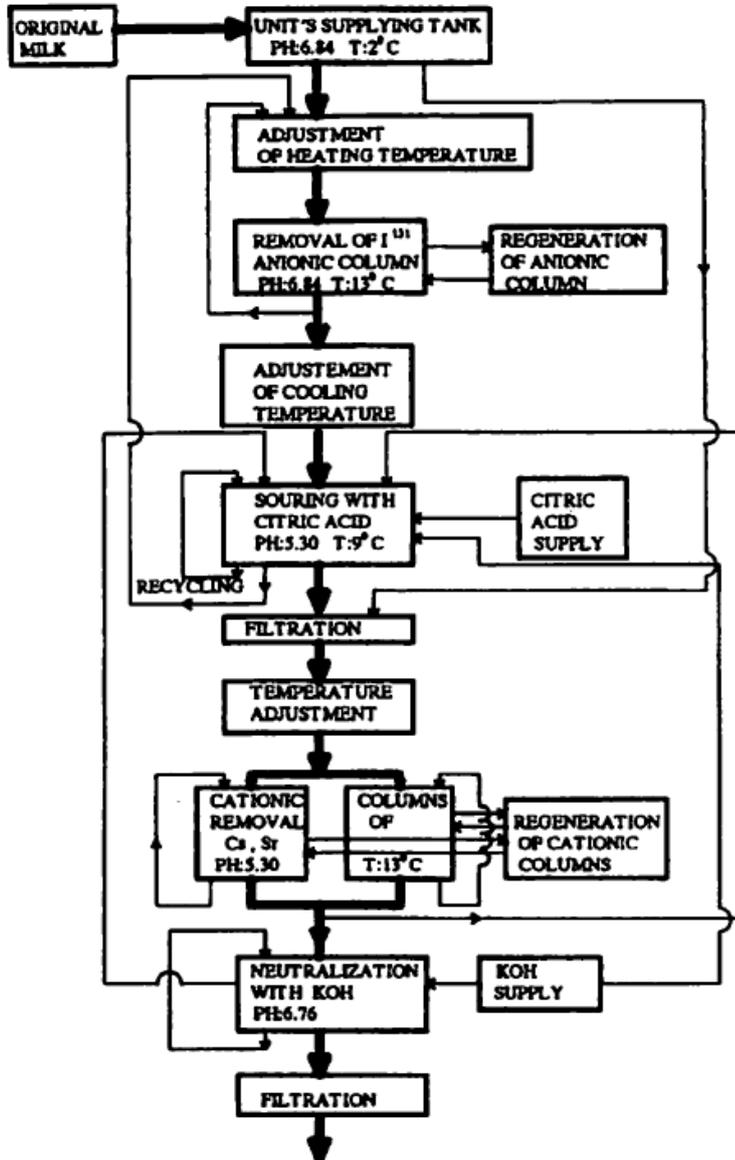


Figure 1: Flow diagram for the decontamination of milk from the radioisotopes iodine-131 and cesium-134, 137.

## 3-11

文献タイトル(原題)	Countermeasures for reducing radioactive contamination of farm animals and farm animal products
文献タイトル(和訳)	家畜及び畜産物の放射能汚染抑制対策
著者/所属機関(国)	Hove K (Agricultural Univ. Norway, As., NOR), Strand P (National Inst. Radiation Hygiene, Osteras, NOR), Voigt G (GSF, Neuherberg, DEU), Jones B-E V (Swedish Univ. Agricultural Science, Uppsala, SWE), Howard B J (Merlewood Research Station, Cumbria, GBR), Segal M G (Fisheries and Food, Ministry of Agriculture, London, GBR), Pollaris K (CEN, Boeretang, GBR), Pearce J (Queens Univ. Belfast, Belfast, GBR)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

畜産物の放射性汚染に伴う放射線量を抑制するための各種対策の範囲と効果について考察した。家畜の対策は、放射性核種摂取の抑制、食餌からの消化吸収低減、内臓への摂取阻止、体内蓄積負荷量の排出増大、の4つの経過段階で導入できる。畜産物の対策に当たっては、家畜源汚染食品の消費によるヒトの曝露低減、対コスト効果を考慮すべきである。どの対策がどの状況に的確であるかの選択は多くの要因に左右される。抑制対策を選択決定する場合には、放射性核種同位体含有量を低減する他に実用性とコストに配慮し、特に畜産物の高濃度堆積箇所と高濃度長期滞留箇所を把握する必要がある。例えば、屠殺に費やす時間、放牧周期、汚染されていない食餌の供給、化学的なバインダーの使用、これらを比較評価するのは容易ではないが、経済的、社会的、政治的な側面を合わせてコストと利益の折り合いをつける必要がある。チェルノブイリ事故後、対策の有効性が比較検討されており、放射性セシウムについては、特にバインダー利用が有効な対策でありさらには対コスト効果が高い。それに対し、長期間家畜を移動させ汚染されていない食餌を投与すると高コストとなる。使用可能な手段の有効性には明白な差異があるが、事故の現実状況に即しているかどうかも見逃ごせない。対コスト効果は次の要因に影響される。1.影響を受ける農業システム。農業慣行上の変化への直接のコストは小さくとも労働力を増大させる可能性がある。広範囲の放牧よりも集中的な農業条件下で対策を実施する方がコストは小さい。2.季節。肉製品は屠殺期間前に汚染が発生した場合影響を受けやすい。冬期に汚染地域を超えて給餌しなければいけない可能性がある。3.汚染の程度。介入レベル、放射性核種同位体の生物学的半減期、畜産物に左右される。

畜産物の主要放射性核種(I, Cs, Sr)は化学特性が大きく異なり夫々の適切なバインダー、或いは全てに共通するバインダーを見つけることは困難であるため、多様な放射性核種が混入、沈着後に行われるべき効果的なアプローチは省みられてこなかった。畜産物の放射性核種レベル抑制対策には科学技術及び管理体制上の変化が必要とされる。コスト以外には社会に承認されることも対策選択時に重要となる。しかし、バインダーは昔から続く伝統的な農業慣行に多大には影響をもたらさないとされる。ストロンチウム、ヨウ素対策はそれほど進んではいなく、効果的なバインダーが確定されてはいないが、セシウムの場合には、ミルク、食肉汚染を1/10に低減できるバインダー研究がここ30年で進展している。汚染されていない畜産物を汚染地域に供給することは先進国では容易であり、一定期間の汚染減少は見込めるが、有効性が確認され、対コスト効果があり、保管可能な添加剤(例えば緩効性のAFCF)がある場合、原発施設周辺への備蓄を考慮すべきである。

## 3-12

文献タイトル(原題)	Management methods of reducing radionuclide contamination of animal food products
文献タイトル(和訳)	畜産物の放射能汚染を抑制するための管理方法
著者/所属機関(国)	Jones B-E V (Swedish Univ. Agricultural Sciences, Uppsala, SWE)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

動物や動物性食品、およびヒトへの放射線の移染を減らすために、様々な一般的管理方法がある。量・質ともにバランスの取れた飼料を投与することは、放射能汚染の特殊な状況に対し、動物にとっての備えとなる。

動物を放牧地から連れ出し、可能であれば屋内へ収容することで、被曝や放射能の体内蓄積を減らすことができる。動物の皮や毛の汚染を回避することにより、動物を扱う人々の通常作業において外部被曝を減らすことにもつながる。

また、放射能汚染されていない飼料を使うことは、放牧動物の放射線被曝を抑制するために重要である。

汚染された土地の利用方法を変更することも大変効果的である。牛乳の生産を食肉の生産もしくは種畜に変更することで、放射性物質の移染をかなり減らすことができる。

セシウムは生理学的な作用は、植物および動物両方にとってカリウムと類似している。食物中の繊維質を増やした場合、胃腸での放射性セシウム吸収量が減少し、牛乳への移染量の減少も計測されている。同様の影響は、カリウムを摂取した場合においてはみられなかった。このことから、より多くの粗飼料(干草や貯蔵生牧草)により飼料の繊維含有率を増やすことは、特に乳牛にとって有効であることが分かる。

家畜が汚染された場合、セシウム結合剤同様、汚染がないまたは汚染度の低い飼料を与えることで汚染レベルを下げるができる。汚染のない飼料投与後の各生産物中の放射性物質減少率は、生物学的半減期により決まる。肉の半減期は、成長期の動物のほうが成体のそれよりも短い。生物学的半減期は、動物を運動させることで短縮することができる。

放射性ストロンチウムは、カルシウムに化学的に類似しており、植物や動物へ摂取される際にこの二つの元素間で競合が生じる。このため、カルシウムを増量摂取すると、胃腸における放射性ストロンチウムの吸収は減少するが、過剰摂取はカルシウムの生体恒常性を阻害してしまう。また、ストロンチウムは周囲に堆積してから何年にもわたり植物に吸収されやすい。

安定ヨウ素を適切に定量投与することは、正常な甲状腺機能のために肝要であり、放射性ヨウ素の甲状腺への蓄積を最小限に抑える。ただし、安定ヨウ素の過剰摂取は代謝作用に変化をもたらしたり、免疫反応を鈍化させる毒性がみられる。なお、放射線ヨウ素は、呼吸による高レベルの摂取についても留意しておくべきである。

放射性ルテニウムは、胃腸からの吸収はわずかで、牛乳への移行は少ない。しかし、ルテニウムがエアロゾルとして存在すると、肺に吸収されて長期間肺にとどまることとなる。

## 3-13

文献タイトル(原題)	Management methods of reducing radionuclide contamination of animal food products in seminatural ecosystems
文献タイトル(和訳)	半自然生態系における畜産物の放射性核種汚染を抑制するための管理手段
著者／所属機関(国)	Howard B J (Merlewood Research Station, Cumbria, GBR)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

半自然生態系における動物の放射性核種汚染を低減する目的で管理手段を適切に変更する対策について概観した。

最も確かな手法はフォールアウトが沈着する(1年のうちの)時期までにフォールアウトの物理化学形態と汚染程度を判断すること。家畜の放射性汚染(主として Cs137)を防止するための最も効果的な一般的管理手段は、汚染地域から家畜を隔離する、非汚染飼料を乳畜に継続投与する、非汚染飼料を肥育最終段階にある肉畜に投与する、汚染の少ない草を摂取した時期に家畜を屠殺する、清浄給餌する、狩猟時期や屠殺時期を変更する、高汚染地域への立ち入りを制限する、汚染地域で放牧する家畜種を変更する、人の食用ではなく動物用の飼料へと変更する、汚染の影響を受けにくい動物を選択して消費する、肥料を添加する、放牧圧を変更する。放射性セシウムへの対策がチェルノブイリ事故以来最も発展してきた。放射性セシウム以外の放射性核種の半自然生態系での挙動、対策効果については限定されている。汚染レベル、吸収率、汚染臓器、生物学的半減期、物理学的半減期によって状況は異なるが、放射性セシウム対策が適用できる可能性を有するものもある。乳畜が半自然生態系で放牧する時期にフォールアウトが沈着した場合に優先すべき対策は乳中の放射性ヨウ素を定量することである。放射性ヨウ素は牛乳より羊乳、ヤギ乳への移行が多い。I131の物理学的半減期は短いため、貯蔵できる乳製品を製造する、非汚染乳と混ぜて希釈する。放射性ストロンチウムの半自然生態系での挙動は不明な点が多くさらなる情報が必要であるが、放射性 Sr 汚染が多いのは乳であるため放射性ヨウ素対策が適用できる。放射性 Sr は最終的には骨に蓄積することを考慮すること。アクチニドは腸吸収は少ないため介入レベルまで達することはあまりない。

動物由来食品の放射性核種レベルを低減するため管理手段を変更する場合、農地、半自然生態系両方に適用できる対策もあるが、半自然生態系固有の問題に対応するべく半自然生態系における放射性核種の挙動を把握し固有の対策を発展させる必要がある。ここで提起した対策は夫々達成できる汚染抑制が少なく実行が簡便でないことも多い。半自然生態系のほとんどの動物は囲いのない広大な地域で生活し人間が介入することは稀或いは全くない。乳畜のみが毎日人間の介入を受ける。従って、介入限界を超える汚染レベルの動物を確認できるよう、チェルノブイリ事故後改良され発展してきたライブモニタリング技術を増強することは限定的ではあるが対策を効率良く選択し強化できる状態に通じる。半自然生態系で最も有望で実践的な対策は腸吸収を抑制する化学剤の使用と管理手段の変更を併用する方式である。

## 3-14

文献タイトル(原題)	Chemical methods for reduction of the transfer of radionuclides to farm animals in semi-natural environments
文献タイトル(和訳)	半自然環境における家畜への放射性核種移行化学的抑制方法
著者/所属機関(国)	Hove K (Agricultural Univ. Norway, As., NOR)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

放射性核種が環境に同化されてきた時、生態系での放射性セシウムのターンオーバーとサイクルが汚染問題の長さを決める。不幸にも羊やヤギの飼育に利用しているヨーロッパの高地や山地の生態系は放射性セシウムの有効半減期が特に長く 20 年と推定されてきた。チェルノブイリ事故により汚染レベルが 2500Bq/kg の地域で現在飼育されている子羊が 600Bq/kg の放射性セシウム介入レベルを下回る時期は 2030 年までかかると言われている。

半自然生息地及び自然生息地において動物に移行する放射性核種抑制には化学剤が有効である。農場内で飼養する家畜と放牧家畜には同じ化学剤を使用できるが適切な投与方法は異なる。泌乳反芻動物には濃縮飼料に化学剤を混餌することで効果的に処理できる。事故による経験からは、粘土鉱物と CaCO<sub>3</sub> が畜産物中の Cs137、Sr90 移行抑制に有効であることを学んだ。しかし、英国の高地に位置する牧草地の羊にベントナイトを投与した結果、放射性セシウム量は低下したが食餌摂取量も低下したため自由に放牧させる反芻動物には不適切である。移行抑制に使用する化学剤は、ヘクト(100)グラム単位で投与する必要がある、半自然生態系の乳畜だけに有効である。化学剤が少量でも効果がある場合はミネラルや塩塊に混ぜて放牧地に置くと効果的である。羊、ヤギ、トナカイのような小型の反芻動物は牛よりも乳や肉中の放射性セシウム濃度が高くなる。乳畜は毎日化学剤を投与することが可能であるため効果が大きい、人が肉畜と関わりを持つ機会は殺虫剤、ワクチン投与時だけであるため持続放出性のある方法が適している。セシウム結合体であるヘキサシアノ鉄酸を含むボリ(bolus、boli、大丸薬)は持続放出性を有し、牛、羊、トナカイのような肉畜への適用に関して事故後塩塊とともに発展してきた。15%又は 20%の AFCF を含むボリは反芻胃に少なくとも 2 ヶ月滞留する。塩塊とボリを羊に 25~300mg/日、牛に 250~2000mg/日投与した場合、Cs137 蓄積を 1/2~1/10 に低減した。1mg/日の安定ヨウ素を塩塊とボリに含ませて牛に投与した場合は甲状腺の放射性ヨウ素摂取を抑制できる。

事故後放射性セシウム技術が発展してきたため他の放射性核種移行はセシウムに絡めて議論されることが多く、Sr90 結合剤は放牧家畜試験されることはなかった。ボリ、塩塊投与は、家畜由来食品の消費を禁止する対策に比べ、ヒトへの線量を抑制する非常に対コスト効果のある対策である。ボリの分解を遅らせるメカニズムを解明すればボリの効果はより拡大するであろう。ノルウェー放射線防護機関が 1Man-Sievert の線量を低減するために許容できるコスト範囲とした額は 2 万~10 万 US ドルである。食肉や乳の放射性セシウム移行を抑制しつつコストの小さい対策を発展させる必要がある。

## 3-15

文献タイトル(原題)	Chemical methods to reduce the radioactive contamination of animals and their products in agricultural ecosystems
文献タイトル(和訳)	農業生態系における家畜及びその畜産物の放射性汚染化学的抑制方法
著者/所属機関(国)	Voigt G (GSF-Forschungszentrum fuer Umwelt und Gesundheit, Neuherberg, DEU)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1993

大きな原子力事故によって汚染された家畜用飼料の放射能レベル低減方法として、飼料に化学物質を添加し、腸吸収を抑制する方法、血液や臓器から体外へ排出を促進する方法を調査した。哺乳動物では胃腸管と腎臓、乳畜では乳腺が放射性核種体外排出経路であり、ミルク、糞尿が汚染対策効果を示す指標とされることが多い。安定した同位元素或いは不活性類縁元素によるI131、Cs134/137、Sr90、アクチナイドの希釈法、自然或いは人工的結合法に関する文献を概観し、農業生態系への適用性と効果について評価した。

放射性セシウムに対しては、低減効果が観察されたのは粘土鉱物試験であり、対象動物とその生成物ごとの減少係数を表1に示した。ベントナイトの減少効率に差があるのは対象動物の体質の違い、ベントナイトの加工形態の違いによると推定される。Cs134 吸収抑制がモンモリロナイトで示されてきた。チェルノブイリ事故後に、少量投与でも効果があり安価なヘキサシアノ鉄(II)酸が着目された。ヘキサシアノ鉄(II)酸鉄(III)アンモニウム(AFCF、ギース塩)の効果に関する文献について表2に示した。他のヘキサシアノ鉄(II)酸も研究され、KFe-HCF、NH<sub>4</sub>Fe-HCF、Fe<sub>4</sub>-HCFが子豚のCs134 吸収を97%以上抑制し、AFCFより安価で製造が容易であった。ヘキサシアノ鉄(II)酸は家畜、人のセシウムを低減するにあたり安全で経済的であるが、最大効果を上げる化合物が何か特定できるまで今後も動物実験が必要である。プルシアンブルーは粘土鉱物よりセシウム結合性に優れているが、動物から排泄された後の環境中での動向に関する調査が必要である。結論として好適な添加剤はベントナイトとヘキサシアノ鉄(II)酸である。

カルシウムは安価で家畜内の放射性ストロンチウム吸収抑止効果が示された。Ca の効果は生体の年齢、骨のミネラル成分に依存した。相対的には飼料のCa量が少ないほどミルクの放射性Sr量は多かった。硫酸バリウム、マグネシウム化合物の効果も報告された。結論としてはミルクと肉の汚染レベルを低下させるには安定Caが好ましい。

安定ヨウ素によるI131 低減効果については多くの調査がなされてきた(表3)。小型の反芻動物(羊、ヤギ)はミルクへのヨウ素除去メカニズムが牛とは異なる。安定ヨウ素以外の化学剤のI131 低減効果を表4にまとめた。結論としては、安定ヨウ素は甲状腺への放射性ヨウ素摂取を抑止しミルク中の濃度を増加させる危険性がある。

Pu239 等アクチナイドは環境中で不溶性の化合物であるため可動性は制限される。腸の吸収は少なく、吸入によって体内へ入り骨と肝臓に蓄積する。畜産物が汚染される可能性は低い。家畜ではなく人の急性曝露に関する調査がほとんどである。

## 3-17

文献タイトル(原題)	Administration of ammonium ferric hexacyanoferrate strongly reduces radiocaesium contamination of cow's milk
文献タイトル(和訳)	牛乳中の放射性セシウム汚染を強力に低減するヘキサシアノ鉄酸アンモニウム鉄の処理
著者/所属機関(国)	Vreman K (Research Inst. Livestock Feeding and Nutrition (IVVO-DLO), Lelystad, NLD), Van Der Struijs T D B (State Inst. Quality Control of Agricultural Products (RIKILT-DLO), Wageningen, NLD), Van Den Hoek J
掲載雑誌	Netherlands Milk and Dairy Journal
発表年	1992

チェルノブイリの原子炉事故における最も深刻な長期にわたる環境問題は、放射性セシウムによるものである。粘土鉱物は、放射性セシウムの体内への吸収を減少させる上で効果的であるが、かなりの量が必要である。より効果的な対応策は、ヘキサシアノ鉄酸アンモニウム鉄(AFCF)の使用である。本レポートは、乳を分泌する牛の給餌実験結果であり、放射性セシウムの牛乳への移行について AFCF の投与効果を測定した。

総実験期間は、餌や飲料、乳に含まれる放射性セシウムの自然界に含まれる濃度測定用に 2 週間の汚染前期間、および実験要因の効果測定用の 4 週間の汚染期間で構成された。また、それぞれ2頭の牛からなる 2 つのグループを比較した。一つのグループは、チェルノブイリの放射性降下物で汚染された牧草と濃厚飼料を定量与え、もう一つのグループは、定量の AFCF を調整して加えた同様のものを与えた。いずれも汚染期間である4週間投与した。なお、投与した AFCF は工業的に生産された未精製のもので、1 日当たり 5g であり、3.3g の純塩と 1.7g の塩化アンモニウムを含んでいる。実験期間の終わりに、AFCF を投与されていないグループの牛は屠殺され、血液や器官組織等が標本採集された。Cs134 と Cs137 の濃度は、ガンマ線分光器により測定した。AFCF を投与しなかったグループの牛乳は、Cs134 と Cs137 の濃度は通常のパターンを示し(表 3)、移行係数についてもチェルノブイリ事故後の研究で判明した値の範囲内であった。AFCF を投与したグループについては、牛乳内の Cs137 は最も高濃度で 3.5Bq/kg であり、投与しなかったグループの値(20Bq/kg)よりも著しく低かった。投与期間の終わりにおいて、牛乳中の両放射線核種は 87%減少していた。AFCF は牛乳内に残存せず、塩類の毒性もないことが実験により証明されている。また AFCF の投与は、乳や体内器官におけるナトリウムおよびカリウム濃度の低下を引き起こすことはなかった。しかしながら微量元素を含め、より高いイオン価の陽イオンが、複合体と結合も体外への排出もしない点は重要である。乳を分泌する動物において汚染を減らす最も効果的かつ安全な方法は、汚染されていない飼料を与えることである。

AFCF を投与されていない牛の体内器官における放射線核種の濃度において、脳組織以外の組織は乳よりも高い値であり、特に食用の器官や組織で際立っていた(表 4)。移行係数については、腎臓において 0.018d/kg と最も高い値であった。肝臓では 0.012d/kg であり、筋肉組織では 0.007~0.014d/kg の値であった。濃度における肉/乳の比率は、この実験で 1.8~3.0 の値と算出された。

3-18

文献タイトル(原題)	Reduction of Radioactive Caesium in Meat and Fish by Soaking
文献タイトル(和訳)	浸漬法による食肉及び魚中の放射性セシウムの低減化
著者/所属機関(国)	Petaejae E, Puolanne E (Univ. Helsinki, Helsinki, FIN), Rantavaara A, Paakkola O (Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Helsinki, FIN)
掲載雑誌	Journal of Environmental Radioactivity
発表年	1992

肉や魚に含まれる放射性セシウムを減らすために、食品産業や家庭等にて使用可能である様々な浸漬法の効率性を調査した。

**肉の塩水または水による浸漬:**2日間の浸漬により、肉の放射線セシウム量は当初の50%以下に減少した。10%塩水のほうが5%塩水または水よりも減少したが、肉の塩分量を低く抑えるためには5%の塩水が最も良い。浸漬時間が長いほど放射性セシウムは減少するが、塩水を取り替えて3回浸すよりも高い値であった。

**塩水注射:**肉の放射性セシウム除去を促進するものではなかった。

**高温:**10%塩水に42℃で漬けた肉の放射性セシウム量の平均は、7~8℃の塩水に漬けた肉の平均よりも著しく低かった。しかしながら、高温は変質(腐敗)の可能性はある。

**肉片のサイズ:**放射性セシウムは、1kgの肉片よりも200gのほうが速く除去された。

**加熱:**10%塩水で加熱した肉は、放射性セシウム量が平均53%まで減少した。これは塩水に漬けただけよりも、ずっと少ない減少量である。

**塩漬け、燻製および加熱:**塩水注入+包んで塩水浸漬+燻製+加熱の過程では、当初の70%まで肉の放射性セシウム量が減少した。肉を加工前に浸漬すると、加工品の放射性セシウム量は減少した。感覚器官面での質は、加工前浸漬の有無による有意な違いはなかった。

**オーブンで加熱した肉:**平均放射性セシウム量は、当初の61%まで減少した。加熱前に浸漬させると、加熱後には放射性セシウム量が当初の46%まで減少した。加熱前浸漬の有無は、風味において有意な違いは見られなかった。

**加熱ソーセージ:**トナカイ肉の部分の放射性セシウム量は、当初の量の84%であった。これはトナカイ肉が未浸漬の場合であり、加工前に浸漬した場合、放射性セシウム量は当初の61%であった。肉を2回塩水浸漬すると、40%となった(水の場合44%)。

**粗引き肉:**17時間流水に浸すと、放射性セシウム量は当初の10%まで減少した。

**魚肉:**浸漬において短時間処理の組み合わせでは放射セシウム量を平均36%まで減らし、長時間処理の組み合わせでは当初の21%まで減少するが、値のばらつきが目立っていた。

#### <結論>

肉の放射性セシウム除去については、200g以下の小片を継続して2日間×3回、5%塩水に浸漬することを推奨する。粗引き肉は、17時間ゆっくり流水で浸漬させると良い。これらの方法で、セシウム含有量は当初の90%以上減少させることができる。魚については、3%塩水および水に少なくとも4時間×3~4回、継続して浸漬させると良い。これによりセシウム含有量は当初の60%以上減少させることができる。肉や魚の質感はこれらの浸漬により著しく変わることはない。塩分量もわずかに増えるのみである。

浸漬により、栄養面の減少や、肉や魚の処理手順も増えてしまう。とはいえ、コスト面や除染の効率性、なじみのある方法という点で、浸漬法による除染は有利である。

## 3-19

文献タイトル(原題)	Decontamination of radio-active foods Meat,meat products and milk
文献タイトル(和訳)	放射性食品の浄化法 食肉、肉製品およびミルク
著者/所属機関(国)	Hecht H (Bundesanstalt fuer Fleischforschung, Kulmbach, DEU)
掲載雑誌	Fleischwirtschaft
発表年	1992

植物の場合、初期では洗浄や皮剥きにより容易に除染できる。有機酸や食塩などを洗浄剤に加えると、除去率が改善する。土壌から根を経由して起こる植物の全体汚染では、扱いが困難になる。果物ジュースの除染では、一番効果的であったのはギーゼ塩(ヘキサシアノ鉄酸(II)アンモニウム鉄)だが、同時にビタミンCやカリウム含有量を低下させ、アンモニア濃度が増加してしまう。ヘキサシアノ鉄酸(II)カリウムコバルトの使用では、カリウム含有量は安定的に保て、アスコルビン酸の減少も65%まで低下させ、除去率は99.1%である。ゼオライトを使用すると、有益な含有物はほぼ影響を受けず、除去率はゼオライトの型により91.1~98.5%である。動物の全体汚染では、同じイオンないしは化学生理学的条件にて類似のふるまいを示すイオンの安定同位体の投与が、除染において重要である。大量の粗繊維を含む飼料を投与すると、消化管における放射性物質の吸収を減少させたり、再排出を促進させる。また複合鉄シアン化合物(「紺青」の誘導体)を飼料に加えると、セシウム同位体の吸収率は確実に減少する。

乳は全体汚染であり、細菌感受性や栄養面および質感の特性が変わってしまうことなどから、放射性核種の除去は困難である。いくつかの酪農製品製造過程は、I131、Sr90、Cs137の除去において実用的である。バターでは上記3種において、当初含有量の2-4%が残留するのみである。チーズは製造方法により異なり、レンネットが凝固したカゼインから作られたチーズは、酸で沈殿させたカゼインから作られたものよりも残留放射能が多い。一方でホエーの乾燥により製造されたホエーパウダーは、放射性セシウム濃度を再度濃縮させてしまう。これらは再溶解後ギーゼ塩により除染すると、莫大なコストがかかる。

牛肉は、茹でると含有するCs137の70%が減少する。豚肉は脂肪が多いため、牛肉ほど著しく減少しない。この場合、冷水に漬け、湯を何度か交換することが最良である。煮汁は捨てなければならない。このように、除染は水溶性タンパク質の損失を引き起こす。焼いたり揚げたりする場合も、肉中のセシウムの29%が肉汁に移行するため、これを捨てる必要がある。フランクフルトタイプのソーセージを作成する場合、加熱処理にて透水性のケーシングに肉詰めすることで、除染率は56%となる。肉において、除染の最も効率的な形態はマリネである。酸性食品の中に漬けられることで、より柔らかく典型的な食感になる。最良の条件下では、セシウムの90%を除去することができる。なお、包装された肉の汚染については、包装材が防護となり除染状況は良好である。ナチュリンケーシング(透水性の合成ケーシング)のソーセージが汚染された場合、少なくとも多価性の放射線核種(Ce144、Pr144、Zr95、Nb95)に対して透過性は少ない。破損がなければ、ケーシングの除去によりソーセージは効率的に除染可能である。

## 3-22

文献タイトル(原題)	The use of inorganic ion exchangers for the removal of cesium and strontium from milk
文献タイトル(和訳)	牛乳中のセシウム及びストロンチウム除去のための無機イオン交換体の使用
著者/所属機関(国)	Van Z De Villiers W, De Klerk S (Atomic Energy Corp. South Africa, Pretoria, ZAF)
掲載雑誌	Radiochimica Acta
発表年	1991

牛乳中の Cs 及び Sr 除去能力を有する無機イオン交換体について論じた。リン酸チタン(以下 TP)、zirconium phosphosilicate(以下 ZPS)、チタン酸ナトリウム(以下 NT)、又はこれらを組み合わせた化合物の合成イオン交換体を比較評価した。最大 10 倍まで放射性セシウムに汚染された牛乳を人が飲用するのに安全な推奨「対策レベル(action levels)」に除染できる(表 1)。除去性には優れているものの、高コスト、処理による牛乳の pH 変化が大きいという欠点がある。クリノプロクロライト高含有の天然ゼオライト使用時の除去率は、Cs では 90%、Sr では 25%であり、pH 変化もない。

図 3 に見られるとおり、イオン交換体の除去率は、ZPS 及びヘキサシアノ鉄酸銅(以下 CH)が Cs 最大除去率を示したのに対し、Sr 除去率が良好であったのは、TP、NT、クリノプロクロライト(PA 及び PG)であったが、どれも Cs ほどには除去しなかった。クリノプロクロライトのイオン交換性は、高い順に  $Cs^+ > Rb^+ > K^+ > NH_4^+ > Ba^{2+} > Sr^{2+} > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 、或いは、 $Na^+$  と  $Ca^{2+}$  の順は逆で報告されている。図 4 のとおり、pH は ZPS や TP を牛乳に添加すると低くなり、NT を添加すると高くなり、CH、PA、PG を添加しても変化はない。牛乳中のイオン交換体の割合を高くすると、牛乳からの核種除去率は高くなるのがわかっており、1% (m/v) 及び 4% (m/v) クリノプロクロライトと比較した結果ここでも Cs 除去率で同傾向が示された(図 5)。合成イオン交換体で最大効果を上げるには、Cs に対しては ZPS、Sr に対しては NT である。同時に、処理中の pH 変化を最小限にする場合は ZPS と NT を組み合わせた交換体が評価された。図 6 では、牛乳 100ml に ZPS4g と NT2g を組み合わせて処理することによって Cs95%、Sr54%を除去したことが示されている。しかしこのような処理をすると牛乳の価格は 2-3 倍に跳ね上がりコスト的には牛乳をチーズに加工した方が良い。

ZPS、TP、NT 処理前後の牛乳成分の内訳を表 2 に示した。最大変化は、NT で処理したサンプルのナトリウム含有量増加、TP 処理によるリン酸増加、そしておそらくイオン交換体中の塩化不純物による塩化物増加であった。他の成分量に処理の影響はなかった。もっと多量のイオン交換体を使用した処理結果を表 3 に示した。粒子同士が接着し濾過中に除去された脂肪を除けば、このような多量のクリノプロクロライトで処理を行っても牛乳は通常の配列から外れた成分変化は見られず人の飲用に適していることも確認された。

簡単に実施可能な工程一例を挙げる。牛乳 1L にクリノプロクロライト最大 40g を添加し、2 時間混ぜ、牛乳を濾過又はイオン交換体が重力で沈殿すると、除染牛乳の出来上がりである。

## 3-24

文献タイトル(原題)	Radioactivity transfer during food processing and culinary preparation
文献タイトル(和訳)	食品加工と調理中に発生する放射能移行
著者/所属機関(国)	Grauby A (Centre d'etudes nucleaires de Cadarache, Saint Paul-lez-Durance, FRA), Luykx F (Commission of the European Communities, Luxembourg)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

1989年にCadarache(南仏)で開催された欧州委員会及びフランス原子力委員会主催の標題のテーマによる国際セミナーでの主な成果をまとめた。

原発事故の際に適用できる飲料物、食材の除染技術とコストを議論した。飲料物の中では、飲料物成分のほとんどを占め、調理に使用される水の汚染レベルを低く維持することが基本であること。1957年英国のWindscale事故では汚染されたミルクを汚染の少ない乳製品に製造する方法が模索されたこと。果物や野菜の対策効果は、製造方法、汚染経路(大気沈着、経根吸収)によって変化すること。外側の汚染の場合、洗うことで12-90%の放射性核種を除去できること。水溶性核種の場合茹でることにより除去できること。内側の汚染の場合は洗浄や漂白を併用することでSr60%、Cs90%が除去できる可能性のあること。穀物の殻に75%のCsが残存してしまうこと。家畜の肉は汚染されていない飼料投与又はセシウム結合体を利用することで除染できる可能性のあること。魚の加工、調理中の核種挙動に関する情報が少ないこと。魚は茹でてでもSr10%、Cs10-80%しか除去できないこと、揚げても10%しか低減しないこと。食品加工技術は社内情報とされることが多く政府がどこでどのように介入するかを見極めるのは難しいという社会的問題点があること。食物の廃棄、家畜飼料材として利用或いは貯蔵という対策も残されていること。

食品干渉対策を進める上で考慮すべき要点は以下のとおりである。

- (1) 原子力事故時の食材除染方法を提供する。
- (2) 費用面の概算は難しいことが多々あるが、食物の廃棄と比較すればほとんどは低コストで収まる。
- (3) 調理法への干渉は扱いにくい問題であり国民の反応は予期し難いため、このような介入対策をどのように実行するかという問題が残る。しかし、商業上の機密性、製造過程での修正が存在するものの、産業レベルの観点からは干渉は実行され得る。
- (4) 食材の最大許容汚染基準値は調理後を基準にすべきである。国境周辺で管理が行われるため加工過程や調理過程で実施できる除染については考慮されないのが基準値は実際の線量より過大評価される。
- (5) 紙面で提示されている放射能移行調査結果の分析は困難で、直接の外部汚染に関するのか間接的な経根吸収による汚染なのか明らかではないことも多く、食品加工過程の移行放射能濃度の記載方法も統一されていない。

例えば粉末ホエイのような、二次製品や廃棄材に放射能が移行する他の問題の発生要因になるため、食材除染は加工によって実行可能と認識することは重要である。

## 3-25

文献タイトル(原題)	Radiocaesium contents of meat in Italy after the Chernobyl accident and their changes during the cooking process
文献タイトル(和訳)	チェルノブイリ事故後のイタリアの放射性セシウム食肉中含有量とその調理過程での変化
著者／所属機関(国)	Lotfi M, Notaro M, Piermattei S, Tommasino L, Azimi-Garakani D (ENEA, Rome, ITA)
掲載雑誌	Journal of Environmental Radioactivity
発表年	1990

30年間の食物連鎖における放射性核種の初期研究は主に大気圏内核実験による放射性降下物からの食材汚染に関するものであった。環境中に放射性核種  $10^{18}\text{Bq}$  を放出したチェルノブイリ原発4号炉事故後は多くの国々で放射線保護研究計画が確立され、環境への放射性核種放出後の食物連鎖汚染に注意が払われてきた。イタリアでの成人の食事では、肉は主要消費食材の約14%を占め、あとはミルク及び乳製品22%、葉菜13%、パン及びパスタ26%、魚2%、果物23%である。本紙では1986-1988年にイタリア国内から集めた牛、羊、豚、鶏、七面鳥、ウサギの食肉中のCs134、Cs137量を、HPGe検出器を用いたガンマ線スペクトロメリーにより377試料(1986年175試料、1987年108試料、1988年94試料)で分析、同時に調理での含有量低減方法を調査した。

図1に肉試料中の放射性セシウム含有量のヒストグラムを示した。試料の1/3は1Bq/kgの検出下限値未満であった。下限値を超える試料の65%は50Bq/kg未満、50-100Bq/kgは15%であった。全試料の放射性セシウム加重平均は75Bq/kgであった。放射性セシウム含有量の年別ヒストグラムも示した(図2)。放射性セシウムは羊肉で最大値1960Bq/kgが観察され、他の羊肉2試料は約900Bq/kg程度であった。他の種類の肉は常に400Bq/kgを下回った(1試料のみが例外で470Bq/kg)。

食物連鎖における放射性核種の低減或いは除染はイオン交換体技術、電気分解、洗浄、漂白、缶詰加工で達成できることが報告されてきたが、調理によって可能であるという興味深い報告もあった(Lotfi et al., 1989, 1990)。ほとんどの種類の肉では一般的な調理時間である1時間、1%塩水で調理することにより未調理の試料と比較して80%程度も低減できることが明らかにされてきた。30%の放射性セシウムは調理に使用する水の中へ放出された(表1)。高温が放射性セシウムのような揮発性放射性核種を流出された可能性がある。

## 3-26

文献タイトル(原題)	Influence of hydrated aluminium silicate supplementation of feed on caesium contamination of animal products under natural and experimental conditions
文献タイトル(和訳)	自然及び実験条件下での畜産物のセシウム汚染に対する珪酸アルミニウム水和物飼料添加の影響
著者/所属機関(国)	Pethes G, Rudas P, Bartha T (Univ. Veterinary Science, Budapest, HUN)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

Zeovit(沸石40%を含む珪酸アルミニウム水和物)による胃腸の放射性セシウム吸収低減効果を調べた。

1つの試験では、自然に汚染された(Cs134+Cs137)飼料にZeovit 6%を添加し鶏とウサギに与えた。Zeovit 投与によって、鶏、ウサギ、両者の飼料には25~35%の放射性セシウムが残っており吸収を抑制した。

もう1つの試験では、鶏にZeovitを投与後Cs134を経口投与し、Zeovit添加量による違いを観察した。Zeovitを投与しない鶏と比較して、10%投与では35~71%減少、7%投与と4%投与では30~48%減少した(いずれも $P < 0.001$ )。対照群でも投与群でもCs134の吸収が速くCs134投与後1時間で最大放射能が血清で観察されたが、減少も速く血液中に蓄積されなかった。Cs134は鶏、ウサギ両者の大腿筋に多く蓄積されCs134投与2日目に最大濃度に達しその後徐々に減少した。体内で最も多くCs134が観察された組織は筋肉であった。

Zeovit 投与によって放射性セシウム摂取は劇的に低下した。Zeovit の添加量により飼料の栄養が増減する作用はなかった。

## 3-27

文献タイトル(原題)	Use of different substances as decontaminators of Cs137 and <sup>134</sup> Cs in bulls, cows and calves
文献タイトル(和訳)	雄牛、雌牛、子牛の Cs137 及び Cs134 除染に用いる 4 つの物質
著者／所属機関(国)	Leitgeb R (Univ. Bodenkultur), Ratheiser N (Bundesministerium fuer Land- und Forstwirtschaft, Vienna, AUT)
掲載雑誌	Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, Vol.2
発表年	1990

ブルシアンブルー、ヘキサシアノ鉄(II)酸アンモニウム、ベントナイト、カオリナイトの Cs137 と Cs134 除染効果を調査した。

雄牛での実験(表 I)では、夫々順に 40、30、20、10%の除染効果が観察された。生物学的半減期は 3 週間と推定された。

雌牛の実験(表 II)では、Cs137 及び Cs134 の牛乳排出量を試験した。ヘキサシアノ鉄(II)酸アンモニウムの添加で 70%(最大効果)、カオリナイトでは 5%(最小効果)の除染効果があった。

子牛の実験(表 III)では、Cs137 及び Cs134 蓄積量を試験した。444Bq/kg の汚染粉ミルクでは蓄積は見られず、2035Bq/kg の粉ミルクでは体内に放射性セシウム増加が見られた。境界となる Cs137 及び Cs134 含量は 1850Bq/kg であった。生物学的半減期は 4 週間と推定された。

## 3-29

文献タイトル(原題)	Investigations of the use of clay minerals and Prussian Blue in reducing the transfer of dietary radiocaesium to milk
文献タイトル(和訳)	食餌からの放射性セシウム牛乳移行を低減する粘土鉱物及びプルシアンブルー利用の研究
著者/所属機関(国)	Gordon F J, Rice D (Queen's Univ. Belfast, GBR), Unsworth E F, Pearce J, McMurray C H, Moss B W
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1989

粘土鉱物やプルシアンブルー (AFCF) による、牛乳への放射性セシウム移行抑制効果を泌乳牛を用いて確認した。

実験 1 では、ワイオミング産ナトリウム型ベントナイトを 0、300、600、900g/d で混餌しサイレージ(発酵飼料)から牛乳への放射性セシウム移行を比較した。サイレージ、濃厚飼料、糞尿、牛乳サンプルの Cs134 及び Cs137 含量を測定した。牛乳中の Cs134 含量は Cs137 の半分であった。ベントナイトは牛乳への放射性セシウム移行を抑制した ( $p < 0.001$ )。しかし、600g/d では 73% の減少が観察され、900g/d との間に減少率の統計学上有意な違いはなかった。ベントナイト分布量(セシウム吸着箇所)と放射性セシウム汚染飼料摂取量との平衡状態が牛の消化管内において確立されたためと思われる。ベントナイト食餌含量  $x$  (g/d) と牛乳中のセシウム含量  $y$  (Bq/l) との関係は漸近線で  $y = 5.01 + 23.12(0.7274)^x$  と表される。この式から、ベントナイト 295g/d を投与した場合、投与しない場合に対し牛乳中のセシウムを 50% 除去すると導出できる。対照牛(ベントナイト投与無)のセシウム牛乳移行係数より、処理を施した牛はベントナイトを給与したため移行係数が低かった。血液検査を行い通常の成分配列と同じ結果を確認した。つまり牛の無機質状態にベントナイトの関与はなかったことを示している。ベントナイト混合飼料が原因で消化管の無機成分吸着が減少したという以前の報告(参考文献 7)とは異なる結果になった。

実験 2 では、ベントナイト 300g/d、クリノプチロライト 300g/d、プルシアンブルー 3g/d を食餌添加剤として比較した。どの添加剤も移行を抑制した ( $p < 0.001$ )。有効性は高い順にプルシアンブルー 85%、ベントナイト 62%、クリノプチロライト 35% であった。この結果は羊を用いた最近の調査(参考文献 8)と一致した。本研究の著者の一人(RICE D.)の非公開の調査では、プルシアンブルー給与により牛乳中にシアン化合物が検出されたという結果があるが、対照牛とプルシアンブルー給与牛の数値に差異はなく、牛乳中のシアン化合物増加という結果にはならなかった。その上、プルシアンブルー給与牛の健康状態は実験中良好であった。

両実験から、一般使用され飼料添加剤として認可されているベントナイトが牛乳中のセシウム移行を 76% 低減することがわかった。血液中の無機質状態や繁殖能力に影響はなかった。クリノプチロライトはベントナイトより効果が少なく併せてコストが高い。プルシアンブルーは最も効果があったが、英国内で飼料添加剤として認可するには用量反応関係を確立する必要がある。

## 3-30

文献タイトル(原題)	Countermeasures for reducing the transfer of radiocesium to animal derived foods
文献タイトル(和訳)	動物由来食品への放射性セシウム移行低減対策
著者/所属機関(国)	Giese W W (School of Veterinary Medicine, Hannover, DEU)
掲載雑誌	Science of the Total Environment
発表年	1989

核実験時代既に実験使用されていた、家畜の胃腸管において放射性セシウムの吸収を阻止する2種類の食餌添加物質の適用について概観した。

#### 1)ヘキサシアノ鉄(II)酸鉄(III)

チェルノブイリ事故前にラット実験で、 $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$  による胃腸管のセシウム吸収低減且つ排泄増加が示されていた。事故後に  $\text{NH}_4\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$  (AFCF) の実際の牧場条件下でのパイロット試験が促進された。西ドイツとオーストリアの農業研究施設で AFCF 効果確認試験が、羊、豚、子牛、乳牛を対象に実施され効果を上げた(表 1~4)ため、両国では 1987 年に C14 及び Fe59 標識 AFCF (C14 and Fe59 labeled AFCF) を家畜の食餌添加物質として承認した。雌牛と子牛を用いた調査いずれにおいても AFCF は健康面と生産性に副作用のない有効なセシウム解毒物質と報告された。

#### 2)粘土鉱物

事故前から、ベントナイトは、胃腸管で放射性セシウム吸着を低減すること、造粒工程において安定した物質であることが周知され、ラット、羊、乳牛使用実験で効果を上げていた。このような特性に加え食餌添加物質としての即時使用に法的な障害がなかったため事故後に大きな関心を集めた。実際の汚染飼料条件下での試験では牛乳中の放射性セシウム減少結果は 50%であった(表 5)。しかし、牛 1 頭への 500g/d 以上のベントナイト投与は、投与量が多過ぎる問題、何トンもの大量のベントナイトをどう扱うかという問題、放射性汚泥が蓄積する問題、牛の Ca、P、Mg バランスを崩す問題があり、これ以上投与量を増加することは不可能であった。さらに、ベントナイトの一日の投与量を 100~150 倍多くしても牛乳及び肉での放射性セシウム減少効果は AFCF の半分だけという問題もあった。Bolus alba は、豚試験では放射性セシウムの排泄を増加させ、肉、肝臓、腎臓の放射性セシウム量を低下させたが、ベントナイトとの比較では 1/1.7 の効果しかなかった。カオリンの主成分であり、ベントナイト同様、化学的にはケイ酸アルミニウムを主成分とし、吸着力は低い即ちイオン選択性が弱く、陽イオン交換容量は小さい。

AFCF は、少量であっても、家畜の放射性セシウム量を低下させるための食餌添加物質としてどの化合物よりも効果的であった。表 6 に AFCF、ベントナイト、Bolus alba の比較を示した。AFCF と、ベントナイト、Bolus alba を重量比較すると AFCF は 88~266 倍の効果があった。さらに、粘土鉱物は巨万の大型動物に投与する際にミネラル及び痕跡元素損失の原因となる。AFCF は、西ドイツとオーストリアの保健機関の全面的な承認を得た、動物由来食品の放射性セシウム負荷を低下させる好適な選択肢と言える。

3-31

文献タイトル(原題)	Effects of bentonite on transfer of radionuclides from forage to milk
文献タイトル(和訳)	飼料から牛乳への放射性核種移行に対するベントナイトの影響
著者/所属機関(国)	Piva G, Fusconi G (Univ. Cattolica S.C., Piacenza, Italy), Fabbri S, Lusardi E (P.M.P., Piacenza, Italy), Stefanini L, Modenesi R (Azienda Sperimentale "V. Tadini", Piacenza, Italy)
掲載雑誌	Health Physics
発表年	1989

チェルノブイリ事故により汚染された飼料を食する牛、羊、ヤギの乳及び肉が汚染を受けた。特に、子供への影響の大きい牛乳への放射性核種移行を阻止すべくベントナイト投与実験を実施した。

事故直後、Cs137 1,100Bq/kg、Cs134 600Bq/kg で汚染された alfalfa (マメ科の飼料作物)を食する乳牛にベントナイト 200g/日を混餌した。alfalfa から牛乳への Cs137 及び Cs134 両核種移行係数( $f_m$ )は、対照群が  $0.32 \times 10^{-2}$ d/L、ベントナイト添加群が  $0.24 \times 10^{-2}$ d/L であり最大 25%低かった。

ベントナイトの効果をさらに確認する目的で他の試験も行った。使用した alfalfa hay (アルファルファ干し草)は Cs137 20,000Bq/kg、Cs134 7,500Bq/kg で汚染されていた。乳牛 3 群に夫々、ベントナイト 0、300、600g/日を混餌した。これにより牛乳中の Cs137 濃度は対照群 (395.4Bq/L) に対し、300g 添加群で 55%減少 (177.5Bq/L)、600g 添加群で 80%減少 (77.7Bq/L)した。Cs134 濃度も同じオーダーで減少した。両放射性セシウムに対する  $f_m$ (d/L)は、対照群が  $0.27 \times 10^{-2}$ 、300g 添加群が  $0.12 \times 10^{-2}$ 、600g 添加群が  $0.07 \times 10^{-2}$ であった。血漿よりも血球で放射能濃度増加が大きかった(図 2)。ベントナイト投与により血漿、血球、牛乳中の放射能濃度は減少した。ミネラル及び酵素血中成分の変化はなく、飼料摂取量も低下しなかった。

ラットにおいてもセシウム放射性核種排泄を促進し、ベントナイトの有効性が示された。

## 3-33

文献タイトル(原題)	Synthesis, effectiveness and metabolic fate in cows of the caesium complexing compound ammonium ferric hexacyanoferrate labelled with $^{14}\text{C}$
文献タイトル(和訳)	$^{14}\text{C}$ 標識ヘキサシアノ鉄(II)酸鉄アンモニウム、セシウム錯化合物の合成、有効性及びウシにおける代謝
著者/所属機関(国)	Arnaud M J, Getaz F (Nestec Ltd., Lausanne, CHE), Tannhauser F, Schoenegger R (Allgaeuer Alpenmilch AG, Muenchen, DEU), Giese W (Tierärztlichen Hochschule Hannover, DEU), Clement C, Blum J
掲載雑誌	Journal of Dairy Research
発表年	1988

ウシの汚染飼料にヘキサシアノ鉄(II)酸鉄アンモニウム(AFCF)を添加することにより、糞便への Cs137 排出を促進し牛乳汚染を低下させた。 $^{14}\text{C}$  標識 AFCF ( $\text{AF}^{14}\text{CF}$ ) を合成して実験で使用した。コロイド状の  $\text{AF}^{14}\text{CF}$  は安定しており、反芻胃内でシアン化合物の遊離はなかったが、ヘキサシアノ鉄(II)酸が反芻胃液中で確認され、添加放射能の 0.13% が  $^{14}\text{CO}_2$  となった。3 日で 91~95% が糞便排泄され、尿、牛乳中から検出された放射能は 0.068~0.071% であった。

汚染飼料を与える 2、3 日前に 3g の AFCF を継続投与することで放射性セシウムの牛乳移行を防止できることが示された。セシウムの生物学的半減期が長いこと、すでに吸収されたセシウムからの牛乳中放射能を低下させるにはもっと長い時間が必要であった。AFCF や他のヘキサシアノ鉄錯体によるこのような処置は肉のセシウム汚染を抑制しセシウムの糞便排泄を増加させた。

尿及び牛乳中の放射能から推定される腸吸収は微量であった。ヘキサシアノ鉄(II)酸の一部が吸収され、大部分のヘキサシアノ鉄(II)酸は反応せずに尿内に排出されたため、尿中にヘキサシアノ鉄(II)酸とチオシアン酸を確認できた。しかし、ヘキサシアノ鉄(II)酸カリウムを非経口投与した場合は、不溶性のセシウム錯体が体内で形成され排泄されないため経口投与時よりセシウム排泄は遅れた。セシウム錯体を長期間投与すると、2 つの真逆の作用が起こると結論できる。一つはセシウムの排泄を高める作用、もう一つは肝臓、脾臓、骨にセシウム錯体が滞留することによる排泄減速である。セシウム錯体が滞留するという結論は過去の報告と一致しないが、本試験では 9 日後に臓器から低い放射能レベルを検出した。シアン化合物が解毒されて生成されるチオシアン酸は、尿及び乳中で検出された。乳中の放射能は少量であるため標識生成物を確認することは不可能であり、乳中検出放射能が全部チオシアン酸であると仮定するならば、3g の AFCF から最大 3mg/日のチオシアン酸が代謝されると算出した。牛乳中のチオシアン酸濃度は最大 0.2mg/l に増加し、牛乳中に本来存在するチオシアン酸の 3~6% 増加量に相当する。 $\text{AF}^{14}\text{CF}$  分解生成物は反芻胃や胃腸で吸収されることが少なかった結果から、AFCF は飼料からの放射性セシウム吸収と牛乳への排出を阻止する効果的で安全、低コストの食餌添加剤であることが示された。今後は添加剤の水溶性のシアン化合物含量を特定し規格を維持できる製造方法を確立していく必要がある。腸内の寄生生物の存在が AFCF 吸収を増加させると思われる。